

ISSN 1999-494X (Print)
ISSN 2313-6057 (Online)

**Журнал Сибирского
федерального университета
Техника и технологии**

**Journal of Siberian
Federal University
Engineering & Technologies**

2024 17 (2)

ISSN 1999-494X (Print)
ISSN 2313-6057 (Online)

2024 17(2)

Журнал включен в «Russian Science Citation Index» на платформе «Web of Science»

Индексируется Российским индексом научного цитирования (НЭБ), представлен в международных и российских информационных базах: Ulrich's periodicals directory, EBSCO (CША), Google Scholar, ProQuest, Erihplus, READera, КиберЛенинке.

Включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» Высшей аттестационной комиссии.

Журнал Сибирского федерального университета Техника и технологии

Journal of Siberian Federal University Engineering & Technologies

**Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии.
Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies.**

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ)

Главный редактор: *В.А. Кулагин*. Редактор *А.В. Прохоренко*.
Корректор *Т.Е. Бастрыгина*. Компьютерная верстка *Е.В. Гревцовой*

№ 2. 27.03.2024. Индекс: 42328. Тираж: 1000 экз.

Свободная цена

Адрес редакции и издательства: 660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 79, оф. 32-03.

Отпечатано в типографии Издательства БИК СФУ
660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 82а.

*Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-28722 от 29.06.2007 г.,
выданное Федеральной службой по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия.*

<http://journal.sfu-kras.ru>

Подписано в печать 13.03.2024. Формат 60х90/8. Усл. печ. л. 11,3.

Уч.-изд. л. 10,8. Бумага тип. Печать офсетная. Тираж 1000 экз. Заказ № 21005.

Возрастная маркировка в соответствии с Федеральным законом № 436-ФЗ: 16+

CHIEF EDITOR

Vladimir Kulagin, Honorary Worker of Science and technicians of the Russian Federation, Head of the Department of Heat Technology and Fluid Dynamics of Polytechnic Institute of SibFU, Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, member of the expert council of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation on energy, electrification and power mechanical engineering, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0002-5433-7579

EDITORIAL BOARD

- Sergey Alekseenko, Academician of RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Thermophysics RAS, Siberian Branch, Novosibirsk, Russia;
- Sereeter Batmönkh, Academician of the Mongolian Academy of Sciences, Dr. of Tech., Prof., Institute of Heat Engineering and Industrial Ecology Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia;
- Yuri Galerkin, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia;
- Eugene Garin, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
- Alexander Zavorin, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Honored Worker of the Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia; ORCID 0000-0001-5724-0150;
- Vladimir Zuev, Corresponding member RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of RAS, Siberian Branch, Tomsk, Russia; ORCID 0000-0002-1271-1200;
- Sergey Ivanov, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Transbaikal State University, Chita, Russia;
- Yuriy Koziratzky, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Military Education and Research Centre of Military-Air Forces «Military-Air Academy name after N.E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin», Voronezh, Russia;
- Genius Kuznetsov, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Dr. Phys.-Math., Prof., Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia;
- Tatiana Kulagina, Honorary Worker of Education of the Russian Federation, Expert of the Russian Academy of Sciences, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0001-6165-6474;
- Feng-Chen Li, Prof. Dr. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, China; ORCID 0000-0003-2580-928X;
- Dmitriy Markovich, Academician of RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Thermophysics RAS, Siberian Branch, Novosibirsk, Russia; ORCID 0000-0002-1348-1806;
- Andrey Minakov, Dr. Phys.-Math., Prof., Siberian Federal University, Institute of Thermophysics of RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0003-1956-5506;
- Valery Mironov, Corresponding member RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0001-7877-9817;
- Vladimir Moskvichev, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computing Technologies, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0001-7072-2250;
- Bernard Nacke, Dr. of Tech., Prof., Institute of Electrotechnology Leibniz University, Hannover, Germany;
- Valeriy Nikulin, Honored Scientist of the Udmurt Republic, Honored Engineer of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Kamsk Institute of Humanitarian and Engineering Technologies, Izhevsk, Russia;
- Oleg Ostrovski, Dr. of Tech., Prof., University of New South Wales, Australia;
- Harald Oye, Dr. of Tech., Prof., Norwegian University of Science and Technology, Oslo, Norway;
- Vasili Pantelev, Honorary Worker of Science and technicians of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; Scopus ID: 57205124847;
- Petr Polyakov, Honored Metallurgist of the RSFSR, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
- Miloš Stanković, Prof. Dr., Institute of Applied Sciences, Beograd, Srbija; ORCID 0000-0001-9767-5634;
- Valery Stennikov, Academician of RAS, Dr. of Tech., Prof., Melentiev Energy Systems Institute RAS, Siberian Branch, Irkutsk, Russia, ORCID 0000-0001-6219-0354;
- Viktor Tsibulsky, Dr. Tech., Ch. Scientific Co-worker, National Research Center «Kurchatov Institute», Institute of Economic Forecasting RAS, Moscow, Russia, ORCID 0000-0002-7739-9393;
- Ibragim Khisameev, Corresponding member of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Dr. of Tech., Prof., Kazan State Technological University, Kazan, Russia;
- Nikolai Zuglenok, Corresponding member RAS, Dr. of Tech., Prof., Federal Research Center KSC RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia;
- Vladimir Shaidurov, Corresponding member RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Computational Modelling Federal Research Center KSC RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0002-7883-5804
- Anatoly Shvidenko, Doctor of Agricultural Science, Prof., International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

CONTENTS

Researching. Design. Operating Experience

Vladimir B. Ponomarev and Ivan P. Fesun

Justification of Taking into Account the Aerodynamic Drag Force when Particles Move Along the Inclined Shelf of the Pneumatic Separator 142

**Antonina A. Filimonova, Alena Y. Vlasova,
Natalia D. Chichirova and Ruzina F. Kamaliev**

Testing of Hybrid Technology Using Powdered Sorbent to Obtain Drinking Quality Water During Periods of Deterioration in Water Source Indicators 148

**Andrey P. Vasilev, Sakhayana N. Danilova,
Afanasiy A. Dyakonov, Anastasiya V. Okoneshnikova and Igor S. Makarov**

Influence of Nano-Sized Metal Oxides and Mercaptobenzthiazole on the Properties and Structure of Ultra-High Molecular Polyethylene 162

**Shukhrat M. Chorshanbiev, Kamolkhan A. Karimov, Shakhnoza R. Adilova,
Nodir J. Turakhodjaev, Abdulkhamid Erkinjonov, Mehrubon M. Mirmuhamedov,
Jamshed H. Sharipov, Ziyodullo R. Obidov and Khayriddin Komolov**

Development of Wear-Resistant Parts of High-Manganese Modified 110G13L Brand Steel 175

**Tursunboy Rakhmankulov, Abdulkhamid Erkinjonov, Kamolkhan A. Karimov,
Shakhnoza R. Adilova, Nodir J. Turakhodjaev, Mehrubon M. Mirmuhamedov,
Jamshed H. Sharipov, Ziyodullo R. Obidov and Khayriddin Komolov**

Conditions for Conducting Experimental Studies on Grain Drying 186

Darina V. Stepan

Increasing the Energy Saving Efficiency of an Isolated Object
(By the Example of a Far Eastern Federal University Campus) 193

**Galina S. Vysotskaya, Tamara I. Pisman,
Irina Y. Botvich and Anatoliy P. Shevyrnogov**

Atlantic Ocean Zones That Are Quasi-Stationary in Terms of Surface Temperature Dynamics
(Based on Satellite Monitoring Results) 205

**Igor S. Vavilov, Dmitry V. Lokotaev,
Pavel S. Yachmenev, Victor V. Fedyanin,
Konstantin I. Zharikov, Pavel V. Stepen and Anton I. Lukyanchik**

Overview of Known Power Methods for Measuring the Jet Thrust of Ion Engines:
Torsion Pendulums 214

Evgeny V. Titov, Alexander S. Solovskoy and Elena B. Osmushkina

Assessment of the Electromagnetic Environment in Zones of Simultaneous Influence
of Several Sources at Different Distances and Generation of Waves in One Measurement Plane 239

Math Modeling. Numerical Experiment

**Sergei L. Busygin, Ivan N. Dovzhenko,
Nikolai N. Dovzhenko and Aleksandr M. Tokmin**

Modeling of the Stage of the Combined Casting and Stamping Process
of Cu-MMNCR Composite Material for Resistance Welding Electrodes
with Features of the Formation of Structure and Properties 250

Information and Communication Technologies

Omer A. Dheyab, Dmitry Yu. Chernikov and Alexander S. Selivanov

Using the City's Surveillance Cameras to Create a Visual Sensor Network to Detect Fires 266

СОДЕРЖАНИЕ

Исследования. Проектирование. Опыт эксплуатации

В. Б. Пономарев, И. П. Фесун

Обоснование учета силы аэродинамического сопротивления при движении частиц по наклонной полке пневматического сепаратора..... 142

**А. А. Филимонова, А. Ю. Власова,
Н. Д. Чичирова, Р. Ф. Камалиева**

Апробирование гибридной технологии с использованием порошкообразного сорбента для получения воды питьевого качества в периоды ухудшения показателей водоисточника 148

**А. П. Васильев, С. Н. Данилова,
А. А. Дьяконов, А. В. Оконешникова, И. С. Макаров**

Влияние наноразмерных оксидов металлов и 2-меркаптобензотиазола на свойства и структуру сверхвысокомолекулярного полиэтилена 162

**Ш. М. Чоршанбиев, К. А. Каримов, Ш. Р. Адилова,
Н. Д. Тураходжаев, А. Еркинджонов, М. М. Мирмухамедов,
Дж. Х. Шарипов, Э. Р. Обидов, Х. Комолов**

Разработка износостойких деталей из высокомарганцевой модифицированной стали 110Г13Л..... 175

**Т. Рахманкулов, А. Еркинджонов, К. А. Каримов,
Ш. Р. Адилова, Н. Д. Тураходжаев, М. М. Мирмухамедов,
Дж. Х. Шарипов, Э. Р. Обидов, Х. Комолов**

Условия проведения экспериментальных исследований по сушке зерна..... 186

Д. В. Стэпан

Повышение эффективности энергосбережения изолированного объекта (на примере кампуса Дальневосточного федерального университета) 193

**Г. С. Высоцкая, Т. И. Письман,
И. Ю. Ботвич, А. П. Шевырногов**

Квазистационарные по динамике поверхностной температуры зоны в Атлантическом океане (по результатам спутникового мониторинга)..... 205

**И. С. Вавилов, Д. В. Локотаев,
П. С. Ячменев, В. В. Федянин,
К. И. Жариков, П. В. Степень, А. И. Лукьянчик**

Обзор известных силовых способов измерения реактивной тяги ионных двигателей: торсионные маятники 214

Е. В. Титов, А. С. Соловской, Е. Б. Осьмушкина

Оценка электромагнитной обстановки в зонах одновременного влияния нескольких разноудаленных и излучающих в одной контролируемой плоскости источников..... 239

Математическое моделирование. Численный эксперимент

**С. Л. Бусыгин, И. Н. Довженко,
Н. Н. Довженко, А. М. Токмин**

Моделирование стадии совмещенного процесса литья – штамповки композиционного материала Cu–MMNCr для электродов контактной сварки с особенностями формирования структуры и свойств 250

Информационно-коммуникационные технологии

О. А. Деяб, Д. Ю. Черников, А. С. Селиванов

Использование городских камер наблюдения для создания визуальной сенсорной сети для обнаружения пожаров..... 266

**Researching. Design.
Operating Experience**

**Исследования.
Проектирование.
Опыт эксплуатации**

Theoretical and Applied Heating Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: EEXLRS

УДК 621.928.6

**Justification of Taking into Account
the Aerodynamic Drag Force when Particles Move Along
the Inclined Shelf of the Pneumatic Separator**

Vladimir B. Ponomarev* and Ivan P. Fesun

Ural Federal University

Yekaterinburg, Russian Federation

Received 30.11.2023, received in revised form 13.02.2024, accepted 14.02.2024

Abstract. The article considers a mathematical model of the movement of single particles along the inclined shelves of pneumatic separators. It is noted that in the practice of such analytical calculations, the force of aerodynamic resistance of the airflow to the movement of particles along an inclined plane is considered negligible compared to the friction force on the shelf surface. The results of simulation experiments for calculating the final velocity of particles falling off the shelf with varying values of their sizes and coefficient of friction are analyzed. The substantiation of the consideration of the aerodynamic drag force is carried out to describe the movement of particles in separators not only in free flow, but also when they move along inclined shelves. It is concluded that for engineering calculations, the aerodynamic resistance of the medium can be neglected only for particles larger than a certain size.

Keywords: mathematical model, particle, aerodynamic drag, friction resistance.

Citation: Ponomarev V. B., Fesun I. P. Justification of taking into account the aerodynamic drag force when particles move along the inclined shelf of the pneumatic separator. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(2), 142–147. EDN: EEXLRS



Обоснование учета силы аэродинамического сопротивления при движении частиц по наклонной полке пневматического сепаратора

В. Б. Пономарев, И. П. Фесун

*Уральский федеральный университет
Российская Федерация, Екатеринбург*

Аннотация. В статье рассматривается математическая модель движения одиночных частиц по наклонным полкам пневматических сепараторов. Отмечается, что в практике подобных аналитических расчетов сила аэродинамического сопротивления воздушного потока движению частиц по наклонной плоскости считается пренебрежительно мала по сравнению с силой трения о поверхность полки. Анализируются результаты имитационных экспериментов расчета конечной скорости схода частиц с полки при варьированных значениях их размеров и коэффициента трения. Проводится обоснование учета силы аэродинамического сопротивления для описания движения частиц в сепараторах не только в свободном потоке, но и при движении их по наклонным полкам. Делается вывод, что для инженерных расчетов можно пренебрегать аэродинамическим сопротивлением среды только для частиц крупнее определенного размера.

Ключевые слова: математическая модель, частица, аэродинамическое сопротивление, сопротивление трения.

Цитирование: Пономарев В. Б. Обоснование учета силы аэродинамического сопротивления при движении частиц по наклонной полке пневматического сепаратора / В. Б. Пономарев, И. П. Фесун // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(2). С. 142–147. EDN: EEXLRS

Введение

Фракционирование полидисперсного материала по крупности в пневматических сепараторах осуществляется под действием массовых сил гравитации и инерции и сил сопротивления движению частиц на пересыпных полках и в пространстве между ними.

Если при свободном движении двухфазной среды определяющим фактором разделения ее по размерам или плотности является взаимодействие сил гравитации и аэродинамического сопротивления, то при движении частиц по наклонной поверхности добавляется сила сопротивления движению или сила трения о поверхность полки.

Существует мнение, что сила трения движения частицы по плоскости в спокойной газовой среде во много раз превосходит силу аэродинамического сопротивления и последней можно пренебречь [1–4].

В случае если поверхность обдувается встречным газообразным потоком, аэродинамическое сопротивление частиц в расчетах, наоборот, учитывается [5, 6].

Таким образом, обсуждение данного вопроса является актуальным и востребованным.

Методы и принципы исследования

Рассмотрим пневматический сепаратор с обратным потоком воздуха через решетку [7, 8], предназначенный, например, для фракционирования материала размером 50–1000 мкм. Части-

цы разделяемого материала движутся сверху вниз по решетке, образованной параллельными пластинами с длиной полки до 100 мм, мелкие фракции при пересыпке с полки на полку захватываются потоком внутрь аппарата, крупные разгружаются с нижней ее части. Расстояние между жалюзи намного превышает размер частиц, воздушный поток входит без поворота, поэтому у поверхности пластин скорость потока можно считать близкой к нулевой.

Так как частица движется по наклонной полке, проецируем имеющиеся силы на ось, параллельную плоскости движения. Дифференциальное уравнение примет вид:

$$m \frac{dv}{dt} = (G - A) \sin \alpha - F_{\text{тр}} - F_c, \quad (1)$$

где m – масса шарообразной частицы; v – скорость ее движения по полке; G – сила тяжести; A – сила Архимеда; $F_{\text{тр}}$ – сила трения движения частицы по полке; F_c – сила аэродинамического сопротивления; α – угол наклона полки.

После преобразований

$$\frac{dv}{dt} = g \frac{\rho_{\text{ч}} - \rho}{\rho_{\text{ч}}} \sin \alpha - f g \cos \alpha - C_d \frac{3 v^2}{4 d} \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}}. \quad (2)$$

Здесь g – константа ускорения свободного падения; ρ – плотность дисперсионной среды; $\rho_{\text{ч}}$ – кажущаяся плотность частиц; f – коэффициент трения частицы по полке; d – диаметр шарообразной частицы.

Коэффициент аэродинамического сопротивления для переходной зоны чисел Рейнольдса можно вычислить по зависимости [9].

$$C_d = \frac{24}{\text{Re}} (0,92 + 0,147 \text{Re}^{0,55})^{1,45}. \quad (3)$$

Согласно [6] даже сферические частицы имеют трение качения с проскальзыванием. Для частиц, отличающихся по форме от шара, трение о наклонную поверхность имеет сложный физический характер. Будем считать, что коэффициент f в уравнении (2) – это некоторый обобщенный коэффициент трения частицы о поверхность полки, включающий как трение качения, так и трение скольжения.

Результаты математического моделирования

Определяющим фактором процесса фракционирования частиц в жалюзийном сепараторе является их начальная скорость схода с полки в движущийся газовый поток. Ее можно рассчитать, решая уравнение (2) численными методами, например Рунге-Кутты с начальными условиями: $t = 0$; $x = 0$; $v = 0$. Угол наклона полки 45 градусов к горизонту, длина полки 100 мм. Проведенные расчеты показали, что в исследуемом диапазоне параметров:

$50 \leq d \leq 1000$ мкм, $\rho_{\text{ч}} = 2600$ кг/м³, $\rho = 1,2$ кг/м³, $f = 0,15$ при угле наклона полки 45 градусов к горизонту скорость частиц увеличивается с длиной пробега по наклонной полке увеличивается, причем для тонких фракций она выходит на постоянное значение (рис. 1).

Если не учитывать аэродинамическое сопротивление частиц, уравнение (2) можно решить в явном виде

$$v = gt \left(\frac{\rho_{\text{ч}} - \rho}{\rho_{\text{ч}}} \sin \alpha - f \cos \alpha \right); \quad (4)$$

$$x = g \frac{t^2}{2} \left(\frac{\rho_{\text{ч}} - \rho}{\rho_{\text{ч}}} \sin \alpha - f \cos \alpha \right). \quad (5)$$

На рис. 1 зависимость скорости частиц, рассчитанной без учета сопротивления газовой среды от длины полки, обозначена цифрой 6. Эта кривая инвариантна к размеру частиц, а конечная скорость схода частиц с полки длиной 100 мм составляет около 1,08 м/с.

Для частиц 1000 мкм (линия 5) расчетная скорость их движения с учетом сопротивления воздуха составляет около 1,06 м/с, что сопоставимо с кривой 6. Чем меньше размер частиц, тем больше это различие. Это связано с тем, что, например, для частиц с размером 50 мкм (линия 1) установившаяся скорость движения 0,117 м/с становится на длине полки около 10 мм, для частиц с диаметром 200 мкм (линия 3) постоянная скорость устанавливается на длине более 1500 мм, а для частиц крупнее 1000 мм – более 17000 мм.

На рис. 2 представлена зависимость относительного отклонения скоростей частиц при сходе с наклонной полки длиной 100 мм, рассчитанных с учетом силы сопротивления газовой среды и без ее учета от величины коэффициента трения частицы о поверхность полки.

Как видно из графика, для исследуемого диапазона параметров относительное отклонение для частиц 1000 мкм при учете и без учета сопротивления газовой среды составляет около 3 % при изменении коэффициента трения частиц о поверхность полки до 0,75 и в дальнейшем монотонно возрастает до 10 %. Для других фракций наблюдается похожий характер, при этом

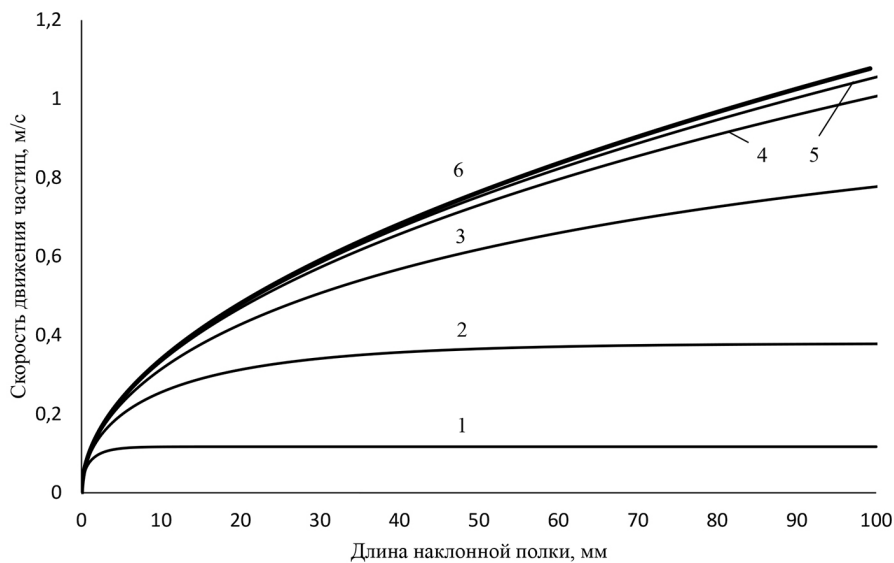


Рис. 1. Изменение скорости движения частиц при движении по наклонной полке с учетом коэффициента аэродинамического сопротивления: 1 – $d = 50$; 2–100; 3–200; 4–500; 5–1000 мкм; 6 – скорость движения частиц любого размера без учета сопротивления среды

Fig. 1. Change in the velocity of particles when moving along an inclined shelf taking into account the coefficient of aerodynamic drag: 1 – $d = 50$; 2–100; 3–200; 4–500; 5–1000 microns; 6 – the speed of movement of particles of any size without taking into account the resistance of the medium

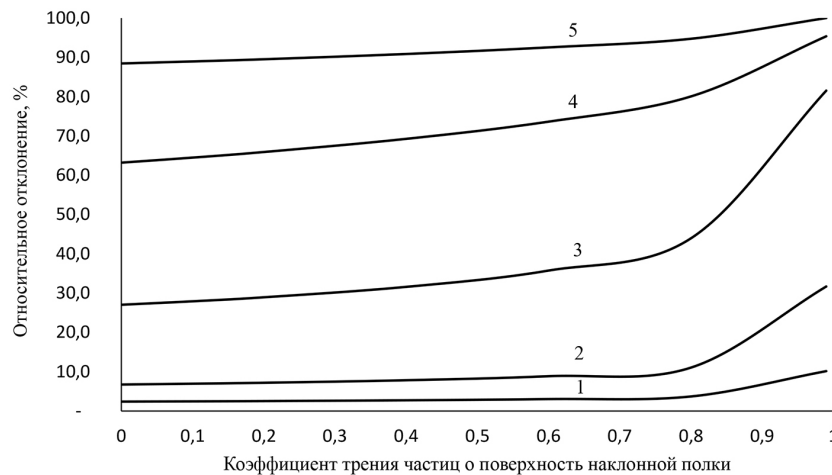


Рис. 2. Изменение относительного отклонения скоростей частиц при спуске с наклонной полки длиной 100 мм, рассчитанных с учетом силы сопротивления газовой среды и без ее учета от величины коэффициента трения частицы о поверхность полки: 1 – $d = 1000$; 2–500; 3–200; 4–100; 5–50 мкм

Fig. 2. Change in the relative deviation of particle velocities when descending from an inclined shelf with a length of 100 mm, calculated taking into account the resistance force of the gas medium and without taking it into account from the value of the coefficient of friction of the particle on the shelf surface: 1 – $d = 1000$; 2–500; 3–200; 4–100; 5–50 microns

относительные отклонения тем выше, чем меньше размер частиц. Если не учитывать сопротивления газовой среды для частиц 50 мкм, относительная погрешность в расчетах скоростей составит до 100 %.

Выводы

В инженерных расчетах технологического оборудования, в котором осуществляются процессы движения частиц сыпучего материала по наклонным поверхностям, можно не учитывать аэродинамическое сопротивление газовой среды для частиц крупнее определенного размера. Так, для воздушного сепаратора с наклонной решеткой [7] таким размером являются частицы крупнее 1000 мкм. Для более тонких фракций частиц учет сопротивления газовой среды является необходимым условием.

Относительная погрешность в расчетах при игнорировании силы сопротивления газовой среды увеличивается с уменьшением размера частиц, причем с ростом абсолютного значения коэффициента трения частиц о поверхность наклонной полки относительные погрешности возрастают еще больше.

Проведенные в данной работе вычисления относятся к шарообразным частицам, несомненно, возникает интерес, какие будут отличия в расчетах для сыпучих материалов, не имеющих сферической формы.

Список литературы / References

- [1] Нейков О. Д., Логачев И. Н. *Аспирация и обеспыливание воздуха при производстве порошков*. Москва: Металлургия, 1981. 192 [Nejkov O. D., Logachev I. N. *Aspiration and dedusting of air in the production of powders*. Moskva: Metallurgiya, 1981, 192 (in Rus.)]

[2] Потапов В. Я. Разработка математической модели движения частиц в сепараторе по трению и упругости. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, 2014, 2, 324–329 [Potapov V. Ya. Development of a mathematical model of particle motion in a separator by friction and elasticity. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2014, 2, 324–329 (in Rus.)]

[3] Морозов А. М., Захаров И. П. Математическая модель движения частицы по наклонной плоскости. *Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения*, 2003, 1(2), 226–227 [Morozov A. M., Zakharov I. P. Mathematical model of particle motion on an inclined plane. *Design, use and reliability of agricultural machinery*, 2003, 1(2), 226–227 (in Rus.)]

[4] Исаев Ю. М., Семашкин Н. М., Злобин В. А. Теоретическое описание перемещения частицы винтовой поверхностью по плоскости. *Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы VI Международной научно-практической конференции, Ульяновск, 06 февраля 2015 года*. Ульяновск: Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия им. П. А. Столыпина, 2015, 2015(1), 44–47 [Isaev Yu. M., Semashkin N. M., Zlobin V. A. Theoretical description of the movement of a particle by a helical surface along a plane. *Agrarian science and education at the present stage of development: experience, problems and ways to solve them: Materials of the VI International Scientific and Practical Conference, Ulyanovsk, February 06, 2015*. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Agricultural Academy named after P. A. Stolypin, 2015, 2015(1), 44–47 (in Rus.)]

[5] Чиркун Д. И., Левданский А. Э., Левданский Э. И., Опимах Е. В. Исследования многокаскадного гравитационного сепаратора. *Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ*, 2010, 1(3), 175–178 [Chirkun D. I., Levdansky A. E., Levdansky E. I., Opimakh E. V. Studies of a multistage gravity separator. *Works of BSTU. Chemistry and Technology of Inorganic Substances*, 2010, 1(3), 175–178 (in Rus.)]

[6] Матвиенко О. В., Андропова А. О., Андриасян А. В., Мамадраимова Н. А. Математическое моделирование движения сферической частицы по наклонной поверхности в сдвиговом потоке. *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*, 2018, 52, 75–88 [Matvienko O. V., Andropova A. O., Andriasyan A. V., Mamadramova N. A. Mathematical modeling of the motion of a spherical particle along an inclined surface in a shear flow. *Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and Mechanics*, 2018, 52, 75–88 (in Rus.)]

[7] Пономарев В. Б. Переработка металлургических шлаков методом пневматической сепарации. *Сталь*, 2015, 2, 82–83 [Ponomarev V. B. Processing of metallurgical slags by pneumatic separation. *Steel*, 2015, 2, 82–83 (in Rus.)]

[8] Ponomarev V. B. Pneumatic fractionation of enriched quartz sand for dry building mixtures *AIP Conference Proceedings: 16th International conference on industrial manufacturing and metallurgy, ICIMM 2021*. Nizhny Tagil: 2022, 030030

[9] Ponomarev V. B., Fesun I. P. Mathematical Modeling of the Particle-Deposition Rate Taking into Account Dynamic Relaxation. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2020, 54(5), 906–912

EDN: CFIDZX

УДК 628.16

Testing of Hybrid Technology Using Powdered Sorbent to Obtain Drinking Quality Water During Periods of Deterioration in Water Source Indicators

Antonina A. Filimonova, Alena Y. Vlasova*,
Natalia D. Chichirova and Ruzina F. Kamalieva
*Kazan State Power Engineering University
Kazan, Russian Federation*

Received 03.01.2024, received in revised form 13.01.2024, accepted 14.02.2024

Abstract. To date, the purification of natural water to a drinking level is almost an impossible task. The constant deterioration of water quality in the surface water source is associated with both man-made discharges and an insufficient degree of wastewater treatment for both municipal and industrial purposes. Not always available technologies at the treatment plant are able to work effectively during flood periods, periods of “flowering” of water, as well as cope with short-term discharges. Insufficient degree of purification affects both the organoleptic characteristics of the water and the operational characteristics of the equipment used. The article provides an overview of technologies that are used to improve the quality of drinking water. When choosing a technology, cleaning efficiency, capital costs for technology implementation, as well as installation time are taken into account. Based on these criteria, the “carbonation” method was selected and tested on a developed and designed laboratory mock-up installation. Based on the laboratory results obtained, this method was tested at a water treatment plant. The paper presents the results of pilot tests and describes in detail the effect of the “carbonation” method on the main indicators of water quality at critical moments of purification.

Keywords: hybrid technology, carbonization method, drinking water, powdered adsorbent.

Acknowledgments. The results were obtained with the financial support of the Ministry of Education and Science “Study of processes in a hybrid power plant fuel cell – gas turbine” project code FZSW-2022–0001.

Citation: Filimonova A. A., Vlasova A. Y., Chichirova N. D., Kamalieva R. F. Testing of hybrid technology using powdered sorbent to obtain drinking quality water during periods of deterioration in water source indicators. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(2), 148–161. EDN: CFIDZX



Апробирование гибридной технологии с использованием порошкообразного сорбента для получения воды питьевого качества в периоды ухудшения показателей водоисточника

**А. А. Филимонова, А. Ю. Власова,
Н. Д. Чичирова, Р. Ф. Камалиева**

*Казанский государственный энергетический университет
Российская Федерация, Казань*

Аннотация. На сегодняшний день очистка природной воды до питьевого уровня является довольно сложной задачей. Постоянное ухудшение качества воды в поверхностном водоисточнике связано как со сбросами техногенного характера, так и с недостаточной степенью очистки сточных вод как коммунального назначения, так и промышленного. Не всегда имеющиеся технологии на станции очистки способны эффективно работать в паводковые периоды, периоды «цветения» воды, а также справляться с кратковременными сбросами. Недостаточная степень очистки влияет как на органолептические показатели воды, так и на эксплуатационные характеристики применяемого оборудования. В статье представлен обзор технологий, которые применяются для улучшения показателей качества питьевой воды. При выборе технологии учитывается эффективность очистки, капитальные затраты на внедрение технологии, а также сроки монтажа. На основании данных критериев был выбран метод «углевание» и апробирован на разработанной и спроектированной лабораторной макетной установке. На основании полученных лабораторных результатов данный метод был апробирован на станции очистки воды. В работе представлены результаты опытно-промышленных испытаний и подробно описано влияние метода «углевание» на основные показатели качества воды в критичные моменты очистки.

Ключевые слова: гибридная технология, метод «углевание», вода питьевого качества, порошкообразный адсорбент.

Благодарности. Результаты получены при финансовой поддержке Минобрнауки «Изучение процессов в гибридной энергетической установке топливный элемент – газовая турбина» шифр проекта FZSW-2022–0001.

Цитирование: Филимонова А. А. Апробирование гибридной технологии с использованием порошкообразного сорбента для получения воды питьевого качества в периоды ухудшения показателей водоисточника / А. А. Филимонова, А. Ю. Власова, Н. Д. Чичирова, Р. Ф. Камалиева // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(2). С. 148–161. EDN: CFIDZX

Введение

Деятельность человека существенно сказывается на качестве воды в поверхностных водоисточниках. Причиной является недостаточная очистка хозяйственно-бытовых сточных вод, масштабные выбросы стоков промышленных предприятий, а также сельскохозяйственных ферм. Помимо сбросов также существует сезонная проблема с июля по сентябрь для регионов средней полосы России, а именно процесс «цветения» воды. Цветение воды и приобретение сине-зеленой окраски является результатом развития цианобактерий (сине-зеленых водорослей) [1]. С каждым годом процесс «цветения» водоисточников становится наиболее катастрофичным, и причина заключается в сокращении работ, направленных на дноуглубительную очистку. Хотя

данное мероприятие очень важно, так как в осенний период, когда снижается температура воды в водоемисточнике и снижается активность солнца, цианобактерии формируют споры, которые опускаются на дно водоема, где зимуют, сохраняя жизнеспособность популяции. Массовое размножение цианобактерий происходит при температуре 18–25 °С, а водородный показатель находится в слабощелочной зоне.

Как техногенные факторы, так и интенсивное размножение цианобактерий в летний период существенно снижают качество очистки природной воды. Положение усугубляется постоянным ужесточением норм на питьевую воду. Недостаточная степень очистки влечет за собой ухудшение органолептических характеристик очищенной воды, появляется привкус и запах.

Для качественной очистки природной воды необходимо провести анализ водоемисточника и выявить систематические отклонения от средних значений реки за несколько лет. А также необходим инженерно-технический анализ для выявления износа водозаборного и водоочистного оборудования [2]. На сегодняшний день большая часть технологических схем подготовки воды устарела и отсутствуют проектные технические решения по перевооружению станций. В литературном обзоре статьи представлен анализ разработанных технологий для повышения эффективности очистки природной воды.

Обзор литературы

Получение высококачественной питьевой воды всегда усугубляется большой концентрацией загрязнений в исходной воде. Поэтому для снижения органических соединений на первичном этапе очистки автор Ю. А. Феофанов предложил замену химических реагентов (коагулянт и флокулянт) с максимально возможной дозой в пиковые периоды. Применение коагулянта оксихлорида алюминия и высокомолекулярного флокулянта без первичного хлорирования позволит повысить очистку на первоначальном этапе более чем на 10 % [3]. Ограничением по применению химических реагентов является остаточное их содержание в очищенной воде, а также характеристики воды в водоемисточнике, температура и водородный показатель существенно влияют на эффективность очистки.

Аналогичные исследования были проведены авторами Т.А. Николаевой и И.П. Плетниковой на полупромышленной экспериментальной установке. Авторы установили, что при увеличении дозы коагулянта на 20–25 % и введении 0,35 мг/л полиакриламида значительно повышается эффективность очистки от взвешенных веществ и нефтепродуктов. Для удаления фенолов и поверхностно-активных веществ было апробировано озонирование с дозой 4 мг/л, которое подтвердило, что возможна как деструкция исходных веществ, так и образование более токсичных продуктов в зависимости от способа обработки [4].

Также существуют иные способы получения питьевой воды высокого качества. Один из способов очистки воды включает в себя стадии первичного хлорирования, коагуляции и последующей очистки в отстойниках или осветлителях со взвешенным осадком и в фильтрах, сорбционной очистки с использованием активированных углей и вторичного хлорирования. Данный способ описали в своих книгах зарубежные авторы Роберт М. Кларк и Бенджамин У. Ликинс младший [5] и отечественные ученые Ф. А. Шевелев и Г. А. Орлов [6]. Однако в процессе его использования на стадии первичного хлорирования образуются тригалогенметаны, а при наличии в исходной воде трудноокисляемых органических соединений наблюдается не-

достаточный эффект очистки. Также среди недостатков стоит выделить сложный процесс регенерации угля через 3–6 месяцев его эксплуатации.

Л. А. Кульский описал способ очистки, включающий первичное озонирование, реагентную очистку в отстойниках и фильтрах и доочистку порошковым угольным сорбентом, который дозируется в трубопровод перед насосной станцией первого подъема и песчаными скорыми фильтрами [7]. Но дозирование активированного угля в данной точке снижает эффект сорбционной доочистки и способствует быстрому росту потерь напора в загрузке и сокращению продолжительности фильтроцикла. Стоит отметить, что данный способ повышает эффективность очистки воды, в том числе от трудноокисляемых органических соединений и снижает эксплуатационные затраты.

Шенфельд Райк, Фишер Шарлотте и Райзер Ян-Петер предложили использовать для очистки воды способ, осуществляемый при помощи адсорбции в установке водоочистки, состоящей из одного основного адсорбционного устройства и адсорбционного устройства пиковой нагрузки, подключаемого при превышении заданного значения концентрации загрязнений и размещенного выше по потоку относительно основного адсорбционного устройства. Адсорбционные устройства имеют неподвижный слой дисперсного активированного угля в свободной засыпке [8]. Несмотря на сокращение риска образования десорбции, использование данного метода не исключает возможность ее возникновения. Основным преимуществом внедрения является отсутствие у адсорбционного устройства пиковой нагрузки проскоков загрязнений и увеличения срока службы установки водоочистки.

Веолия Уотер Солюшн и Текнолоджис Сэпорт предложили способ очистки воды, состоящий из зоны предварительного взаимодействия воды с порошкообразным активированным углем концентрацией 0,5 г/л – 10 г/л, после которого наступает стадия флокуляции с утяжеленными хлопьями. Далее происходит осаждение и удаление из нижней зоны осаждения смеси осадка, балласта и порошкообразного адсорбента, которые направляются в гидроциклон, а из верхней зоны осаждения удаляется обработанная вода. Балласт из гидроциклона направляется в зону флокуляции, а смесь осадка и порошкообразный адсорбент частично возвращается в зону предварительного взаимодействия, а при концентрации угля ниже 0,5 г/л добавляется свежий адсорбент. Далее наступает стадия подкисления суспензии адсорбента [9]. Таким образом, использование такого способа обеспечивает возможность возврата части уже использованного адсорбента и подачи в воду, подлежащую очистке, необходимого дозированного количества суспензии свежего адсорбента в водной среде для получения качественной воды, в результате чего снижается расход адсорбента и уменьшается количество операций обработки, необходимых для получения воды.

А. В. Тарасевич предложил фильтровать исходную воду через сорбент, содержащий графены и/или углеродные нанотрубки, и затем – через мембрану, содержащую сквозные поры диаметром 0,005–0,3 микрона. Данное изобретение повышает эффективность и надежность очистки воды и снижает ее стоимость. Очищенная вода сохраняет минеральные элементы, приобретает повышенную биологическую активность и может быть использована для питьевых и медицинских целей, водных процедур, а также в сельском хозяйстве [10].

Ученые Е. Л. Войтов и Ю. Л. Сколубович предложили использовать станцию водоподготовки, содержащую контактную камеру, осветлитель, скорый фильтр, резервуар чистой воды,

сетевой насос, установку озонирования, установку хлорирования, установку коагулирования, резервуар-усреднитель промывной воды, сгуститель, фильтр-пресс, насос осадка, эжектор-распылитель, аэратор-окислитель, блок питания, вентилятор, воздухоувку, подкачивающий насос, воздухоотделитель, установку флокулирования, промывной эжектор, отстойник контактной массы, сорбционный фильтр, загруженный гранулированным активным углем, промывной насос, насос осветленной воды, бункер осадка, для реагентного обесцвечивания, обезжелезивания, деманганации и умягчения маломутных природных вод. Результатом использования данного изобретения является повышение технологической, экономической эффективности очистки природной воды, полезной производительности и экологической безопасности станции водоподготовки [11].

Авторы Луцзянь Лю, Жун Сюй, Чжунвэнь Не, Цзюнь Дун, Юн Мин, Лэ Дэн и Лянцзюнь У предложили систему для очистки сточных вод с использованием порошкового активированного угля, содержащую устройство для добавления активированного угля, устройство для смешивания и обработки, устройство для разделения воды и активированного угля, устройство для обратной промывки, систему управления и модуль питания, что позволяет обеспечить высокоэффективную очистку сточных вод с использованием порошкового активированного угля и упростить регенерацию порошкового активированного угля [12].

На основании проведенного анализа литературных данных можно сделать вывод, что применение активных углей в качестве сорбционной очистки в системе подготовки воды эффективно и безопасно. Но большая часть рассмотренных технологий требует кардинальных изменений действующей технологии, а, следовательно, и больших капитальных затрат. Поэтому существенные модернизации так и остаются на стадии проекта. Поэтому основной целью данной работы было создание метода с минимальным изменением действующей технологии очистки и небольшими капитальными вложениями. Наиболее перспективным решением с целью очистки питьевой воды являются активные угли, которые обладают высокой эффективностью в отношении химических свойств. За основу был взят метод «углевания», дозирование порошкообразного угля в виде угольной пульпы. Предварительно был разработан лабораторный макет действующей технологии очистки и апробирован метод «углевания».

Лабораторные испытания на макетной установке

Лабораторная макетная установка проектировалась на основании реальной станции очистки. Масштаб макета установки был выбран 1:40. В качестве конструкционного материала использовали органическое стекло толщиной 5 мм. Действующая технология включает следующее оборудование: смеситель, отстойник, механический песчаный фильтр. Макет был сделан по чертежам действующего оборудования для максимального приближения к реальным условиям. Вода с помощью насоса подается в смеситель (расход 0,2 л/мин), одновременно предусмотрена подача коагулянта ОХА марки «АХГ» (16,8 % алюминий хлоргидрат, 56 мг/л по товарному продукту) с помощью микродозатора. Далее вода поступает в камеру хлопьеобразования и осуществляется дозирование флокулянта Floram An-905 PWG 0,24 мг/л (концентрация раствора флокулянта составляет 0,27 %). Разница между дозированием коагулянта и флокулянта составила 8 минут. Из камеры хлопьеобразования вода поступает в отстойник. Время прохождения пути от подачи воды в смеситель до выхода из отстойника составляет 1,5 часа. После

отстойника вода подается на механический фильтр. Механический фильтр представляет собой цилиндрический корпус с верхней подачей воды через сетчатый материал, для равномерного распределения воды по фильтрующему материалу. Внизу фильтра тоже установлен сетчатый материал, препятствующий выносу фильтрующего материала из зоны фильтрации. В качестве фильтрующего материала использовался кварцевый песок. Вода на механический фильтр подается с помощью насоса.

На макетной лабораторной установке была проанализирована технология очистки с учетом реальных дозировок химических реагентов и метод «углевания». На макетной установке был апробирован способ «углевания» с целью улучшения показателей качества готовой питьевой воды. Основной упор был сделан на снижение следующих показателей: ТС и перманганатная окисляемость. «Углевание» заключалось в дозировании растертого до пыльного состояния древесного активированного угля. Дозировка угля составляла 10 мг/л. Реагенты: коагулянт (56 мг/л) и флокулянт (0,24 мг/л) были продозированы в строгой последовательности с учетом реальной технологии. Дозирование угольной пульпы осуществлялось в камеру хлопьеобразования. Для процесса углевания была выбрана марка древесного активированного угля – БАУ.

Оценка эффективности технологий производилась физико-химическими методами анализа: UV–VIS-спектральный анализ в диапазоне длин волн 190–800 нм, приборный метод определения общего (ТС), органического (ТОС), неорганического углерода (ТIC), перманганатная окисляемость, цветность, щелочность, водородный показатель. Для анализа использовались следующие приборы: Shimadzu UV-1800, Elementar vario TOC, pH-метр Hanna.

UV–VIS-спектральный анализ проводился согласно методикам: «UV-1800 Shimadzu Spectrophotometer» и «Методы оптической спектроскопии» [13]. Данная методика не входит в перечень государственных стандартов, а опирается на европейскую систему оценки SPECIFIC ULTRAVIOLET ABSORBANCE (SUVA) AND UV254.

Определение общего органического углерода проводилось согласно ГОСТ Р 52991–2008 «Методы определения содержания общего и растворенного органического углерода», приводится методика определения содержания общего органического углерода в воде при помощи анализаторов углерода, принцип базируется на методе Дюма-Прегля, где проба сжигается в потоке инертного газа, а количественное определение углекислого газа производится на выходе с помощью датчика [14].

Определение перманганатной окисляемости проводилось согласно ГОСТ Р 55684–2013 «Вода питьевая. Метод определения перманганатной окисляемости» [15]. Определение цветности производилось фотометрическим методом согласно ГОСТ 31868–2012. Щелочность определялась титриметрическим способом по ГОСТ 31957–2012.

Результаты лабораторных исследований приведены в табл. 1.

Из полученных результатов лабораторных испытаний на макетной установке следует положительный эффект «углевания» на качество очищенной воды. По полученным данным: перманганатная окисляемость, органический углерод, показатель SUVA 254 – фиксируется снижение содержания органических веществ, по цветности спектральный анализ при поглощении D 400 – практически исчезает. Поэтому метод «углевания» возможен к применению при сезонных ухудшениях качества исходной воды. Данный метод заключается в дозировании угольной пульпы (водоугольная взвесь). Также основными критериями выбора данного метода являются

Таблица 1. Результаты анализов апробированных технологий на макетной установке

Table 1. Results of analyses of proven technologies on a mock-up installation

Показатель	Исходная вода	Очищенная вода после действующей технологии	Очищенная вода после метода «углевания»
Цветность, град.	21±3	10±3	5±3
ПО, мгО ₂ /л	5,8±0,4	3,3±0,4	3,0±0,4
Щелочность, ммоль/л	2,8±0,2	2,6±0,2	2,5±0,2
pH, ед	7,34±0,1	7,36±0,1	7,44±0,1
ТС, мг/л	15,6±0,3	13±0,3	10,4±0,3
ТКС, мг/л	10,9±0,3	9,8±0,3	9,4±0,3
ТОС, мг/л	4,7±0,3	3,2±0,3	1,0±0,3
D 254	0,242	0,091	0,076
D 400	0,061	0,01	0
D 550	0,03	0	0

минимальные финансовые вложения в реконструкцию действующей технологии и максимальное использование установленного действующего оборудования.

Учитывая положительный опыт апробирования метода «углевания», следующий этап заключался в проведении опытно-промышленных испытаний на действующей станции.

Опытно-промышленные испытания метода «углевания»

Апробирование технологии «углевания» на действующей станции проводилось с дозированием угольной пульпы. Уголь марки БАУ может использоваться для подготовки питьевой воды (по данным ГОСТ 6217–74), он адсорбирует органические вещества и снижает перманганатную окисляемость. Использование угля в виде пульпы (порошка) позволяет в короткие сроки, в течение нескольких часов, нивелировать выброс органических веществ, связанный с природными условиями или техногенными причинами. Таким образом, «углевание» может рассматриваться в качестве экспресс-метода контроля и борьбы с биологическими и органическими загрязнениями питьевой воды.

Опытно-промышленные испытания проводились на одном фильтре из десяти действующих в связи с однотипностью конструкций всех фильтров, а также необходимостью сравнения полученных результатов предлагаемой технологии с результатами проведения подготовки питьевой воды без «углевания» для оценки точности исследования.

Для определения точки ввода угольной пульпы был проведен анализ технологической схемы для определения наиболее доступного варианта. Теоретически ввод угольной пульпы можно осуществлять на насосной станции I подъема в аванкамеру, в смеситель и перед входом на фильтр. При выборе точки ввода учитывались следующие параметры:

- удобство дозирования угольной пульпы с последующим контролем за изменением качества воды;
- удобство перемешивания угольной пульпы и более полного воздействия на обрабатываемую воду за счет задерживания угля в кварцевом песке фильтра и увеличения времени воздействия;

– возможность отсечения метода «углевания» от всей технологии подготовки воды, а также фильтрования воды после «углевания» на песчаном фильтре с последующим постепенным вымыванием угольной пульпы из фильтра.

По технологическим особенностям станции очистки воды ввод угольной пульпы осуществлялся в «воздушник» входного трубопровода перед фильтром с последующим выносом пульпы на фильтрующую поверхность.

Дозировка угольной пульпы может составлять от 5 до 20 мг/л, доза зависит от загрязненности воды и точки дозирования, а именно от содержания органических веществ в воде и загрязнений техногенного характера. Так как вода поступает на фильтр после коагулирования и отстаивания, содержание органических веществ в ней значительно ниже, поэтому оптимальной и экономичной дозировкой угольной пульпы будет 5 мг/л.

Для приготовления угольной пульпы была подготовлена смесительная установка с соединительной и регулирующей арматурой. Смесительная установка представляла собой бак объемом 90 л, миксер с электродвигателем, насос, ротаметр. Электродвигатель мощностью 370 Вт, напряжением 220 В, частотой вращения 2700 об/мин. Насос мощностью 900 Вт, производительностью 3800 л/ч и напряжением 220 В. К электродвигателю крепилась миксерная насадка из оцинкованной стали, которая перемешивает угольную пульпу. Массовый расход пульпы был рассчитан с учетом расхода подачи воды на фильтр. Для упрощения дозирования угольная пульпа была предварительно расфасована по контейнерам (рис. 1).

Заготовка угольной пульпы смешивалась с теплой водой (35–45 °С) при помощи электро-мешалки до получения однородной массы и далее переливалась в бак. Для поддержания однородного агрегатного состояния пульпа непрерывно перемешивалась. Постоянное перемешивание осуществлялось насосом с байпасной линией (циркуляция) (рис. 2). Пульпа подается с помощью насоса, а расход регулируется ротаметром (0,054–0,54 м³/ч). Время дозирования пульпы составило 8 часов. По расчетам, среднее время контакта угольной пульпы в зоне свободной воды от входа потока в фильтр до поверхности загрузки составило в среднем 19 минут. Подача пульпы происходит в высокоскоростной турбулизированный поток, что гарантированно обеспечивает взвешенное состояние пульпы.

Перед началом опытно-промышленных испытаний и после была осмотрена фильтрующая поверхность (кварцевый песок). По окончании фильтроцикла фильтр был переключен на промывку. Время промывки составило 5 минут, что является нормой.



Рис. 1. Контейнеры с заготовками для приготовления угольной пульпы

Fig. 1. Containers with blanks for the preparation of coal pulp



Рис. 2. Перемешивание угольной пульпы с помощью насоса

Fig. 2. Mixing of coal pulp with a pump

Перед началом эксперимента была разработана режимная карта, согласно которой отбирались пробы воды. Лабораторный анализ проводился по следующим показателям: перманганатная окисляемость, цветность, мутность, общий органический углерод. Результаты представлены как в виде таблицы, так и в формате диаграмм, для возможности сравнения экспериментальных результатов, полученных до и после фильтров, а также для сравнения работы двух параллельно работающих фильтров были использованы статистические методы анализа, которые позволили максимально полно и точно оценить эффективность очистки. Были вычислены основные статистические параметры невзвешенного

ряда: средняя арифметическая, абсолютная погрешность, число степеней свободы, критерий Стьюдента, среднее квадратичное отклонение, дисперсия, ошибка средней арифметической, коэффициент вариации, показатель точности опыта. По результатам проведенного статистического анализа измеренные показатели качества воды являются верными ввиду достоверных критериев Стьюдента средней арифметической и значения показателя точности опыта меньше 5 % (табл. 2–3).

По графическим зависимостям (рис. 3) видно, что разница в перманганатной окисляемости между водой до и после фильтра достоверно больше для фильтра с «углеванием», т.е. фильтр

Таблица 2. Результаты лабораторного анализа воды (до и после фильтрации) методом «углевания»

Table 2. Results of laboratory analysis of water (before and after filtration) using the «carbonization» method

Время/ дата отбора пробы	ПО, мг/л		Цветность, град.		Мутность, мг/л		ООУ, мг/л		Ост. хлор, мг/л	
	До	После	До	После	До	После	До	После	До	После
11:00/ 19.04.23	3,8± 0,3	3,7± 0,3	20± 4,5	6,8± 2	1,76± 0,4	0,58± 0,1	3,8± 0,3	3,7± 0,3	1,46± 0,3	1,43± 0,3
13:00/ 19.04.23		3± 0,3		5,8± 1,7		0,58± 0,1		3,4± 0,3		1,28± 0,3
15:00/ 19.04.23	3,6± 0,3	3,2± 0,3	25±5	5,9± 1,8	2,6± 0,4	0,58± 0,1	3,8± 0,3	3,2± 0,3	1,31± 0,3	1,3± 0,3
17:00/ 19.04.23		2,6± 0,25		6,9± 2,0		0,58± 0,1		3,4± 0,3		1,16± 0,3
12:00/ 20.04.23	3,4± 0,3	2,9± 0,3	24±5	5,3± 1,5	2,2± 0,4	0,58± 0,1	3,6± 0,3	3,4± 0,3	1,83± 0,3	1,47± 0,3
10:00/ 21.04.23	4,5± 0,4	3,1± 0,3	40±9	10,5 ±2	3,74± 0,4	0,58± 0,1	5,2± 0,4	3,8± 0,3	1,01± 0,28	0,96± 0,28

Таблица 3. Результаты лабораторного анализа воды (до и после фильтрации) без «углевания»

Table 3. Results of laboratory analysis of water (before and after filtration) without «carb»

Время/ дата отбора пробы	ПО, мг/л		Цветность, град.		Мутность, мг/л		ООУ, мг/л		Ост. хлор, мг/л	
	До	После	До	После	До	После	До	После	До	После
11:00/ 19.04.23	3,8± 0,3	3,4± 0,3	20± 4,5	7,6± 2	2± 0,4	0,58± 0,1	3,8± 0,3	3,3± 0,3	1,28± 0,3	1,28± 0,3
13:00/ 19.04.23		3± 0,3		6,8± 1,9		0,58± 0,1		3,5± 0,3		1,24± 0,3
15:00/ 19.04.23	3,4± 0,3	3± 0,3	16±4	6,0± 1,6	2± 0,4	0,58± 0,1	3,8± 0,3	3,3± 0,3	1,3± 0,3	1,28± 0,3
17:00/ 19.04.23		2,7± 0,25		5,6± 1,5		0,58± 0,1		3,2± 0,3		1,13± 0,3
12:00/ 20.04.23	3,4± 0,3	3± 0,3	11±4	7,4± 2	0,58± 0,1	0,58± 0,1	3,6± 0,3	3,2± 0,3	1,3± 0,3	1,26± 0,3
10:00/ 21.04.23	3,8± 0,3	2,7± 0,3	10±3	6,1 ±1,6	0,59± 0,1	0,58± 0,1	5,2± 0,4	3,2± 0,3	1,33± 0,3	1,19± 0,3

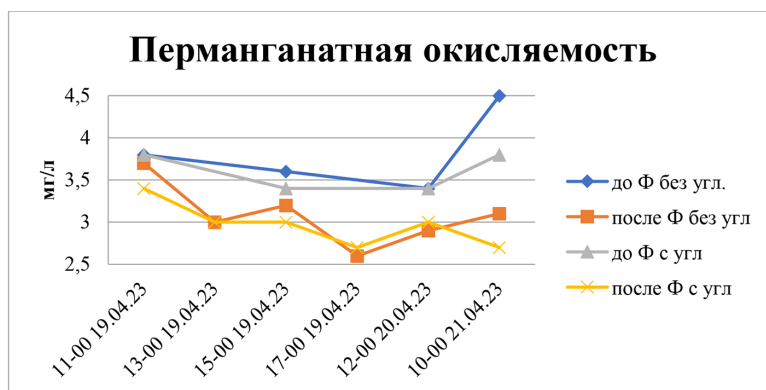


Рис. 3. Изменение перманганатной окисляемости до и после фильтров

Fig. 3. Changes in permanganate oxidizability before and after filters

с «углеванием» снимает большее количество веществ, определяемых перманганатной окисляемостью. Кроме того, стоит отметить, что произошло резкое увеличение показателя в пробе воды на входе фильтра с «углеванием» в 10:00 от 21.04.23, что связано с изменением режима работы отстойника. При увеличении производительности станции или отключении части отстойников на промывку увеличивается скорость потока воды и вследствие этого происходит вынос органических веществ из отстойника.

По графическим зависимостям (рис. 4) видно, что по цветности вода до фильтров с «углеванием» и без значительно отличается. В фильтре с «углеванием» показатель цветности на входе стабильно выше, особенно в 10:00 от 21.04.23. Также стоит заметить, что вода после фильтров по цветности практически одинаковая. Можно сделать вывод, что угольная пульпа обеспечивает снижение цветности до нормативных показателей. Поскольку принято, что цвет-

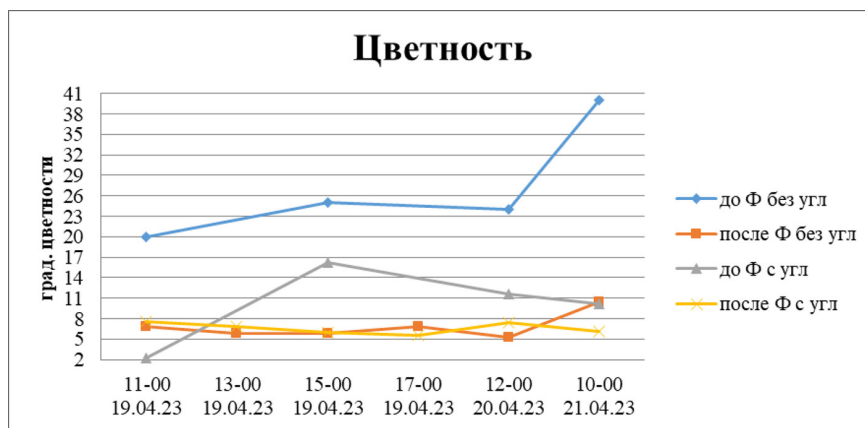


Рис. 4. Изменение цветности до и после фильтров

Fig. 4. Chroma change before and after filters

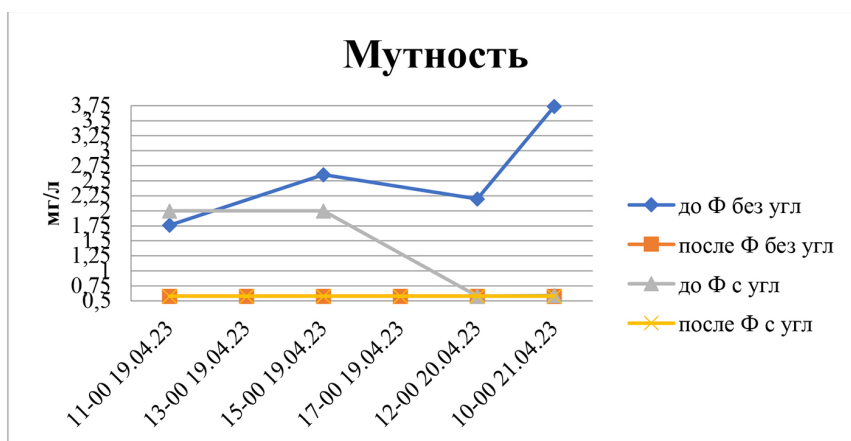


Рис. 5. Изменение мутности до и после фильтров

Fig. 5. Turbidity change before and after filters

ность природной воды обусловлена в первую очередь присутствием органических комплексов железа, можно считать данный результат примером эффективности «углевания» для удаления «органики».

Мутность воды до фильтров с «углеванием» и без значительно отличалась (рис. 5). Мутность воды на входе в фильтр с «углеванием» намного выше, особенно в 10:00 от 21.04.23. Однако после фильтров мутность воды становится одинаковой. Это свидетельствует о сильно различающемся составе воды, входящей на фильтры из отстойников. Но при этом фильтры показали одинаковую эффективность по удалению мутности.

Так же, как и в случае с другими показателями, содержание общего органического углерода на входе в фильтр с «углеванием» 21.04.23 многократно выше, чем на фильтре без «углевания». Из графиков (рис. 6) видно, что снижение общего органического углерода больше на фильтре с «углеванием».

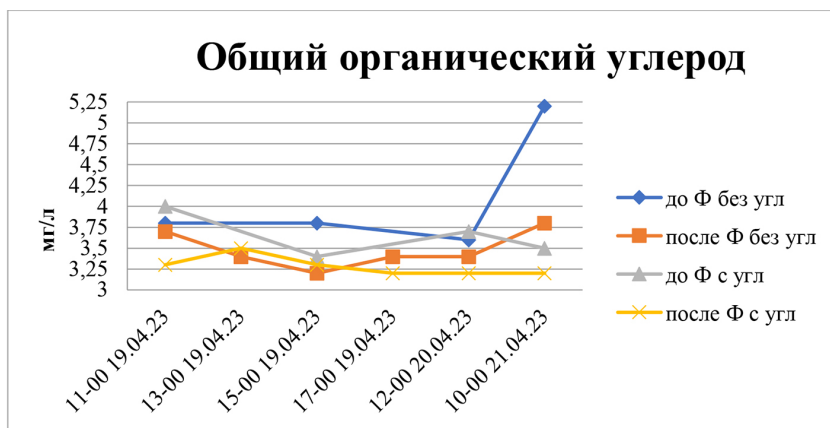


Рис. 6. Изменение общего органического углерода до и после фильтров

Fig. 6. Change in total organic carbon before and after filters

Результаты по содержанию связанного хлора до/после фильтров с «углеванием» и без не показали достоверного различия.

Заключение

Из сравнения статистической достоверности различий между показателями работы фильтра с «углеванием» и фильтра без «углевания» можно сделать следующие заключения:

- по критериальной оценке вода, поступающая на фильтр без «углевания», достоверно отличается от воды, поступающей на фильтр с «углеванием», по показателям мутности и цветности. Есть достоверные отличия в некоторых временных точках по показателям перманганатной окисляемости, общего органического углерода. Это свидетельствует о том, что вода в отстойниках, питающих фильтр с «углеванием», более загрязнена органическими и взвешенными веществами. Так как в отстойники вода попадает из одного смесителя и, очевидно, одинакового качества, в отстойниках протекают негативные процессы, это могут быть процессы биообращения, «цветения» воды;

- в определенные моменты, а именно наблюдаемый 21.04.23, из отстойников фильтра с «углеванием» происходит массовый выброс органических и взвешенных веществ. Вероятно, при изменении характеристик потока (линейной скорости) со дна отстойника поднимается «муть» и переносится в фильтр. Это может происходить, например, при отключении соседних отстойников на очистку;

- по связанному хлору вода, поступающая на фильтр без «углевания», достоверно не отличается от воды, поступающей на фильтр с «углеванием». Это вполне объяснимо, так как связанный хлор остается в растворимом состоянии и в отстойниках не переходит в осадок;

- поскольку по связанному хлору вода, выходящая с фильтра без «углевания», достоверно ни в одной временной точке не отличается от воды, выходящей с фильтра с «углеванием», это свидетельствует об отсутствии влияния «углевания» на остаточный связанный хлор. Следовательно, при дозе 5 мг/л порошкообразного угля марки БАУ-А не происходит влияния на содержание остаточного суммарного хлора, а значит, не требуется повторного хлорирования;

– при сравнении показателей мутности, цветности, перманганатной окисляемости, общего органического углерода в выходных параметрах фильтров – достоверные результаты различий (т.е., положительного влияния «углевания») получены не во всех точках. При небольшой степени загрязнения воды влияние «углевания» не заметно. Положительное влияние «углевания» отчетливо проявляется при сильном загрязнении воды. В связи с вышесказанным провели оценку результатов по разнице между начальным (до фильтра) и конечным (после фильтра) значениями, т.е. оценили «съем» фильтром загрязняющих веществ. Такую статистическую обработку результатов провели для показателей цветности, перманганатной окисляемости и общего органического углерода, так как именно эти показатели в большей степени «ответственны» за содержание органических веществ;

– фильтр с «углеванием» достоверно «снимает» больше органических веществ, чем фильтр без «углевания». Достоверность различий обнаружена при сравнении цветности, общего органического углерода, вспенивания. Разница по перманганатной окисляемости до и после фильтра достоверно не отличается, но нужно отметить, что перманганатная окисляемость является интегрированным показателем и не вполне однозначно определяет именно органические вещества. А такие показатели, как цветность, общий органический углерод, вспенивание, свидетельствуют именно о содержании органических веществ и снижаются фильтром с «углеванием» достоверно больше, чем фильтром без «углевания».

Выводы

На основании полученных результатов на лабораторных макетных исследованиях и опытно-промышленных испытаниях можно заключить, что применение метода «углевания» в периоды резкого ухудшения качества исходной воды по органическим и биологическим загрязнениям позволяет снять проблему. Но для внедрения данной технологии необходимо проведение как лабораторных исследований, так и опытно-промышленных испытаний для конкретной станции очистки. Данные исследования необходимы для подбора как марки порошкообразного активного угля, так и оптимальной дозы угольной пульпы.

Список литературы / References

- [1] Румянцев В. А., Крюков А. Н., Поздняков Ш. Р., Жуковский А. В. Цианобактериальное «цветение» воды – источник проблем природопользования и стимул инноваций России, *Среда обитания*, 2011, 2, 222–227. [Rumyantsev V. A., Kryukov A. N., Pozdnyakov S. R., Zhukovsky A. V. Cyanobacterial «flowering» of water – a source of environmental management problems and an incentive for innovation in Russia, *Habitat*, 2011, 2, 222–227 (in Rus.).]
- [2] Пимнева Л. А., Загорская А. А. Использование активированного угля для интенсификации процессов очистки природных вод тюменского региона, *Современные проблемы науки и образования*, 2014, 6, 266. [Pimneva L. A., Zagorskaya A. A. The use of activated carbon for the intensification of natural water purification processes in the Tyumen region, *Modern problems of science and education*, 2014, 6, 266 (in Rus.).]
- [3] Феофанов Ю. А. Проблемы и задачи в сфере обеспечения населения питьевой водой, *Вода и экология: проблемы и решения*, 1999, 1, 4–7. [Feofanov Yu. A. Problems and tasks in the field

of providing drinking water to the population, *Water and ecology: problems and solutions*, 1999, 1, 4–7 (in Rus.)).

[4] Николаева Т. А., Плетникова И. П. Гигиеническая оценка существующей технологии очистки питьевой воды и некоторые пути ее улучшения, *Gig Sanit*, 1975, 7, 29–33. [Nikolaeva T. A., Pletnikova I. P. Hygienic assessment of the existing drinking water purification technology and some ways to improve it, *Gig Sanit*, 1975, 7, 29–33 (in Rus.)].

[5] Clark R. M., Lykins B. W. Jr. *Granular Activated Carbon: Design, Operation and Cost*, Boca Raton, Lewis Publishers, 1989, 342.

[6] Шевелев Ф. А., Орлов Г. А. *Водоснабжение больших городов зарубежных стран*, М.: Стройиздат, 1987, 347. [Shevelev F. A., Orlov G. A. *Water supply of large cities of foreign countries*, Moscow, Stroyizdat, 1987, 347 (in Rus.)].

[7] Кульский А. Л. *Теоретические основы и технология кондиционирования воды*, Киев: Наукова думка, 1971, 499 [Kulsky A. L. *Theoretical foundations and technology of water conditioning*, Kiev, Naukova dumka, 1971, 499 (in Rus.)].

[8] Шенфельд Р., Фишер Ш., Райзер Ян-П. Способ и установка для обработки и/или очистки воды. Патент России № 2745515. 2021. [Schoenfeld P., Fischer S., Reiser Jan-P. Method and installation for water treatment and/or purification. Russian Patent No. 2745515. 2021 (in Rus.)].

[9] Солюшн В. У. Способ очистки воды. Патент России № 2523480. 2014. [Solution V. U. Method of water purification. Russian Patent No. 2523480. 2014 (in Rus.)].

[10] Тарасевич А. В. Способ очистки воды и устройство для его осуществления. Патент России № 2502680. 2013. [Tarasevich A. V. A method of water purification and a device for its implementation. Russian Patent No. 2502680. 2013 (in Rus.)].

[11] Войтов Е. Л., Сколубович Ю. Л. Станция водоподготовки. Патент России № 2328454. 2008. [Voitov E. L., Skolubovich Y. L. Water treatment plant. Russian Patent No. 2328454. 2008 (in Rus.)].

[12] Лю Л., Сюй Ж., Не Ч., Дун Ц., Мин Ю., Дэн Л. Система и способ очистки сточных вод с использованием порошкового активированного угля. Патент России № 2636497. 2017. [Liu L., Xu J., Ne C., Dong C., Ming Yu., Deng L. Wastewater treatment system and method using powdered activated carbon. Russian Patent No. 2636497. 2017 (in Rus.)].

[13] Федорова О. А., Кулакова И. И., Сотникова Ю. А. *Методы оптической спектроскопии*, М.: МГУ, 2015, 117 [Fedorova O. A., Kulakova I. I., Sotnikova Yu. A. *Methods of optical spectroscopy*, Moscow, Moscow State University, 2015, 117 (in Rus.)].

[14] ГОСТ Р 52991–2008 / ISO 8245:1999. Вода. Методы определения содержания общего и растворенного органического углерода. Дата введения 2010–01–01.

[15] ГОСТ Р 55684–2013 / ISO 8467:1993. Вода питьевая. Метод определения перманганатной окисляемости. Дата введения 2015–01–01.

[16] ГОСТ 31868–2012 / ISO 7887:2011. Вода. Методы определения цветности. Дата введения 2014–01–01.

[17] ГОСТ 31957–2012 / ISO 9963–2:1994. Вода. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов. Дата введения 2014–01–01.

EDN: LNAQTE

УДК 678.043.8:678.742.2

Influence of Nano-Sized Metal Oxides and Mercaptobenzthiazole on the Properties and Structure of Ultra-High Molecular Polyethylene

Andrey P. Vasilev,
Sakhayana N. Danilova, Afanasiy A. Dyakonov,
Anastasiya V. Okoneshnikova and Igor S. Makarov*
*North-Easter Federal University
Yakutsk, Russian Federation*

Received 03.11.2023, received in revised form 13.01.2024, accepted 16.02.2024

Abstract. In this paper presents the results of a study of the influence of combined fillers (2-mercaptobenzthiazole (MBT) and nano-sized oxides: ZrO_2 , WO_3 , ZnO and CuO) on the structural, thermal, mechanical and tribological properties of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE). Composites based on UHMWPE with binary fillers were obtained by hot pressing. A study of the mechanical properties of polymer composite materials showed an increase in tensile strength and elongation at break by 43–50 % and 26–27 % compared to the initial UHMWPE. The compressive stress and Shore D hardness of the composites increased by 41 % and 11–15 %. Microscopic studies of composites showed the formation of spherulite formations in the supramolecular structure, and the density increases in all samples with the introduction of fillers. Thermodynamic studies have shown that the enthalpy of melting and the degree of crystallinity for composites of the composition UHMWPE/MBT/ ZrO_2 and UHMWPE/MBT/ WO_3 are higher compared to UHMWPE/MBT/ CuO and UHMWPE/MBT/ ZnO . Tribological tests have shown an improvement in the wear resistance of UHMWPE/MBT/ CuO by 4 times compared to the unfilled polymer matrix while maintaining a low coefficient of friction. A study of the worn surface of composites showed the formation of secondary structures that reduce fatigue and abrasive wear, which explains the increase in wear resistance. The developed composites based on UHMWPE filled with MBT and nanooxides can find application in technology and various equipment due to their improved properties.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene, nanooxides, 2-mercaptobenzthiazole, polymer composite materials, wear resistance.

Acknowledgements. The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 22–73–00076, <https://rscf.ru/project/22–73–00076/>.



Влияние наноразмерных оксидов металлов и 2-меркаптобензтиазола на свойства и структуру сверхвысокомолекулярного полиэтилена

**А. П. Васильев, С. Н. Данилова, А. А. Дьяконов,
А. В. Оконешникова, И. С. Макаров**
*Северо-Восточный федеральный университет
имени М. К. Аммосова
Российская Федерация, Якутск*

Аннотация. В работе приведены результаты исследования влияния комбинированных наполнителей (2-меркаптобензтиазол (МБТ) и наноразмерных оксидов: ZrO_2 , WO_3 , ZnO и CuO) на служебные свойства и структуру сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Композиты на основе СВМПЭ с бинарными наполнителями получены методом горячего прессования. Исследование физико-механических характеристик полимерных композиционных материалов показало повышение прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве на 43–50 % и 26–27 % соответственно по сравнению с исходным СВМПЭ. Напряжение при сжатии и твердость по Шору D композитов повысились на 41 % и 11–15 % соответственно. Микроскопические исследования композитов показали формирование сферолитных образований в надмолекулярной структуре, а плотность увеличивается во всех образцах при введении наполнителей. Термодинамические исследования показали, что энтальпия плавления и степень кристалличности композитов состава СВМПЭ/МБТ/ ZrO_2 и СВМПЭ/МБТ/ WO_3 выше по сравнению с СВМПЭ/МБТ/ CuO и СВМПЭ/МБТ/ ZnO . Трибологические исследования выявили улучшение износостойкости СВМПЭ/МБТ/ CuO в 4 раза по сравнению с ненаполненным полимером при сохранении низкого коэффициента трения. Исследование поверхности трения композитов показало формирование вторичных структур, снижающих усталостное и абразивное изнашивание, что объясняет повышение износостойкости. Разработанные композиты на основе СВМПЭ, наполненного МБТ и оксидами металлов, могут найти применение в технике и различных оборудовании благодаря улучшенным свойствам.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, наноксиды, 2-меркаптобензтиазол, полимерные композиционные материалы, износостойкость.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–73–00076, <https://rscf.ru/project/22–73–00076/>.

Цитирование: Васильев А. П. Влияние наноразмерных оксидов металлов и 2-меркаптобензтиазола на свойства и структуру сверхвысокомолекулярного полиэтилена / А. П. Васильев, С. Н. Данилова, А. А. Дьяконов, А. В. Оконешникова, И. С. Макаров // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(2). С. 162–174. EDN: LNAQTE

Введение

В настоящее время трение и износ широко распространены в аэрокосмической промышленности, машиностроении, транспорте и в повседневной жизни. При развитии экономики

и технологий трение и износ вызывают дополнительные потери энергии и выбросы большого количества парниковых газов, вызывая серьезное загрязнение окружающей среды. Углубленные исследования в области трибологии позволили добиться низкого коэффициента трения и низкого уровня износа в механических системах [1]. Тем не менее поиск эффективных способов снижения трения и износа по-прежнему остается актуальной задачей. Одним из способов является использование самосмазывающихся полимерных композиционных материалов (ПКМ), благодаря чему устраняется необходимость в использовании смазочных масел и сложных конструкций в узлах трения.

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) является одним из перспективных самосмазывающихся полимеров, из-за его превосходных трибологических свойств, таких как низкий коэффициент трения, стойкость к износу и истиранию, к коррозии, ударопрочность, высокая ударная вязкость, водопоглощение и биосовместимость [2, 3]. Несмотря на расширение применения ПКМ на основе СВМПЭ, низкая поверхностная энергия, неполярность и инертность полимера оказывают неблагоприятный эффект при разработке высокоэффективных материалов нового поколения [4, 5]. В композиционных материалах наполнители ответственны за формирование физико-механических характеристик и придают материалу специфические свойства. При этом эксплуатационные характеристики ПКМ в основном зависят от свойств компонентов, степени наполнения полимера и, что более важно, от степени адгезионного взаимодействия на границе раздела между наполнителем и полимерной матрицей [6]. Адгезия между ними может быть усилена за счет физико-химических взаимодействий и механического сцепления либо того и другого. Физико-химический вклад в адгезию включает химическую связь, межмолекулярные взаимодействия и физическую адгезию. В то время как механическое сцепление осуществляется, когда полимерная матрица проникает в дефекты и неровности поверхности и механически фиксируется в нем [7]. Физико-химическое взаимодействие можно изменить путем включения соответствующих функциональных групп на поверхность наполнителя. Во многих случаях как физико-химическое, так и механическое сцепление работают одновременно, увеличивая степень межфазной адгезии между наполнителем и полимерной матрицей. Таким образом, наполнители должны прочно взаимодействовать с полимерной матрицей, тем самым усиливая деформационно-прочностные свойства. Исследования показали, что применение различных методов модификации поверхности наполнителя приводит к усилению как адгезионного взаимодействия на границе раздела фаз за счет механического сцепления, так и физико-химических взаимодействий [8, 9]. Благодаря этому улучшаются физико-механические и трибологические свойства композитов. Одним из способов, с целью повышения межфазного взаимодействия, является применение комбинации различных видов наполнителей, вводимых в СВМПЭ [10–12]. Из представленных данных видно, что наиболее перспективным и экономически целесообразным для дальнейшего улучшения свойств полимерных композитов на его основе является использование модифицированных наполнителей.

В данной работе для создания высокопрочных композиционных материалов на основе СВМПЭ предлагается применение гетероциклических реакционноспособных соединений, в частности 2-меркаптобензотиазол, для усиления межфазного взаимодействия между СВМПЭ и неорганическими наполнителями (наноразмерными оксидами металлов). Органическое соединение 2-меркаптобензотиазол используется в качестве ускорителя вулканизации благодаря

своим химическим свойствам инициировать реакции с радикальным механизмом. Из-за своей высокой химической активности потенциально может повысить его совместимость с неорганическими наполнителями. Тем самым можно получить композиционные материалы с улучшенным комплексом физико-механических и трибологических свойств для применения в различных механизмах и узлах трения техники и технологического оборудования.

Цель работы – исследование влияния гибридных наполнителей, включающих 2-меркапто-бензтиазол и наноразмерные оксиды, на свойства и структуру СВМПЭ.

Материалы и методы исследования

В качестве полимерной матрицы использовали сверхвысокомолекулярный полиэтилен марки GUR-4022 (Celanese, Германия) с молекулярной массой 5,3 млн г/моль, плотностью 0,93 г/см³ и средним размером частиц 145 мкм. Наполнителями служили наноразмерные оксиды: диоксид циркония (ZrO₂) порошок с размерами частиц 40–75 нм, с чистотой продукта 99,75 % (Plasmoterm LLC, Россия); оксид вольфрама (WO₃) порошок с размерами 50 нм, с чистотой продукта 99,9 %; оксид меди (CuO) порошок с размерами 50 нм; оксид цинка (ZnO) порошок с размерами 40 нм приобретены в ИП Хисамутдинов Р. А.; органический модификатор – 2-меркапто-бензтиазол (МБТ) C₇H₅NS₂ (ГОСТ 739–74, Россия).

В табл. 1 приведены составы и массовое содержание наполнителей. Образцы СВМПЭ и ПКМ для исследований получали методом горячего прессования: прессование проводили на гидравлическом прессе ПКМВ-100 («Импульс», Россия) при температуре 175 °С и давлении 10 МПа в течение 20 мин с последующим охлаждением до 80 °С под давлением. Изготавливали цилиндрические образцы с диаметром 10,0 ± 0,05 мм и высотой 20,0 ± 1,0 мм. Предварительно проводили ультразвуковую обработку в УЗ-диспергаторе ИЛ100–6/4 (ИН-ЛАБ-Ультразвук, Россия) в течение 5 мин.

Проведены физико-механические и трибологические испытания, микроскопические и спектроскопические исследования СВМПЭ и ПКМ. Трибологические характеристики (коэффициент трения, скорость массового изнашивания) определяли при испытаниях по общепринятым методикам на универсальном высокотемпературном трибометре CETR UMT-3 (США). Схема трения «палец-диск», нагрузка 150 Н, скорость 1,9 м/с, время испытания 3 ч. Деформационно-прочностные свойства ПКМ на основе СВМПЭ определяли по ГОСТ 11262–2017 на испытательной машине «Authograph AGS-J» Shimadzu (количество образцов на одно

Таблица 1. Состав и массовое содержание наполнителей

Table 1. Composition and mass content of fillers

№ композита	Обозначение	СВМПЭ	МБТ	ZrO ₂	WO ₃	CuO	ZnO
0	исходный СВМПЭ	100	-	-	-	-	-
1	СВМПЭ/МБТ/ZrO ₂	98	1	1	-	-	-
2	СВМПЭ/МБТ/WO ₃	98	1	-	1	-	-
3	СВМПЭ/МБТ/CuO	98	1	-	-	1	-
4	СВМПЭ/МБТ/ZnO	98	1	-	-	-	1

испытание – 10). Испытания на определение напряжения при сжатии при установленной относительной деформации ($x, \%$) проводили в соответствии с ГОСТ 4651–2014. Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания согласно ГОСТ 15139–69. Твердость СВМПЭ И ПКМ измеряли твердомером ТВР-D (Восток-7, Россия) с аналоговым индикатором для измерения твёрдости по шкале Шора тип D согласно ГОСТ 24621–2015 (ISO 868–2003). ИК-спектры получали на спектрометре с Фурье-преобразованием Varian 7000 FT-IR (Varian, США). Спектры получали с помощью приставки НПВО, в диапазоне $500\text{--}4000\text{ см}^{-1}$. На сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Jeol JSM-7800F (JEOL, Япония) исследовали сколы и поверхности трения ПКМ. Исследование образцов методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) проводили на приборе DSC 204 F1 Phoenix (NETZSCH, Германия).

Результаты и обсуждение

Известно, что введение МБТ и наноразмерных оксидов металлов в СВМПЭ приводит к улучшению деформационно-прочностных свойств, что представлено в следующих работах [10, 13, 14]. Исходя из этих работ использовали МБТ в качестве функциональной добавки, которую вводили вместе с наноразмерными оксидами: ZrO_2 , WO_3 , CuO и ZnO . На рис. 1 приведены результаты исследования физико-механических свойств ПКМ в зависимости от состава наполнителей.

Как видно из рис. 1, во всех исследованных композитах выявлено повышение прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве по сравнению с ненаполненным полимером. Наибольшее значение прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве зафиксировано в композитах состава СВМПЭ/МБТ/ WO_3 и СВМПЭ/МБТ/ ZnO , что на 43–50 % и 26–27 % соответственно выше исходного полимера.

Физико-механические исследования ПКМ показали, что напряжение при сжатии при установленной относительной деформации (5 %) композитов СВМПЭ/МБТ/ CuO и СВМПЭ/МБТ/ ZnO увеличилось на 41 %, в случае СВМПЭ/МБТ/ ZrO_2 и СВМПЭ/МБТ/ WO_3 – на 33 % относительно исходного полимера. Твердость по Шору D во всех композитах повысилась на 11–15 % по сравнению с исходным СВМПЭ. Улучшение приведенных свойств свидетельствует об усилении полимерной матрицы при введении бинарных наполнителей и согласуется с результатами известных работ [2, 15, 16]. Таким образом, повышение твердости ПКМ можно объяснить наличием наноразмерных оксидов металлов в полимерной матрице СВМПЭ, а также лучшим сцеплением гибридных наполнителей с полимером, что приводит к улучшению несущей способности.

Образцы для исследования надмолекулярной структуры ПКМ были получены по хрупкому разрушению (в криогенных условиях) и исследованы с помощью сканирующей электронной микроскопии, результаты представлены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что во всех образцах ПКМ наблюдается формирование сферолитных образований в надмолекулярной структуре. Из анализа литературных данных известно, что наночастицы выступают центрами кристаллизации полимера, при одинаковых условиях переработки полимера, размеры сферолитов зависят от природы и содержания наполнителей [17, 18]. Визуальная оценка надмолекулярной структуры ПКМ показала, что составы СВМПЭ/МБТ/

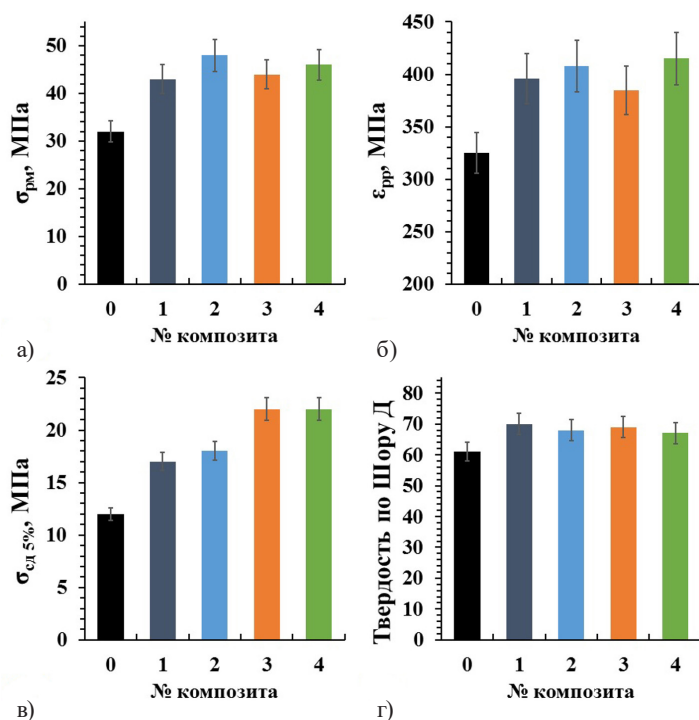


Рис. 1. Физико-механические характеристики СВМПЭ и ПКМ: а) прочность при растяжении; б) относительное удлинение при разрыве; в) напряжение при сжатии при установленной относительной деформации (5,%); г) твердость по Шору D

Fig. 1. Mechanical characteristics of UHMWPE and PCM: a) tensile strength; b) elongation at break; c) compressive stress at a specified relative strain (5,%); d) Shore D hardness

CuO и СВМПЭ/МБТ/ZnO характеризуются малыми по размеру сферолитами. В то же время композиты СВМПЭ/МБТ/ZrO₂ и СВМПЭ/МБТ/WO₃ отличаются большими по размеру сферолитами с относительно правильной формой. Очевидно, что формирование сферолитов в надмолекулярной структуре приводит к повышению физико-механических свойств ПКМ.

Методом ДСК определили температуру и энтальпию плавления, а также рассчитали степень кристалличности исходного СВМПЭ и ПКМ. В табл. 2 приведены результаты исследования термодинамических параметров и плотности ПТФЭ и ПКМ в зависимости от состава наполнителей.

Из табл. 2 видно, что как энтальпия плавления, так и температура плавления ПКМ на основе СВМПЭ немного снижаются при добавлении наполнителей. Степень кристалличности ПКМ снизилась на 3–4 % относительно исходного СВМПЭ. Это можно объяснить тем, что гетерогенное зародышеобразование с гибридными наполнителями может препятствовать гомогенному зародышеобразованию как у исходного СВМПЭ [19]. Между тем добавление наполнителей может увеличить толщину кристаллических образований в СВМПЭ. Сочетание обоих вышеуказанных факторов вполне может снизить энтальпию плавления полимерных нанокомпозитов, соответственно, наблюдается уменьшение степени кристалличности. Стоит отметить, что между ПКМ температура плавления остается примерно постоянной и не зависит от используемого наноразмерного оксида металла. В то же время энтальпия

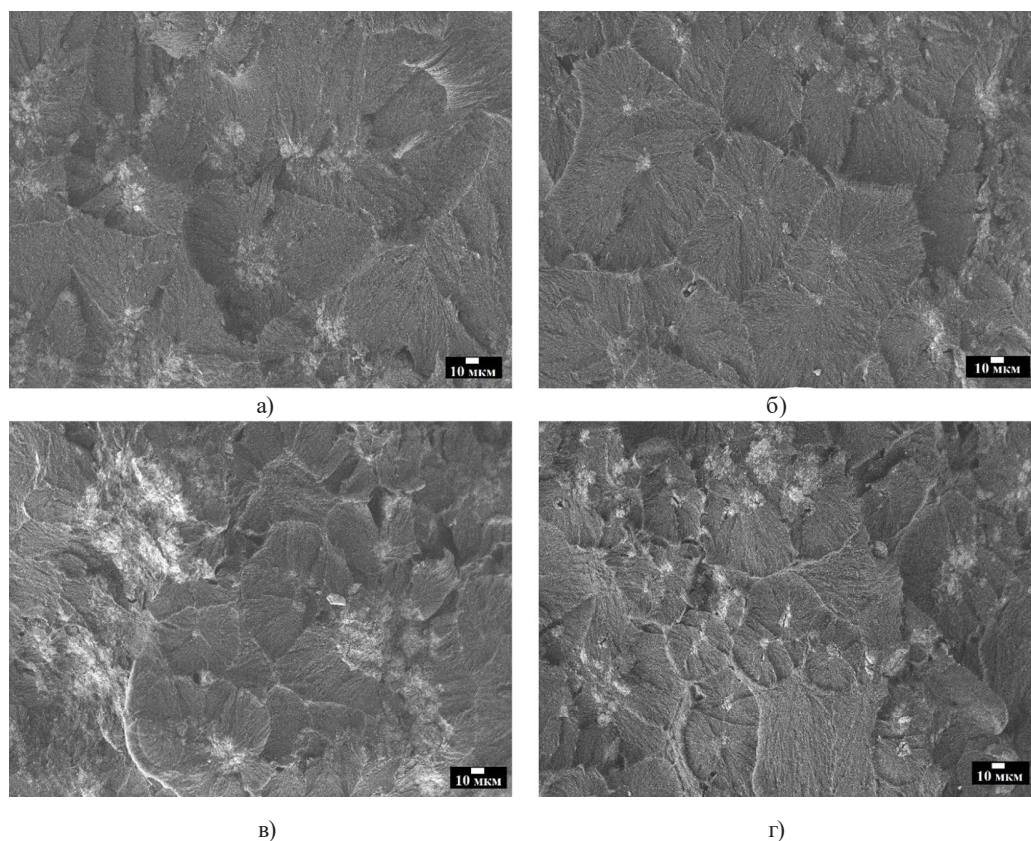


Рис. 2. СЭМ-изображения надмолекулярной структуры ПКМ: а) СВМПЭ/МБТ/ ZrO_2 ; б) СВМПЭ/МБТ/ WO_3 ; в) СВМПЭ/МБТ/ CuO ; г) СВМПЭ/МБТ/ ZnO

Fig. 2. SEM images of the supramolecular structure of PCM: а) UHMWPE/MBT/ ZrO_2 ; б) UHMWPE/MBT/ WO_3 ; в) UHMWPE/MBT/ CuO ; г) UHMWPE/MBT/ ZnO

Таблица 2. Зависимость термодинамических параметров и плотности исходного СВМПЭ и ПКМ от состава наполнителей

Table 2. Dependence of thermodynamic parameters and density of initial UHMWPE and PCM on composition of fillers

№	Образец	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta H_{\text{пл}}, \text{Дж/г}$	$\alpha, \%$	$\rho, \text{г/см}^3$
0	исходный СВМПЭ	141,3	168,2	57,4	0,93
1	СВМПЭ/МБТ/ ZrO_2	139,4	159,0	54,2	0,95
2	СВМПЭ/МБТ/ WO_3	139,3	159,7	54,2	0,95
3	СВМПЭ/МБТ/ CuO	139,1	155,6	53,1	0,95
4	СВМПЭ/МБТ/ ZnO	139,3	156,0	53,2	0,94

Примечание: $T_{\text{пл}}$ – температура плавления; $\Delta H_{\text{пл}}$ – энтальпия плавления; α – калориметрическая степень кристалличности; ρ – плотность.

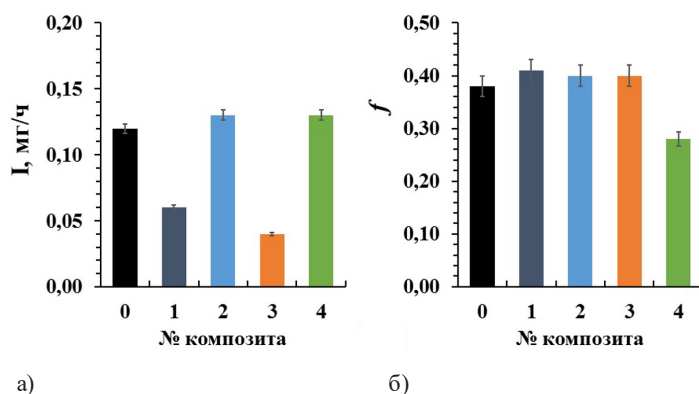


Рис. 3. Трибологические характеристики СВМПЭ и ПКМ: а) скорость массового износа; б) коэффициент трения

Fig. 3. Tribological characteristics of UHMWPE and PCM: a) mass wear rate; b) coefficient of friction

плавления и степень кристалличности для композитов состава СВМПЭ/МБТ/ ZrO_2 и СВМПЭ/МБТ/ WO_3 выше по сравнению с СВМПЭ/МБТ/ CuO и СВМПЭ/МБТ/ ZnO . Плотность ПКМ увеличивается при введении наполнителей на 1,0–2,1 %, что можно объяснить получением монолитных образцов с более высокой плотностью наноксидов и усилением межфазного взаимодействия [20].

На рис. 3 представлены результаты трибологических исследований исходного СВМПЭ и ПКМ в условиях сухого трения. Известно, что сверхвысокомолекулярный полиэтилен характеризуется низким коэффициентом трения благодаря своим самосмазывающимся свойствам [21]. В связи с этим при разработке ПКМ на основе СВМПЭ необходимо снижать коэффициент трения или поддерживать данное значение на его уровне. Коэффициент трения для композита СВМПЭ/МБТ/ ZnO ниже на 26 % относительно исходного полимера (рис. 3б). В остальных композитах значение коэффициента трения сохраняется на уровне исходного полимера.

Как видно из рис. 3а, износостойкость ПКМ состава СВМПЭ/МБТ/ ZrO_2 ниже в 2 раза относительно исходного полимера. В случае СВМПЭ/МБТ/ WO_3 и СВМПЭ/МБТ/ ZnO скорость массового изнашивания остается на уровне ненаполненного СВМПЭ. Наименьшее значение скорости массового изнашивания получено для композиции СВМПЭ/МБТ/ CuO , что в 4 раза ниже исходного полимера при сохранении низкого коэффициента трения.

С целью выяснения изменений трибологических свойств ПКМ проведено ИК-спектроскопическое изучение образцов до и после трения, результаты представлены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что основные сильные полосы в ПКМ до трения в области 2847, 2915, 1462 и $\sim 719 \text{ см}^{-1}$ [10], относящиеся к исходному СВМПЭ, сохраняются после трения во всех исследованных образцах. На поверхностях до и после трения в полимерных композитах пики в области $\sim 1006\text{--}1590 \text{ см}^{-1}$ обусловлены наличием наполнителя МБТ (меркаптогруппа) [22]. В ИК-спектрах композитов СВМПЭ/МБТ/ CuO и СВМПЭ/МБТ/ ZnO после трения зарегистрировано наличие полос поглощения в области 3200–3600 см^{-1} и 1596–1651 см^{-1} , которые свидетельствуют о протекании трибоокислительных реакций при трении с образованием карбонильных и карбоксильных групп. В то же время в композитах СВМПЭ/МБТ/ ZrO_2 и СВМПЭ/



Рис. 4. ИК-спектры ПКМ до и после трения: а) СВМПЭ/МБТ/ ZrO_2 ; б) СВМПЭ/МБТ/ WO_3 ; в) СВМПЭ/МБТ/ CuO ; г) СВМПЭ/МБТ/ ZnO

Fig. 4. IR spectra of PCM before and after friction: a) UHMWPE/MBT/ZrO₂; b) UHMWPE/MBT/WO₃; c) UHMWPE/MBT/CuO; d) UHMWPE/MBT/ZnO

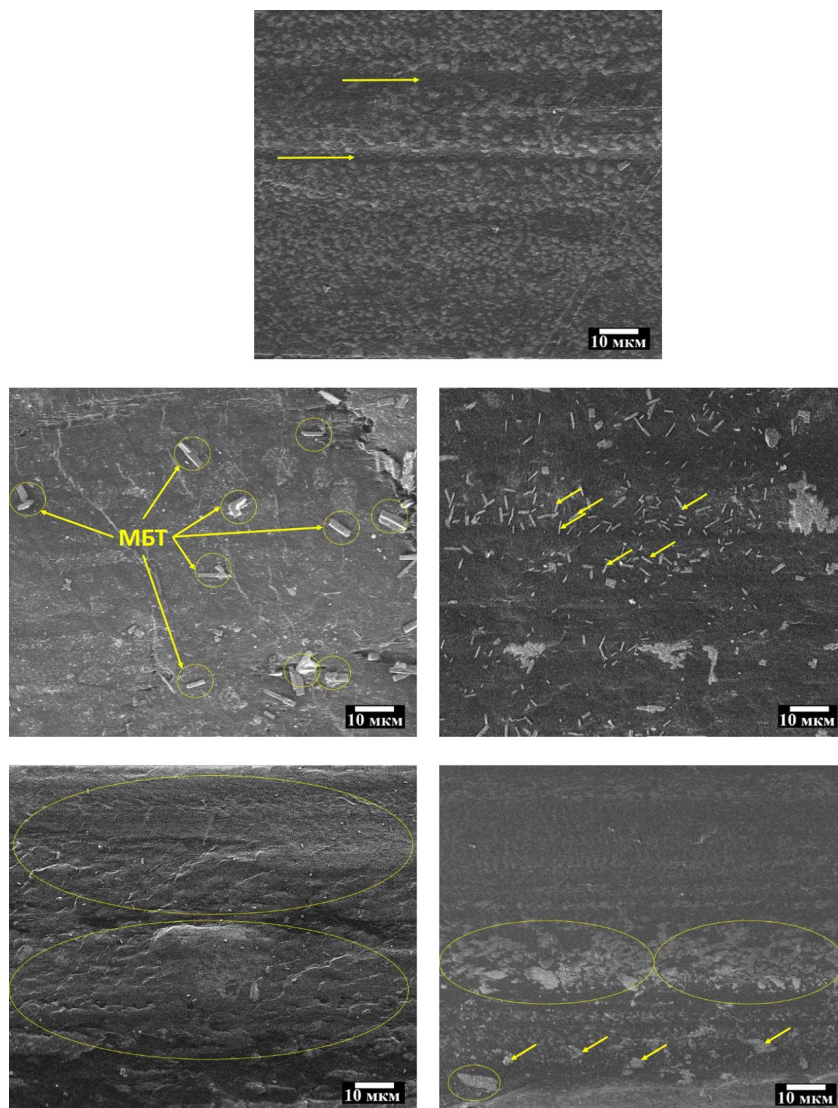


Рис. 5. СЭМ-изображения поверхности трения ПКМ: а) СВМПЭ/МБТ/ ZrO_2 ; б) СВМПЭ/МБТ/ WO_3 ; в) СВМПЭ/МБТ/ CuO ; г) СВМПЭ/МБТ/ ZnO

Fig. 5. SEM images of the worn surface of PCM: a) UHMWPE/MBT/ ZrO_2 ; b) UHMWPE/MBT/ WO_3 ; c) UHMWPE/MBT/ CuO ; d) UHMWPE/MBT/ ZnO

МБТ/ WO_3 не наблюдается появление пиков, свидетельствующих о протекании окислительных реакций в процессе трения.

На рис. 5 приведены результаты исследования поверхности трения исходного СВМПЭ и ПКМ в зависимости от состава наполнителей методом сканирующей электронной микроскопии.

Из рис. 5а видно, что на поверхности трения исходного СВМПЭ наблюдаются бороздки по направлению скольжения и расслоения окисленных мелких частиц полимера, что свидетельствует об усталостном изнашивании полимера [23]. Далее видно, что поверхность трения ПКМ отличается от поверхности трения исходного СВМПЭ. В композите состава СВМПЭ/

МБТ/ ZrO_2 выявлены крупные частицы МБТ, которые защищают поверхностный слой материала от изнашивания, в то же время для композита СВМПЭ/МБТ/ WO_3 структурные элементы МБТ имеют малые размеры и скорость массового изнашивания остается на уровне ненаполненного полимера. Стоит отметить, что частицы МБТ на поверхности трения ПКМ защищают материал от окислительных процессов, что согласуется с ИК-спектроскопией. Поверхность трения СВМПЭ/МБТ/ CuO характеризуется образованием более гладкого и практически по всей поверхности покрытого слоя вторичной структуры, тем самым для данного композита наблюдается высокая износостойкость. Из рис. 5г видно, что поверхность трения СВМПЭ/МБТ/ ZnO характеризуется образованием с расположением островных вторичных структур. Износостойкость данного композита остается в значениях исходного СВМПЭ, возможно, за счет дискретного характера вторичных структур происходит снижение коэффициента трения.

Заключение

Разработаны полимерные композиционные материалы на основе СВМПЭ, наполненного комбинированными наполнителями, состоящими из МБТ и наноразмерных оксидов металлов с улучшенными эксплуатационными свойствами. Составы СВМПЭ/МБТ/ WO_3 и СВМПЭ/МБТ/ ZnO характеризуются повышенными деформационно-прочностными свойствами, а композиты СВМПЭ/МБТ/ ZrO_2 и СВМПЭ/МБТ/ CuO характеризуются повышенной износостойкостью. Напряжение при сжатии при установленной относительной деформации (5 %) композитов СВМПЭ/МБТ/ CuO и СВМПЭ/МБТ/ ZnO увеличилось на 41 %, а твердость по Шору D всех композитов повысилась на 11–15 % по сравнению с исходным СВМПЭ. Термодинамические исследования показали некоторое снижение энтальпии плавления и микроскопические образования сферолитов в надмолекулярной структуре ПКМ, что свидетельствует об усилении межфазных взаимодействий бинарных наполнителей с полимерной матрицей. Износостойкость композитов СВМПЭ/МБТ/ ZrO_2 и СВМПЭ/МБТ/ CuO выше в 4 раза по сравнению с исходным СВМПЭ. Исследование поверхности трения композитов методом СЭМ показали, что в случае СВМПЭ/МБТ/ ZrO_2 и СВМПЭ/МБТ/ WO_3 на поверхности трения образуются вторичные структуры из частиц МБТ, а в СВМПЭ/МБТ/ CuO формируется гладкий и практически полностью покрытый слой вторичной структуры, в СВМПЭ/МБТ/ ZnO такой слой имеет островной характер распределения. Подытоживая вышеизложенное, можно заключить, что при разработке ПКМ на основе СВМПЭ, наполненного МБТ и оксидами металлов, можно получить нанокомпозиты с улучшенными свойствами для узлов трения техники.

Список литературы / References

- [1] Zhou C., Li Z., Liu S., Zhan T., Li W., Wang J. Layered double hydroxides for tribological application: Recent advances and future prospective. *Applied Clay Science*, 2022, 221, 106466
- [2] Abdul Samad M. Recent advances in uhmwpe/uhmwpe nanocomposite/uhmwpe hybrid nanocomposite polymer coatings for tribological applications: A comprehensive review. *Polymers*, 2021, 13(4), 608
- [3] Васильев А. П., Данилова С. Н., Дьяконов А. А., Охлопкова А. А., Стручкова Т. С. Влияние термически обработанного политетрафторэтилена на триботехнические свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия*

рия: *Техника и технологии*, 2022, 15(7), 850–860 [Vasilev A. P., Danilova S. N., Dyakonov A. A., Okhlopkova A. A., Struchkova T. S. Influence of thermally treated polytetrafluoroethylene on the tribological properties of ultra-high molecular polyethylene. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2022, 15(7), 850–860 (in Rus.)]

[4] Tian Y., Guo L. Adhesion performance of UHMWPE fiber treated with polyethylene wax grafted methyl methacrylate alone or in conjunction with silane coupling agent. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2021, 35(11), 1219–1235

[5] Zec J., Tomić N. Z., Zrilić M., Lević S., Marinković A., Heinemann R. J. Optimization of Al₂O₃ particle modification and UHMWPE fiber oxidation of EVA based hybrid composites: Compatibility, morphological and mechanical properties. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 153, 36–48

[6] Сидорина А. И. Модификация поверхности углеродных армирующих наполнителей для полимерных композиционных материалов электрохимической обработкой (обзор). *Труды ВИАМ*, 2022, 4(110), 61–74 [Sidorina A. I. Modification of the surface of carbon reinforcing fillers for polymer composite materials by electrochemical treatment (review), *Trudy VIAM*, 2022, 4 (110), 61–74 (in Rus.)]

[7] Karger-Kocsis J., Mahmood H., Pegoretti A. Recent advances in fiber/matrix interphase engineering for polymer composites. *Progress in Materials Science*, 2015, 73, 1–43

[8] Wang S., Ma, J., Feng X., Cheng J., Ma X., Zhao Y., Chen L. An effective surface modification of UHMWPE fiber for improving the interfacial adhesion of epoxy resin composites, *Polymer Composites*, 2020, 41(4), 1614–1623

[9] Borisova R. V., Nikiforov L. A., Spiridonov A. M., Okhlopkova T. A., Okhlopkova A. A., Koryakina N. S. The Influence of Brominated UHMWPE on the Tribological Characteristics and Wear of Polymeric Nanocomposites Based on UHMWPE and Nanoparticles, *Journal of Friction and Wear*, 2019, 40(1), 27–32

[10] Дьяконов А. А., Данилова С. Н., Васильев А. П., Охлопкова А. А., Слепцова С. А., Васильева А. А. Исследование влияния серы, дифенилгуанидина и 2-меркаптобензтиазола на физико-механические свойства и структуру сверхвысокомолекулярного полиэтилена, *Перспективные материалы*, 2020, 1, 43–53 [Dyakonov A. A., Danilova S. N., Vasilyev A. P., Okhlopkova A. A., Sleptsova S. A., Vasilyeva A. A. Study of sulfur, diphenylguanidine and 2-mercaptobenzothiazole effect on physical and mechanical properties and structure of ultra-high molecular weight polyethylene, *Perspektivnye Materialy*, 2020, 1, 43–53 (in Rus.)]

[11] Bhusari S. A., Sharma V., Bose S., Basu B. HDPE/UHMWPE hybrid nanocomposites with surface functionalized graphene oxide towards improved strength and cytocompatibility, *Journal of the Royal Society Interface*, 2019, 16(150), 20180273

[12] Azam M. U., Samad M. A. UHMWPE hybrid nanocomposite coating reinforced with nanoclay and carbon nanotubes for tribological applications under water with/without abrasives, *Tribology International*, 2018, 124, 145–155

[13] Дьяконов А. А., Данилова С. Н., Васильев А. П., Охлопкова А. А., Слепцова С. А. Разработка высокопрочных материалов на основе СВМПЭ, модифицированного 2-меркаптобензтиазолом, *Авиационные материалы и технологии*, 2020, 3(60), 10–18

[14] Zavala J. M. D., Gutiérrez H. M. L., Segura-Cárdenas E., Mamidi N., Morales-Avalos R., Villela-Castrejón J., Elías-Zúñiga, A. Manufacture and mechanical properties of knee implants using

SWCNTs/UHMWPE composites. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2021, 120, 104554.

[15] bin Ali A., Mohammed A.S., Merah N. Tribological investigations of UHMWPE nanocomposites reinforced with three different organo-modified clays, 2018, *Polymer Composites*, 39(7), 2224–2231

[16] Sreekanth P.S. R., Kanagaraj S. Assessment of bulk and surface properties of medical grade UHMWPE based nanocomposites using Nanoindentation and microtensile testing, 2013, *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 18, 140–151

[17] Охлопкова А. А., Охлопкова Т. А., Борисова Р. В. Управление процессами структурообразования в полимерных композиционных материалах на основе СВМПЭ, 2015, *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*, 2(78), 73–78

[18] Gai J., Li H. Ultrahigh molecular weight polyethylene/polypropylene/organo-montmorillonite nanocomposites: Phase morphology, rheological, and mechanical properties, *Journal of applied polymer science*, 2007, 106(5), 3023–3032

[19] Gu J., Li N., Tian L., Lv Z., Zhang Q. High thermal conductivity graphite nanoplatelet/UHMWPE nanocomposites, *Rsc Advances*, 2015, 5(46), 36334–36339

[20] Cao Z., Shi G., Yan X., Wang Q. In situ fabrication of CuO/UHMWPE nanocomposites and their tribological performance, *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(36), 47925

[21] Aliyu I. K., Mohammed A. S., Al-Qutub A. Tribological performance of UHMWPE/GNPs nanocomposite coatings for solid lubrication in bearing applications, *Tribology Letters*, 2018, 66, 1–11

[22] Данилова С. Н., Дьяконов А. А., Васильев А. П., Герасимова Ю. С., Охлопкова А. А., Слепцова С. А. Исследование триботехнических свойств сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненного серой, дифенилгуанидином и 2-меркаптобензтиазолом, *Вопросы материаловедения*, 2019, (3), 91–98

[23] Huang G., Zhang T., Chen Y., Yang F., Huang H., Zhao Y. Graphite Fluoride as a Novel Solider Lubricant Additive for Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene Composites with Excellent Tribological Properties, *Lubricants*, 2023, 11(9), 403

Metallurgy and Materials Engineering
Металлургия и материаловедение

EDN: ITXLPA

УДК 621.882

**Development of Wear-Resistant Parts
of High-Manganese Modified 110G13L Brand Steel**

**Shukhrat M. Chorshanbiev^a,
Kamolkhan A. Karimov^a, Shakhnoza R. Adilova^a,
Nodir J. Turakhodjaev^b, Abdulkhamid Erkinjonov^c,
Mehrubon M. Mirmuhamedov^d, Jamshed H. Sharipov^d,
Ziyodullo R. Obidov^{e*} and Khayriddin Komolov^f**

*^aTashkent State Technical University named after I. A. Karimov
Tashkent, Republic of Uzbekistan*

*^bUzbek-Japan Innovation Center of Yors
Tashkent, Republic of Uzbekistan*

*^cAndijan Machine-Building Institute
Andijan, Republic of Uzbekistan*

*^dKhujand National University named after Academician B. Ghafurov
Khujand, Republic of Tajikistan*

*^eInstitute of Chemistry named after V. I. Nikitin NAS of Tajikistan
Dushanbe, Republic of Tajikistan*

*^fTashkent Medical Academy
Tashkent, Republic of Uzbekistan*

Received 15.12.2023, received in revised form 13.01.2024, accepted 14.02.2024

Abstract. The efficient operation of the technological equipment of machinery manufacturing enterprises and heavy industry without distortion depends in many respects on the strength of their details. This requires the study of the process of operation of the details, which are mainly rubbed with each other. These methods are widely used in obtaining high-quality steel castings. The simplest method of processing steel outside the oven is modification. Modified carbon steel is much more economical in properties approaches to leached steel, while modified steel leached by saving and investigation approaches leached steel with valuable and rare additives (Ni, Mo, Ti and other). Modification with alkaline and alkaline-earth metals greatly increases the quality of steel. The quality of steel is positively influenced by nitride-forming modifiers.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: obidovzr@gmail.com

Keywords: modifier, structure, ferrotitan-65, alloy, hardness, melting, steel, detail, absorbency, temperature.

Citation: Chorshanbiev Sh.M., Karimov K. A., Adilova Sh.R., Turakhodjaev N. J., Erkinjonov A., Mirmuhamedov M. M., Sharipov J. H., Obidov Z. R., Komolov Kh. Development of wear-resistant parts of high-manganese modified 110G13L brand steel. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(2), 175–185. EDN: ITXLPA



Разработка износостойких деталей из высокомарганцевой модифицированной стали 110Г13Л

Ш. М. Чоршанбиев^а, К. А. Каримов^а, Ш. Р. Адилова^а,
Н. Д. Тураходжаев^б, А. Еркинджонов^в, М. М. Мирмухамедов^г,
Дж. Х. Шарипов^г, З. Р. Обидов^д, Х. Комолов^е

^аТашкентский государственный технический университет
им. И. Каримова

Республика Узбекистан, Ташкент

^бУзбекско-Японский инновационный центр YORS

Республика Узбекистан, Ташкент

^вАндижанский машиностроительный институт

Республика Узбекистан, Андижан

^гХуджандский государственный университет

им. акад. Б. Гафурова

Республика Таджикистан, Худжанд

^дИнститут химии им. В. И. Никитина НАН Таджикистана

Республика Таджикистан, Душанбе

^еТашкентская медицинская академия

Республика Узбекистан, Ташкент

Аннотация. Эффективная работа технологического оборудования для производства машин и тяжелой промышленности без искажений зависит во многих отношениях от прочности их деталей. Это требует изучения процесса работы деталей, между которыми происходит трение. Существуют методы, которые широко используются при получении высококачественных стальных отливок. Самый простой метод обработки стали за пределами духовки – модификация. Модифицированная углеродистая сталь по своим свойствам значительно экономичнее выщелоченной стали, тогда как модифицированная сталь, выщелачиваемая методом консервации и исследования, выщелачивает сталь с ценными и редкими добавками (Ni, Mo, Ti и др.). Модификация с щелочными и щелочноземельными металлами значительно увеличивает качество стали. На качество стали положительно влияют нитридные модификаторы.

Ключевые слова: модификатор, структура, ферротитан-65, сплав, твердость, плавление, сталь, деталь, впитывание, температура.

Цитирование: Чоршанбиев Ш. М. Разработка износостойких деталей из высокомарганцевой модифицированной стали 110Г13Л / Ш. М. Чоршанбиев, К. А. Каримов, Ш. Р. Адилова и др. // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(2). С. 175–185. EDN: ITXLPA

Introduction

Despite all the research [1–5], scientific research [6–9] and experimental work [10–13] carried out by World Scientists, several disadvantages are observed in the wear resistance of steel brand 110G13L.

Mechanical engineering consists of a number of technological processes in manufacturing enterprises, forming a kind of technological chain. This chain is closely related to the working unit of each unit and the working quality of the machines before it. Taking this issue into account, it can be concluded that the influence of technological chain equipment on the quality indicators of machinery manufacturing enterprises and heavy industrial products is great.

Therefore, professor scientists of Tashkent State Technical University, together with the scientific researchers and mature and experienced specialists of the Joint Stock Company “Almalyk mining and metallurgical combine” and its affiliated Central repair mechanical plant, to improve the strength of steel parts, to increase the operational properties of cast products based on the selection of modifiers or the selection of other modifiers to form a quality structure, and to obtain quality castings from parts with high strength a number of measures have been taken to increase.

In the period of liquefaction of steels using electric arc furnaces at the enterprises of our republic, measures are being taken to obtain quality casting products. In this regard, it is becoming important to increase the priority of research on the improvement of technologies that provide resource and energy savings in the liquefaction of steels, which is widely used in the industry.

Today, machine-building is the main consumer of metals produced in our country. In the machine-tool industry, the automobile and aviation industry, in electronics and radio engineering, a lot of machine and accessory details are made from metals.

Metals used in technology are mainly divided into two groups – ferrous and non-ferrous metals. Ferrous metals include iron and its compounds (cast iron, steel, ferroalloys). The remaining metals and their alloys form the group of non-ferrous metals.

Until now, iron and its alloys, considered the main machine-building material, are of particular importance among metals. Iron and its alloys make up 90 % of metals produced worldwide. This is explained by the fact that ferrous metals have important physical and mechanical properties, as well as the fact that iron ores are widely distributed in nature, and the production of cast iron and steel is cheap and uncomplicated [14].

From the beginning of the 20th century, the world scientists who contributed to the further development of the theory of selective operation of modifiers to increase the strength of steel parts include the following; English and German scientists R. Gadfield, R. Mel, E. Bain, G. Hahnemann, F. Wefer, G. Esser and others, Russian scientists P. A. Rebinder, A. A. Zhukov, Kryakovsky, Yu. V., Lipman M. S., A. A. Bochvar, N. A. Minkevich, S. S., Steinberg, N. Ya. Selyakov, N. T. The works of Gudtsov, G. V. Kurdyumov, A. P. Gulyaev and others are among such works. CIS scientists A. A. Bochvar, N. A. Minkevich, S. S., Steinberg, N. Ya. Selyakov, N. T. Gudtsov, G. V. Kurdyumov, A. P. Gulyaev, A. M. Butlerov, S. V. Lebedev, P. A. Rebinder, S. P. Korolyov and A. T. Tumanov contributed a lot. They have developed various technologies of heat treatment of machine parts obtained by cast method in order to increase their operational properties. Among other things, they have developed grinding modes, surface treatment technology of coated teeth, and methods of restoring bent teeth to increase the wear resistance of gear wheels.

Uzbek scientists have conducted a number of scientific researches on increasing the service life of mechanical engineering parts, increasing their mechanical properties, processing alloys inside and outside the furnace. Professors A.A. Mukhamedov, N.D. Turakhodjaev, S.A. Rasulov, F.R. Norkhudzhaev, Sh. A. Karimov made great contributions in this regard. In particular, they created thermocyclic and high-temperature processing methods for increasing the mechanical properties of details based on thermal processing [15, 16].

Experimental part

Induction melting of 110G13L modified steel alloy in laboratory conditions of Tashkent State Technical University, Faculty of Mechanics, “Foundry Technologies” department (INDUCTION MELTING MACHINE, Model: BF-TB 2) was carried out in the furnace.

At the first stage of the study, 1400 gr. 110G13L grade steel slag was liquefied at a temperature from 20 °C to 1250–1300 °C, and then ferrotitanium-65 in the amount of 0.5 % was loaded into the furnace and the temperature in the induction furnace was raised to 1410 °C.

To determine the hardness of the obtained sample, the liquid alloy taken from the furnace was poured into a sand-clay mold at 1390–1410 °C. The temperature of the liquid alloy was measured on a Kelvin PLTs 3000 device.

In order to determine the hardness, chemical composition and structure, the samples were prepared using the S 11MV universal lathe in the Mechanics shop of the Central Repair Mechanics Plant belonging to “Almaliq MMC” JSC [17, 18].

Results and discussion

As a result of the research carried out in an induction furnace with the addition of 0.5 % ferrotitanium-65 as a modifier to 110G13L steel, the following indicators were obtained: the hardness of the surface parts of the sample according to HRB was 96.8 and 97.1, the hardness of the central part was 99.8, according to HRB the average was 97.9, HB-217.1 according to Brinell.

When studying the structure and chemical composition, the following results were obtained (Fig. 1a, b, Table 1).

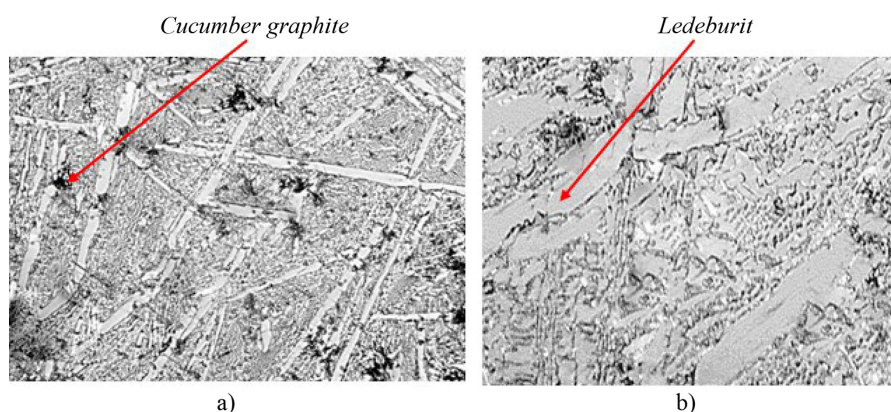


Fig. 1. 0.5 of ferrotitanium-65 to 110G13L steel as a modifier; 1; 1.5; 2; Application in 3 and 4 % and obtained results: a) 1x100 size view; b) 2x400 size view

Table 1. Chemical composition results obtained when 0.5 % ferrotitanium was added as a modifier to 110G13L steel

Material	C	Si	Mr	P	S	Cr	Ni	Ti	Al
FeTi –65	0.91	0.68	11.94	0.051	0.015	0.61	0.11	0.022	0.43

The microstructure was manifested in the form of primary small columnar crystals of high ledeburite. Crystals are 4–5 microns wide and 50 microns long. The appearance of custard-like graphite is significant, probably due to forced redistribution under the influence of high temperature [19].

The eighth stage of the study was carried out in an induction furnace with the addition of 1 % ferrotitanium-65 as a modifier to 110G13L steel. The following indicators were obtained: the surface hardness of the sample was 99.4 and 95.2, the hardness in the central part was 101.2, HRB on average was 98.6, HB-229.2 on Brinell [20].

When studying the chemical composition and structure, the following results were obtained (Fig. 2a, b, Table 2).

Small carbides of chromium and molybdenum are visible in the ledeburite layers. Molybdenum reduced the grain sizes to 3–4 microns in width and 40–45 microns in length [24].

The ninth stage of the research was carried out in an induction furnace with the addition of 1.5 % of ferrotitanium-65 as a modifier to 110G13L steel, and the following indicators were obtained: the surface hardness of the sample was 99.1 and 103.7, and the hardness in the central part was 105.3, averaged 102.7 on HRB, HB-255 on Brinell.

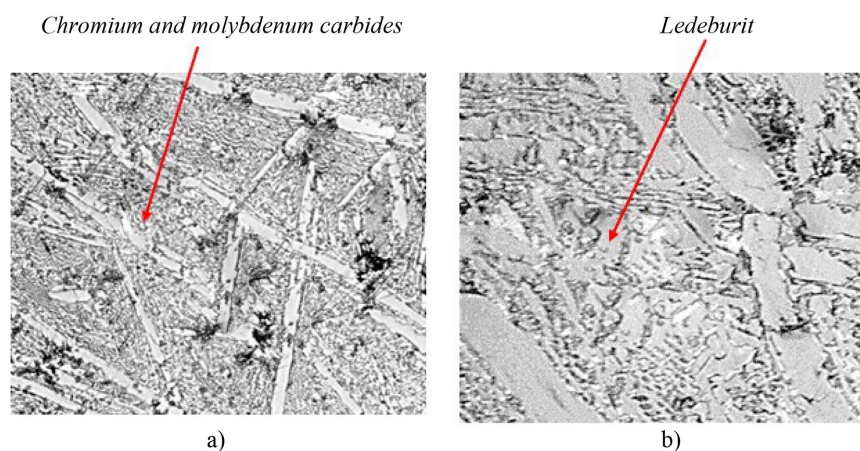


Fig. 2. Chemical composition results obtained when adding 1 % ferrotitanium as a modifier to 110G13L steel: a) 1x100 size view; b) 2x400 size view

Table 2. Chemical composition results obtained when adding 1 % ferrotitanium as a modifier to 110G13L steel [21–23]

Material	C	Si	Mr	P	S	Cr	Ni	Ti	Al
FeTi – 1 %	1.14	0.79	11.32	0.072	0.014	0.79	0.17	0.031	0.03

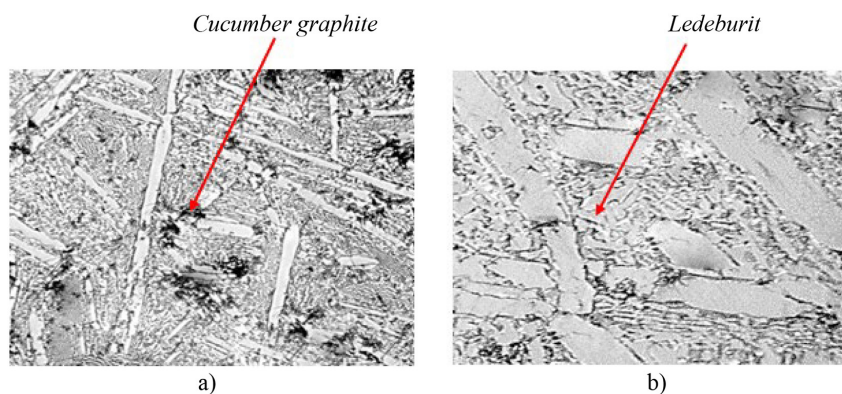


Fig. 3. Chemical composition results obtained when 1.5 % ferrotitanium was added as a modifier to 110G13L steel: a) 1x100 size view; b) 2x400 size view

Table 3. Chemical composition results obtained when 1.5 % ferrotitanium was added as a modifier to 110G13L steel

Material	C	Si	Mr	P	S	Cr	Ni	Ti	Al
FeTi – 1.5 %	1.19	0.86	11.98	0.059	0.011	0.81	0.19	0.046	0.29

When studying the chemical composition and structure, the following results were obtained [25] (Fig. 3a, b, Table 3).

The conclusion of the obtained results is that the microstructure of the sample (eutectic austenitic steel) was manifested in the form of small columnar crystals of high ledeburite. Crystals are 3–4 microns wide and 40 microns long [26].

The tenth stage of the study was carried out in an induction furnace with the addition of 2 % ferrotitanium-65 as a modifier to 110G13L steel. As a result of the study, the following indicators were obtained: the surface hardness of the sample was 104.6 and 105.1, the hardness in the center part was 107.2, HRB The average was 106.6, according to Brinell HB-277.

When studying the chemical composition and structure, the following results were obtained [27–29] (Fig. 4a, b, Table 4).

The appearance of custard-like graphite is significant, probably due to forced redistribution under the influence of high temperature. The effect of titanium in this composition is manifested in reducing the size of cementite and ledeburite grains.

The eleventh stage of the study was carried out in an induction furnace with the addition of 3 % ferrotitanium-65 as a modifier to 110G13L steel. The following indicators were obtained: the surface hardness of the sample was 106.3 and 107.8, the hardness in the center part was 107.8, HRB averaged 107.3, Brinell HB-293.

When studying the chemical composition and structure, the following results were obtained [30] (Table 5, Fig. 5a, b).

Small carbides of chromium and molybdenum are visible in the ledeburite layers. Molybdenum reduced the grain sizes to 4–5 microns in width and 45–40 microns in length.

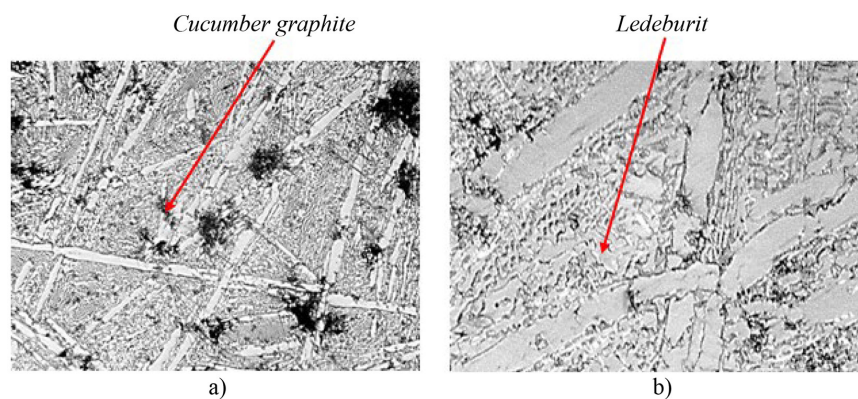


Fig. 4. Chemical composition results obtained when adding 2 % ferrotitanium as a modifier to 110G13L steel: a) 1x100 size view; b) 2x400 size view

Table 4. Chemical composition results obtained when adding 2 % ferrotitanium as a modifier to 110G13L steel

Material	C	Si	Mr	P	S	Cr	Ni	Ti	Al
FeTi-65	1.44	0.68	11.94	0.061	0.016	0.61	0.13	0.022	0.43

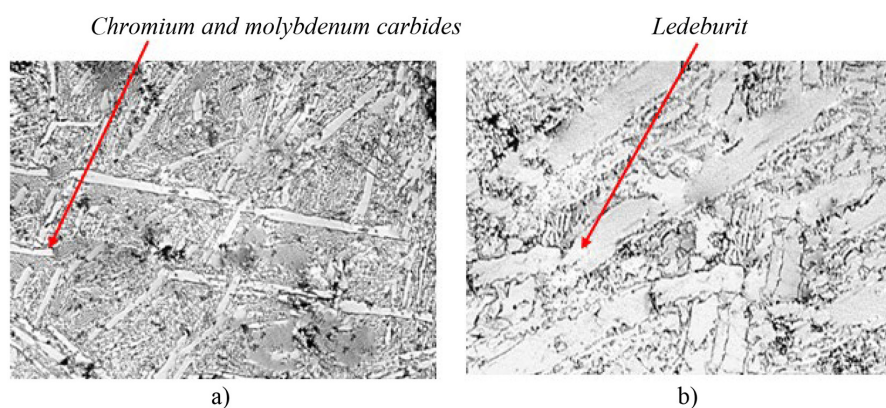


Fig. 5. Chemical composition results obtained when 3 % ferrotitanium was added as a modifier to 110G13L steel: a) 1x100 size view; b) 2x400 size view

Table 5. Chemical composition results obtained when 3 % ferrotitanium was added as a modifier to 110G13L steel

Material	C	Si	Mr	P	S	Cr	Ni	Ti	Al
FeTi-65	1.19	0.93	11.99	0.061	0.016	0.61	0.13	0.022	0.43

The twelfth stage of the study was carried out in an induction furnace with the addition of 4 % ferrotitanium-65 as a modifier to 110G13L steel. The following indicators were obtained: the surface hardness of the sample was 106.8 and 108.6, the hardness in the center part was 111.3, It averaged 108.9 on HRB and 296 on Brinell.

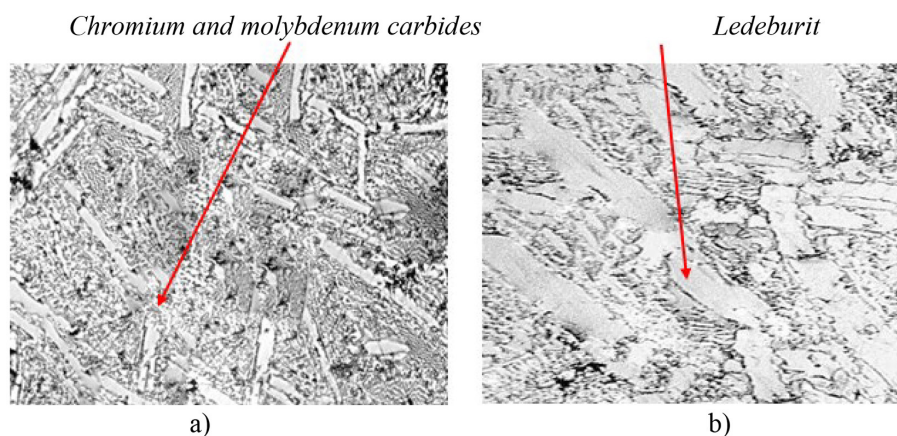


Fig. 6. Chemical composition results obtained when 4 % ferrotitanium was added as a modifier to 110G13L steel: a) 1x100 size view; b) 2x400 size view

Table 6. Chemical composition results obtained when 4 % ferrotitanium was added as a modifier to 110G13L steel [31]

Material	C	Si	Mr	P	S	Cr	Ni	Ti	Al
FeTi –65	1.23	0.91	11.94	0.058	0.018	0.62	0.14	0.021	0.42

When studying the chemical composition and structure, the following results were obtained (Table 6, Fig. 6a, b).

Chromium and molybdenum appear in fine carbides in ledeburite layers (Fig. 7).

According to GOST, the hardness of 110G13L steel is equal to HB-217–229. It was found that 110G13L steel is equal to HB-277–293 when 2–3 % of ferrotitanium-65 is added as a modifier (Table 7).

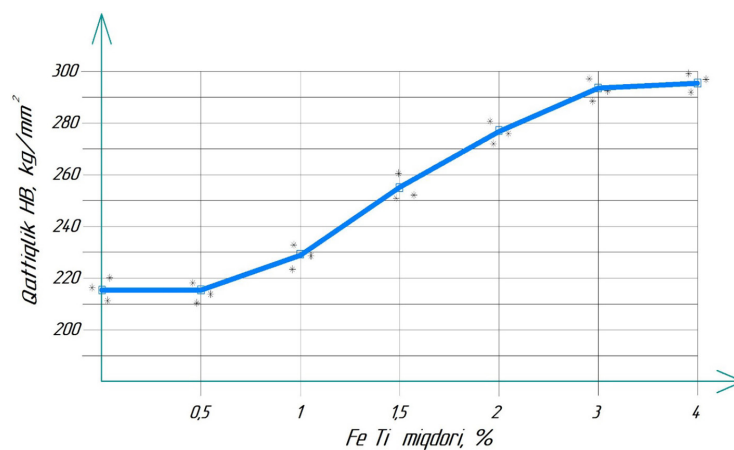


Fig. 7. 219 HB with the addition of 0.5 % ferrotitanium; 227 HB at 1 %; 255 HB at 1.5 %; 277 HB at 2 %; 293 HB at 3 %; 296 HB at 4 %

Table 7. A tabular view of hardness results

Modifier Ferrotitanium, %	Hardness is a unit of measure		% difference
	HRB	HB	
0.5	97.9	219	unchanged
1	98.6	227	unchanged
1.5	102.7	255	10.2
2	106.6	277	16.3
3	107.3	293	21.8
4	108.9	296	22.6

Conclusions

As a result of theoretical and practical research on the development of high-strength parts from the modified 110G13L steel alloy, the following recommendations were developed:

- load ori musta h deficiency to the composition have the details get optimal modifiers were selected for at the MTM (TsRMZ) plant TDTU laboratory conditions tested;
- load ori musta h deficiency to the composition have the details get for It is recommended to add 2–3 % ferromtitanium-65 as a modifier to 110G13L steel;
- when 2–3 % of ferrotitanium-65 was added as a modifier to the 110G13L steel alloy, the hardness of the samples gave the above results, 0.5; 1;
- when adding a modifier of 1.5 and 4 %, there was almost no change, and economic efficiency was also taken into account.

References

- [1] Shluger A.M., Azhogin F.F., Efimov E.A. Corrosion and protection of metals. Moscow: Metallurgy. 1981, 216 (In Rus.)
- [2] Obidov Z.R., Ganiev I.N. Anode protective of zinc-aluminium covering with II group elements. Berlin: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2012, 288 (In Germany)
- [3] Obidov Z.R., Ganiev I.N. Physicochemical of zinc-aluminium alloys with rare-earth metals. Dushanbe: OOO «Andaleb-R». 2015, 334 (In Tajikistan)
- [4] Amini R.N., Irani M., Ganiev I., Obidov Z.R. Galfan I and Galfan II Doped with Calcium, Corrosion Resistant Alloys. *Oriental Journal of Chemistry*. 2014, 30(3), 969–973.
- [5] Obidov Z.R., Ganiev I.N., Amonov I.T., Ganieva N.I. Corrosion of Al+2.18 % Fe alloy doped with gallium. *Protection of Met. and Phys. Chem. of Surfaces*. 2011, 47(5), 654–657.
- [6] Obidov Z.R., Ganiev I.N., Eshov B.B., Amonov I.T. Corrosion-electrochemical and physicochemical properties of Al+2.18 % Fe alloy alloyed with indium. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2010, 83(2), 263–266. DOI: 10/1134/S 107042721002014X
- [7] Obidov Z.R., Ganiev I.N. Anodic behavior and oxidation of the thallium alloyed Al+2.18 % Fe alloy. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2012, 85(11), 1691–1694.
- [8] Obidov Z.R. Thermophysical Properties and Thermodynamic Functions of the Beryllium, Magnesium and Praseodymium Alloyed Zn-55Al Alloy. *High Temperature*. 2017, 55(1), 150–153. DOI: 10.1134/S 0018151X17010163

- [9] Obidov Z.R. Effect of pH on the Anodic Behavior of Beryllium and Magnesium Doped Alloy Zn55Al. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2015, 88(9), 1451–1457.
- [10] Obidov Z.R., Amonova A. V., Ganiev I. N. Influence of the pH of the Medium on the Anodic Behavior of Scandium – Doped Zn55Al Alloy. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2013, 54(3), 234–238. DOI: 10.3103/S 1067821213030115
- [11] Obidov Z.R. Anodic Behavior and Oxidation of Strontium – Doped Zn5Al and Zn55Al Alloys. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2012, 48(3), 352–355.
- [12] Firuzi H., Jobirov U.R., Obidov Z.R. Effect of neodymium and erbium on the kinetics oxidation of Zn0.5Al zinc alloy, in solid state. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2022, 15(5), 561–568. DOI: 10.17516/1999–494X-0417
- [13] Obidov Z.R., Amonova A. V., Ganiev I. N. Effect of Scandium Doping on the Oxidation Resistance of Zn5Al and Zn55Al Alloys. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2013, 87(4), 702–703. DOI: 10.1134/S 0036024413040201
- [14] Turakhodjaev N., Shukhrat C. and al. Ways to increase the strength of the surface of the parts. *Journal of Critical Reviews*. 2020, 7(11), 380–386.
- [15] Dzhakhangirovich T.N., Makhmatmurodovich C. S., Khusniddinovich T. N. Development of Machined Durable Parts of Modified 110g13l Brand Steel. *Eurasian Scientific Herald*. 2023, 17, 21–24.
- [16] Karimov K., Turahodjaev N., Akhmedov A., Chorshanbiev Sh. Mathematical model for producing machine parts. *E 3S Web of Conferences*. 2021, 264, 40–78.
- [17] Yang W. Ruizhi Wu, Turakhodjaev N., Meiduo Liu. Microstructural evolution, precipitation behavior and mechanical properties of a novel Al–Zn–Mg–Cu–Li–Sc–Zr alloy. *Journal of Materials Research*. 2021, 36, 740–750.
- [18] Turakhodjaev N., Tursunbaev S., Umarova D., Kuchkorova M., Baydullaev A. Influence of alloying conditions on the properties of white cast iron. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*. 2020, 7(12), 1–6.
- [19] Torakhodjaev N.D., Yakubov L. E., Tursunov S. Mathematical Model of Heat Treatment to Improve TX Mechanical Properties. *Composite materials*. 2018, 43–52.
- [20] Turakhodjaeva F.N. et al. The process of developing a technology for extracting copper and other nonferrous metals from industrial slags. *Corporate Governance: Theory and Practice. Collection of scientific papers on*. 2019, 23, 363–364.
- [21] Nodir T., Shukhrat C., Nargiza S. & Kulmukhammad C. Ways to increase the strength of shaftgear teeth working in a highly abrasive grinding environment. *Journal of Critical Reviews*. 2020, 7(7), 904–907.
- [22] Kholmiraev N., Turakhodjaev N., Sadikova N. Improvement of the Melting Technology of 35XГCЛ Brand Steel Alloy in An Electric ARC Furnace. *Role of Exact and Natural Sciences During the Renaissance III*. 2023, 60–64.
- [23] Kholmiraev N. et al. Technology of Processing the Liquid Steel Alloy Obtained in an Electric ARC Furnace Outside the Furnace. *Central Asian Journal of Theoretical and Applied Science*. 2023, 4(4), 61–64.
- [24] Nodir T. et al. Ways to increase the strength of the surface of the parts. *Journal of Critical Reviews*. 2020, 7(11), 380–386.

- [25] Turakhodjaev N. et al. Effect of metal crystallation period on product quality. *Theoretical & Applied Science*. 2020, 11, 23–31.
- [26] Turakhodjaev N., Tashbulatov Sh., Zokirov R., Tursunbaev S., Baydullaev A. Studying the scientific and technological bases for the processing of dumping copper and aluminum slags. *Journal of Critical Reviews*. 2020, 7(11). doi.org/10.31838/jcr.07.11.79
- [27] Wang Y. et al. Microstructure and mechanical properties of ultra-lightweight Mg-Li-Al/Al-Li composite produced by accumulative roll bonding at ambient temperature. *Materials Science and Engineering: A*. 2020, 787, 13–19.
- [28] Turakhodjaev N.D. et al. Analysis of defects in white cast iron. *Theoretical & Applied Science*. 2020, 6, 675–682.
- [29] Wang Y., Zhong F., Wu R., Wu H., Turakhodjaev, N., Kudratkhon, B. Zhang, M. High-strength, ductility and modulus Al–Li/B 4C composite with near nanostructure produced by accumulative roll bonding. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020, 834, 155105.
- [30] Turakhodjaev N. et al. Quality improvement of the steel melting technology in an electric arc furnace. *ACADEMICIA: An Intern. Mult. Research Journal*. 2021, 11(7), 48–54.
- [31] Yang Z., Ji P., Wu R., Wang Y., Turakhodjaev, N., Kudratkhon, B. High-strength, ductility and modulus Al–Li/B 4C composite with near nanostructure produced by accumulative roll bonding. *International Journal of Materials Research*. 2023, 114(1), 65–76.

EDN: LYWPPZ

УДК 631.563.2

Conditions for Conducting Experimental Studies on Grain Drying

**Tursunboy Rakhmankulov^a,
Abdulkhamid Erkinjonov^a, Kamolkhan A. Karimov^b,
Shakhnoza R. Adilova^b, Nodir J. Turakhodjaev^c,
Mehrubon M. Mirmuhamedov^d, Jamshed H. Sharipov^d,
Ziyodullo R. Obidov^{e*} and Khayriddin Komolov^f**
*^aTashkent State Technical University named after I. A. Karimov
Tashkent, Republic of Uzbekistan
^bUzbek-Japan Innovation Center of Yors
Tashkent, Republic of Uzbekistan
^cAndijan Machine-Building Institute
Andijan, Republic of Uzbekistan
^dKhujand National University named
after academician B. Ghafurov
Khujand, Republic of Tajikistan
^eInstitute of Chemistry named
after V. I. Nikitin NAS of Tajikistan
Dushanbe, Republic of Tajikistan
^fTashkent Medical Academy
Tashkent, Republic of Uzbekistan*

Received 18.12.2023 received in revised form 13.01.2024, accepted 21.02.2024

Abstract. This paper examines the effect of heater power, speed of drying agent (air), adjustable slit width and number of revolutions of drying drum on the drying efficiency of the device, the moisture content of the rice pile coming out of the drum, and the chatness of rice in the rice pile. In addition, showed the changes in the value of the heating power and the drying efficiency of the device. The change of the adjustable slot size of the drying drum and the drying efficiency of the device consist of determining the effect of the moisture content of the pile of rice coming out of the drum and the effect of rice chatnash in the pile of rice. The experimental rice drying device in a stationary version was prepared at the “Andijan experimental-testing plant” JSC according to the design drawings

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: obidovzr@gmail.com

developed by the Andijan Institute of Mechanical Engineering. Based on the results of theoretical studies, a drying drum with a diameter of 880 mm and a length of 1800 mm was adopted as the main working body.

Keywords: rice, heater, drum, experiment, heater, diameter, rice, moisture, size, parameters.

Citation: Rakhmankulov T., Erkinjonov A., Karimov K. A., Adilova Sh. R., Turakhodjaev N. J., Mirmuhamedov M. M., Sharipov J. H., Obidov Z. R., Komolov Kh. Conditions for conducting experimental studies on grain drying. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(2), 186–192. EDN: LYWPPZ



Условия проведения экспериментальных исследований по сушке зерна

**Т. Рахманкулов^а, А. Еркинджонов^а, К. А. Каримов^б,
Ш. Р. Адилова^б, Н. Д. Тураходжаев^в, М. М. Мирмухамедов^г,
Дж. Х. Шарипов^г, З. Р. Обидов^д, Х. Комолов^е**

*^аТашкентский государственный технический университет им. И. Каримова
Республика Узбекистан, Ташкент*

*^бУзбекско-Японский инновационный центр YORS
Республика Узбекистан, Ташкент*

*^вАндижанский машиностроительный институт
Республика Узбекистан, Андижан*

*^гХуджандский государственный университет им. акад. Б. Гафурова
Республика Таджикистан, Худжанд*

*^дИнститут химии им. В. И. Никитина НАН Таджикистана
Республика Таджикистан, Душанбе*

*^еТашкентская медицинская академия
Республика Узбекистан, Ташкент*

Аннотация. В этой статье рассматривается влияние мощности нагревателя, скорости сушильного агента (воздуха), регулируемой ширины щели и количества оборотов сушильного барабана на эффективность сушки устройства, содержание влаги рисовой кучи, выходящей из барабана, и чат в куче риса. Кроме того, показаны изменения в значении нагревательной мощности и эффективности сушки устройства. Изменение регулируемого размера слота сушильного барабана и эффективность сушки устройства зависят от определения эффекта содержания влаги на кучу риса, выходящего из барабана, и эффекта рисового чатчана в куче риса. Экспериментальное устройство для сушки риса в стационарной версии было подготовлено на «Andijan Experimental Testing Partment» JSC в соответствии с дизайнерскими чертежами, разработанными Андижанским институтом машиностроения. Основываясь на результатах теоретических исследований, был принят сухой барабан диаметром 880 мм и длиной 1800 мм в качестве основного рабочего тела.

Ключевые слова: рис, обогреватель, барабан, эксперимент, диаметр, рис, влажность, размер, параметры.

Цитирование: Рахманкулов Т. Условия проведения экспериментальных исследований по сушке зерна / Т. Рахманкулов, А. Еркинджонов, К. А. Каримов и др. // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(2). С. 186–192. EDN: LYWPPZ

Introduction

Currently, one of the key tasks arising from production solutions is the more complete and efficient use of the manufactured product from a metal alloy or carbon steel, a reduction in loss of metal products from destruction [1–5]. Along with the intensive use of machines, mechanisms and various products, reliable protection against the aggressive effects of the media in which they are operated is required [6–10]. In addition, the savings of basic structural materials and products, their rational use is also inextricably linked with the reliable protection of their negative environmental impact [11–16].

Metal alloys play a significant role in the successful solution to improve and extend the service life of steel products or equipment [17–20]. These alloys as coatings increase the resistance and durability of products and equipment protect metal products from destruction [21–25].

Experimental part

It is desirable to carry out experimental studies using different values of heater power, speed of drying agent, adjustable slot size of drying drum. As a result of theoretical studies, it was determined that the drying efficiency of the device, the moisture content of the rice pile coming out of the drum, and the chatniness of the rice in the rice pile depend on the heating power, the value of the speed of the drying agent, the drying drum, the size of the adjustable slot, and the number of revolutions of the drying drum. The tasks of experimental research are as follows:

- to determine the effect of the change in the value of the heater power on the drying efficiency of the device, the moisture content of the rice pile coming out of the drum, and the rice chatnash in the rice pile;
- to determine the effect of the change in the speed of the drying agent on the drying efficiency of the device, the moisture content of the rice pile coming out of the drum, and the rice chatnash in the rice pile;
- to determine the effect of the change in the size of the adjustable slot of the drying drum on the drying efficiency of the device, the moisture content of the rice pile coming out of the drum, and the rice chatnash in the rice pile;
- to determine the effect of the change in the number of revolutions of the drying drum on the drying efficiency of the device, the moisture content of the rice pile coming out of the drum, and the rice chatnash in the rice pile.

For the experimental experiments, the value of the heater power is from 2 kW to 4 kW, the speed of the drying agent is from 0.25 m/s to 0.75 m/s, the adjustable slit size of the drying drum is changed from 1 sm 3 sm and the number of revolutions of the drying drum changed from 10min⁻¹ to 22 min⁻¹. When one parameter was changed in the experiment, the other parameters remained constant, that is, they were not changed.

The scope of experimental studies on the optimization of parameters of the drying device was carried out using the method of mathematical planning of experiments. The experiments were conducted on the basis of a four-factor plan.

Mathematical statistics methods obtained in the experiments were used, and the average arithmetic values of the indicators were determined.

Results and discussion

Changing the value of the heater power in the dryer within certain limits was carried out using switches. Fig. 1 shows a general view of the switch-wire that changes the value of the Tin barriers

were used to create different values of drying agent (air) velocity and TRO-TEC (Germany) measuring instrument was used to measure its velocity.

This picture shows an overview of the TROTEC measuring equipment (Fig. 2)

The number of rotations of the drying drum was measured using a digital tachometer (Germany)

Fig. 3 shows a general view of a digital tachometer that measures the number of rotations of the drying drum

It was prepared at JSC “Andijan Pilot-Test Plant” according to the design drawings developed by the Andijan machine-building institute. Based on the results of theoretical studies, 880 mm a drying drum equal in diameter and length was adopted as the main working body 1800 mm.

The influence of the change in the value of the heater power on the performance of the dryer. To conduct these experiments, the heating power value was varied from 2 kW to 4 kW in 0.5 kW increments. In this case, the value of the speed of the drying agent was 0.5 m/s, the size of the adjustable slot of the drying drum, 2 sm and the number of revolutions of the drying drum were taken as 16 min^{-1} .



Fig. 1. Change the value of the heater power interlocked



Fig. 2. To measure the speed of the drying agent TROTEC equipment

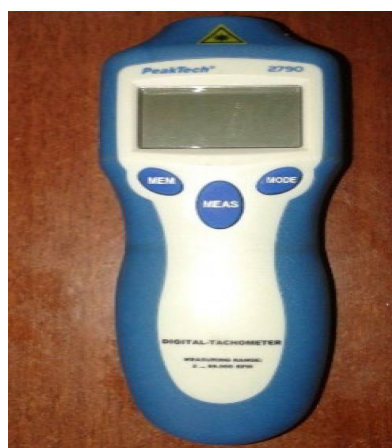


Fig. 3. Measuring the number of rotations of the drying drum digital tachometer for experimental rice drying device in a stationary version Andi

The drying efficiency of the device was taken as the main indicator in the study of the change in the value of the heater power. In an additional study, the moisture content of the rice pile coming out of the drum and the rice chatnash in the rice pile were studied. In this case, the value of the heater power was changed in the order mentioned above and experiments were conducted.

Fig. 4–5 and 6 show the results obtained in the experiments in a graphical form and presented in a tabular form.

From the connections shown in Fig. 4, 5 and 6, it can be seen that increasing the value of the heater power from 2 kW to 4 kW leads to an increase in the drying efficiency of the device and a decrease in the moisture content of the rice pile coming out of the drying drum. However, it also causes an increase in rice chatnash in the pile of rice coming out of the drying drum. Therefore, it is desirable to take the heater power less than 4 kW.

Applying the method of least squares to the graphical relationships depicted in Fig. 4, 5 and 6, they can be expressed using the following empirical formulas:

$$P=143.12+2.2114\cdot N-0.2286\cdot N^2; (R_2=0.99).$$

$$W=22.334-5.2971\cdot N+0.7429\cdot N^2; (R_2=0.968).$$

$$Ch=3.1023-3.051N+0.7829\cdot N^2; (R_2=0.992).$$

The influence of the value of drying agent speed on the performance of the device. To conduct these experiments, the drying agent velocity was varied from 0.25 m/s to 0.75 m/s with an interval of 0.125 m/s. In this case, the value of the heater power was 3 kW, the size of the adjustable slot of the drying drum 2 sm and the number of rotations of the drying drum were taken as 16 min⁻¹.

In studying the speed of the drying agent, the drying efficiency of the device was taken as the main indicator. In addition, the moisture content of the rice pile coming out of the drum and the rice chatnash in the rice pile were studied. Experiments were carried out by changing the speed of the drying agent in the above order.

Fig. 7 shows the results obtained in the experiments in a graphical form and presented in a tabular form.

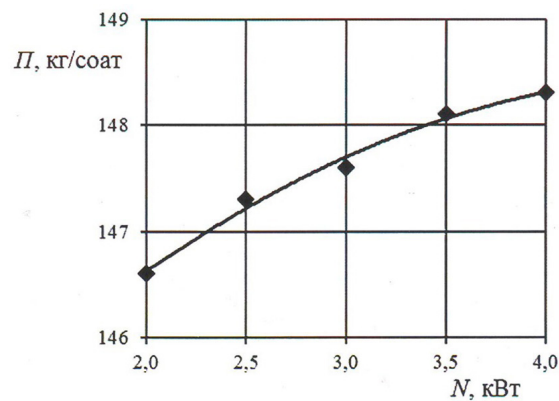


Fig. 4. It depends on the value of the heater power (N). change of drying efficiency (P)

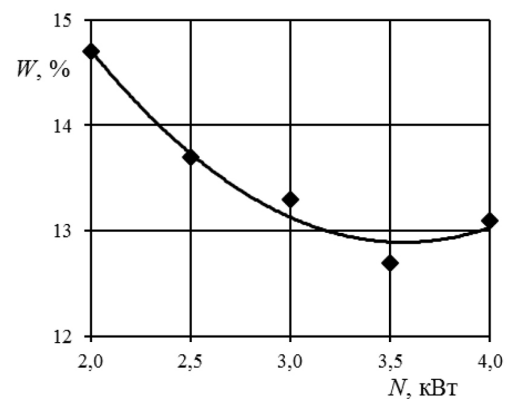


Fig. 5. I depends on the value of the power of the generator (N). change of pile moisture (W)

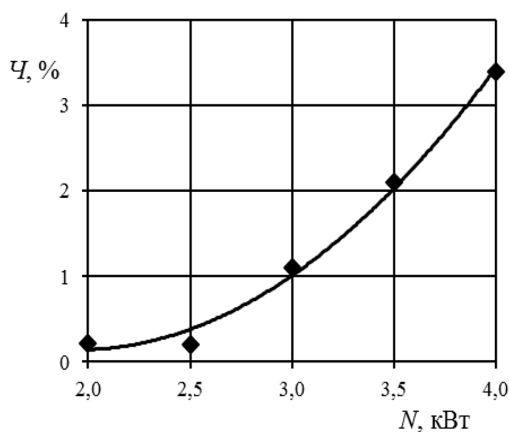


Fig. 6. Q depends on the value of the power of the generator (N). changing the rice chatnashi (Ch) in the heap

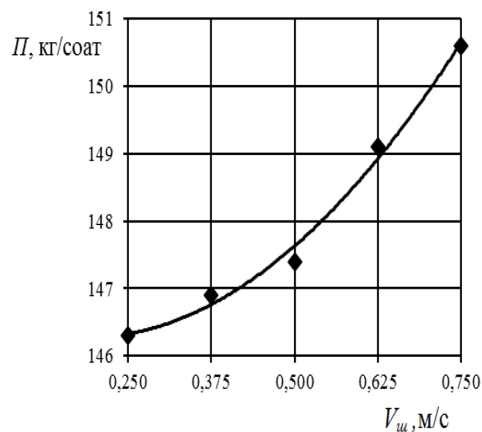


Fig. 7. Q depends on the speed of the drying agent (V_{sh}). change of drying efficiency (P)

Conclusions

As a result of the conducted research, it can be concluded as follows: the main convenience of the experimental rice drying device is that it protects the dried grain from sunlight, which in turn has a positive effect on adding weight to the rice during the rice milling process. In the process of conducting experimental research, the theoretical difference has been significantly different, and in the current development period, conducting experimental experiments is the need of the hour.

References

- [1] Shluger A.M., Azhogin F.F., Efimov E.A. Corrosion and protection of metals. Moscow: Metallurgy. 1981, 216 (In Rus.)
- [2] Obidov Z.R., Ganiev I.N. Anode protective of zinc-aluminium covering with II group elements. Berlin: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2012, 288 (In Germany)
- [3] Obidov Z.R., Ganiev I.N. Physicochemical of zinc-aluminium alloys with rare-earth metals. Dushanbe: OOO «Andaleb-R». 2015, 334 (In Tajikistan)
- [4] Amini R.N., Irani M., Ganiev I., Obidov Z.R. Galfan I and Galfan II Doped with Calcium, Corrosion Resistant Alloys. *Oriental Journal of Chemistry*. 2014, 30(3), 969–973
- [5] Obidov Z.R., Ganiev I.N., Amonov I.T., Ganieva N.I. Corrosion of Al+2.18 % Fe alloy doped with gallium. *Protection of Met. and Phys. Chem. of Surfaces*. 2011. 47(5), 654–657
- [6] Obidov Z.R., Ganiev I.N., Eshov B.B., Amonov I.T. Corrosion-electrochemical and physicochemical properties of Al+2.18 % Fe alloy alloyed with indium. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2010, 83(2), 263–266. DOI: 10/1134/S 107042721002014X
- [7] Obidov Z.R., Ganiev I.N. Anodic behavior and oxidation of the thallium alloyed Al+2.18 % Fe alloy. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2012, 85(11), 1691–1694
- [8] Obidov Z.R. Thermophysical Properties and Thermodynamic Functions of the Beryllium, Magnesium and Praseodymium Alloyed Zn-55Al Alloy. *High Temperature*. 2017, 55(1), 150–153. DOI: 10.1134/S 0018151X17010163
- [9] Obidov Z.R. Effect of pH on the Anodic Behavior of Beryllium and Magnesium Doped Alloy Zn55Al. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2015, 88(9), 1451–1457

- [10] Obidov Z.R., Amonova A. V., Ganiev I. N. Influence of the pH of the Medium on the Anodic Behavior of Scandium – Doped Zn55Al Alloy. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2013, 54(3). 234–238. DOI: 10.3103/S 1067821213030115
- [11] Obidov Z.R. Anodic Behavior and Oxidation of Strontium – Doped Zn5Al and Zn55Al Alloys. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2012. 48(3). 352–355
- [12] Firuzi H., Jobirov U.R., Obidov Z.R. Effect of neodymium and erbium on the kinetics oxidation of Zn0.5Al zinc alloy, in solid state. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2022, 15(5), 561–568. DOI: 10.17516/1999–494X-0417
- [13] Obidov Z.R., Amonova A. V., Ganiev I. N. Effect of Scandium Doping on the Oxidation Resistance of Zn5Al and Zn55Al Alloys. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2013, 87(4). 702–703. DOI: 10.1134/S 0036024413040201
- [14] Turakhodjaev N., Shukhrat C. and at al. Ways to increase the strength of the surface of the parts. *Journal of Critical Reviews*. 2020, 7(11), 380–386.
- [15] Dzhakhangirovich T.N., Makhmatmurodovich C. S., Khusniddinovich T. N. Development of Machined Durable Parts of Modified 110g13l Brand Steel. *Eurasian Scientific Herald*. 2023, 17, 21–24
- [16] Karimov K., Turahodjaev N., Akhmedov A., Chorshanbiev Sh. Mathematical model for producing machine parts. *E 3S Web of Conferences*. 2021, 264, 40–78
- [17] Yang W., Ruizhi Wu, Turakhodjaev N., Meiduo Liu. Microstructural evolution, precipitation behavior and mechanical properties of a novel Al–Zn–Mg–Cu–Li–Sc–Zr alloy. *Journal of Materials Research*. 2021, 36, 740–750
- [18] Turakhodjaev N., Tursunbaev S., Umarova D., Kuchkorova M., Baydullaev A. Influence of alloying conditions on the properties of white cast iron. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*. 2020, 7(12), 1–6
- [19] Torakhodjaev N.D., Yakubov L.E., Tursunov S. Mathematical Model of Heat Treatment to Improve TX Mechanical Properties. *Composite materials*. 2018, 43–52
- [20] Joshua F. Design, construction and testing of simple solar maize dryer. *Department of Mechanical Engineering*, Federal University of Technology Minna. Nigeria. 2008, 3–9
- [21] Turakhodjaeva F.N. et al. The process of developing a technology for extracting copper and other nonferrous metals from industrial slags. *Corporate Governance: Theory and Practice. Collection of scientific papers on*. 2019, 23, 363–364.
- [22] Nodir T., Shukhrat C., Nargiza S. & Kulmukhammad C. Ways to increase the strength of shaftgear teeth working in a highly abrasive grinding environment. *Journal of Critical Reviews*. 2020, 7(7), 904–907
- [23] Wang Y. et al. Microstructure and mechanical properties of ultra-lightweight Mg-Li-Al/Al-Li composite produced by accumulative roll bonding at ambient temperature. *Materials Science and Engineering: A*. 2020, 787, 13–19
- [24] Wang Y., Zhong F., Wu R., Wu H., Turakhodjaev N., Kudratkhon B. Zhang M. High-strength, ductility and modulus Al–Li/B 4C composite with near nanostructure produced by accumulative roll bonding. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020, 834, 155105
- [25] Yang Z., Ji P., Wu R., Wang Y., Turakhodjaev N., Kudratkhon B. High-strength, ductility and modulus Al–Li/B 4C composite with near nanostructure produced by accumulative roll bonding. *International Journal of Materials Research*. 2023, 114(1), 65–76

Energy Systems and Complexes
Энергетические системы и комплексы

EDN: QHQVRA

УДК 621.316.003.13:37.07

**Increasing the Energy Saving Efficiency
of an Isolated Object (By the Example
of a Far Eastern Federal University Campus)**

Darina V. Stepan*

*Far Eastern Federal University
Vladivostok, Russian Federation*

Received 28.11.2023, received in revised form 13.01.2024, accepted 23.02.2024

Abstract. This paper proposes an ongoing measures aimed at increasing the energy efficiency of an isolated facility (using the example of the campus of the Far Eastern Federal University (hereinafter referred to as FEFU/University)), entailing financial costs to ensure quality and energy supply, solving productivity problems by using power, available equipment, and regulating the regime of thermal energy consumption, through limiting the circulation of coolant from third-party generation, in combination with the implementation of intelligent online supervision of the complex state of the FEFU energy sector as a whole, which ultimately leads to a significant difference in the cost of purchased thermal energy from third-party generation and the generated heat flow of FEFU's own capacities.

This paper attracts attention with the analytics and dynamics of implementation, options for further development of the effective application of energy saving policies.

The presented activities are a technical solution in the field of energy saving and increasing the energy efficiency of decentralized systems and this experience can be applied not only to existing facilities, but also, for example, in the federal project «Development of infrastructure for scientific research and training», within the framework of which – new innovative type of campuses are being developed and put into operation.

Keywords: energy efficiency, energy saving, energy resources, isolated object, thermal energy.

Citation: Stepan D. V. Increasing the energy saving efficiency of an isolated object (by the example of a far eastern federal university campus). J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(2), 193–204. EDN: QHQVRA



Повышение эффективности энергосбережения изолированного объекта (на примере кампуса Дальневосточного федерального университета)

Д. В. Стэпан

*Дальневосточный федеральный университет
Российская Федерация, Владивосток*

Аннотация. В статье представлены реализуемые мероприятия, направленные на повышение эффективности энергосбережения изолированного объекта (на примере кампуса Дальневосточного федерального университета (ДВФУ)), влекущие сокращение финансовых затрат с поддержанием качественного и бесперебойного снабжения тепловой и электрической энергий путём задействования мощности имеющегося оборудования и регулирования режима потребления тепловой энергии через ограничение циркуляции теплоносителя от сторонней генерации в комбинации с осуществлением интеллектуального онлайн-надзора за комплексным состоянием энергохозяйства ДВФУ в целом, что в результате приводит к существенной разнице в стоимости покупаемой тепловой энергии от сторонней генерации и вырабатываемого теплового потока собственных мощностей ДВФУ.

Статья привлекает внимание аналитикой и динамикой реализации, вариантами дальнейшего развития эффективного применения политики энергосбережения.

Представленные мероприятия – это техническое решение в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности децентрализованных систем, и данный опыт может быть применен не только к существующим объектам, но и, например, в федеральном проекте «Развитие инфраструктуры для научных исследований и подготовки кадров», в рамках которого разрабатываются и вводятся в эксплуатацию кампусы нового инновационного типа.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, энергосбережение, энергетические ресурсы, изолированный объект, тепловая энергия.

Цитирование: Стэпан Д. В. Повышение эффективности энергосбережения изолированного объекта (на примере кампуса Дальневосточного федерального университета) / Д. В. Стэпан // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(2). С. 193–204. EDN: QHQRVA

Введение

Кампус ДВФУ имеет уникальное островное расположение, сконцентрированную активную группу потребителей энергоресурсов с динамично изменяемым и нераспределенным графиком потребления суммарно и в разрезе по типу объектов (гостиница, общежитие, административный корпус, медицинский центр). Объемы энергоснабжения университета сопоставимы с трудовым поселком аналогичной площади и численностью населения.

Изолированность объекта проявляется и в отсутствие централизованного теплоснабжения. Теплоноситель на нужды отопления, вентиляции и горячего водоснабжения (далее – ГВС) поставляется теплоснабжающей организацией АО «ДВЭУК-ГенерацияСети» от мини-ТЭЦ «Центральная» (далее – мини-ТЭЦ) по тепловой магистрали в двухтрубном исполнении протяженностью более 6 км и объемом 2,4 тыс. м³, по моносхеме.

И несмотря на оснащение мини-ТЭЦ современным теплоэнергетическим оборудованием, новейшими системами управления, высокой степенью автоматизации и на то, что для Дальне-

восточного федерального региона именно здесь применена впервые технология производства энергии на основе малой когенерации с использованием газотурбинных установок малой мощности в сочетании с утилизационными теплообменниками (традиционно здесь используется большая когенерация с использованием теплофикационных турбин на ТЭЦ) [1], ежегодное сравнение тарифов на тепловую энергию для объектов ДВФУ, расположенных на материковой части города Владивостока (теплоснабжающая организация ПАО «ДЭК») и на островной, отражает разницу в 1,4 раза больше для кампуса на о. Русский [2].

Изменение тарифа в 2023 г. по сравнению с 2022 г.: электроэнергия +33,0 %, тепловая энергия +8,1 %, водоснабжение +6,6 %, водоотведение +8,3 %, природный газ +8,6 %.

Учитывая, что затраты на энергетические ресурсы составляют существенную часть расходов университета, в условиях увеличения тарифов и стоимости на энергоносители их расточительное и неэффективное использование недопустимо.

Создание условий для повышения эффективности использования энергетических ресурсов становится одной из приоритетных задач развития университета: проведение энергетического обследования, составление перечня энергоэффективных мероприятий (далее – ЭЭМ) по энергосбережению и повышению энергетической эффективности инженерных систем с применением мирового и отечественного передового опыта, усовершенствование системы автоматизации и цифровой модели.

Обновленная технико-экономическая политика университета закрепила себя программой, утвержденной проректором по управлению кампусом ДВФУ, в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности объектов кампуса ДВФУ от 29 марта 2021 г. (далее – Программа). Перечень ЭЭМ Программы и их задачи приведены в табл. 1.

Ключевое энергоэффективное мероприятие в теплоснабжении для изолированного объекта.

Предпосылки и сложности реализации

Приоритетный вектор Программы взят на мероприятие частичного замещения тепловой энергии, получаемой от теплоносителя (вода) с мини-ТЭЦ, на тепловую энергию (воздух) от крышных кондиционеров с газовым нагревателем воздуха, руфтопов марки YORK серии DM (далее – КЭЭМ).

Центральная группа корпусов кампуса ДВФУ (№№ 12, 20, 24) оборудована газовым вентиляционным оборудованием в количестве 226 шт., варьируемой единичной мощностью агрегата от 14,7 кВт до 117,2 кВт и общей максимальной мощностью 14621,9 кВт (12,57 Гкал/час).

Естественно, что максимальное нерациональное теплopotребление на объектах университета зафиксировано в переходные периоды года (весна-осень), когда возникают перетопы и регулирование каждого терморегулятора радиатора не представляется возможным по причине отсутствия детального автоматического регулирования. Именно поэтому для КЭЭМ принято именно это календарное время.

Стоит отметить, что задействованная мощность газоиспользующего оборудования составляет всего 0,8 Гкал/час, следовательно, максимальная свободная мощность 11,77 Гкал/час, а расчётная тепловая нагрузка, согласно проекту, на нужды отопления составляет 6,150 Гкал/час, на нужды вентиляции – 3,738 Гкал/час [3].

Таблица 1. Перечень ЭЭМ Программы и их задачи

Table 1. List of EEM Program and their tasks

Мероприятия	Задача
В системе электроснабжения:	
Замена люминесцентных светильников на светодиодные, установленные в технических помещениях всех корпусов, офисных помещениях корпусов 1 типа и учебно-административных корпусах	Повышение экологической безопасности (замена газоразрядных светильников с содержанием ртути на экологически безопасные); Увеличение срока службы в 4 раза; Увеличение светового потока и площади освещенности; Отсутствие вибраций и звука
Установка астрономических таймеров и перевод 100 % светильников системы фасадного освещения и на лестничных маршах в учебно-административных корпусах	Использование светильников в периоды, когда это действительно необходимо (в темное время суток); Снижение времени работы светильников и, как следствие, повышение срока службы
Выход на федеральный оптовый рынок электрической энергии	Снижение тарифа на электрическую энергию на 14 %
В системе теплоснабжения:	
Изменение параметров автоматического регулирования на поддержание заданных режимов работы теплообменного оборудования в 24 индивидуальных тепловых пунктах (далее – ИТП) 100 %	Увеличение теплосъема
Замена контроллеров управления режимами работы в 6 ИТП (25 %)	Исключение перетоков на южной стороне
Частичное замещение тепловой энергии, получаемой от теплоносителя (вода) с мини-ТЭЦ, на тепловую энергию от крышных кондиционеров с газовым нагревателем воздуха (руфтопов) на время осенне-весеннего переходного отопительного периода на корпусах А, В, С, D, E, S	Улучшение показателей микроклимата в аудиторном фонде; Уменьшение финансовых затрат на тепловую энергию
Ремонт транзитной тепловой сети на Реабилитационный центр	Снижение рисков возникновения аварийных ситуаций на трубопроводах; Снижение потерь тепловой энергии, потребляемой РЦ, на 10 %
В системе водоснабжения:	
Установка аэраторов в административных и жилых корпусах	Улучшение качества воды; Снижение рисков возникновения аварийных ситуаций на трубопроводах; Снижение потерь тепловой энергии
Регулирование гидравлического режима в системе водоснабжения в учебно-административных корпусах	Экономия тепловой энергии на нагрев горячей воды
Ремонт системы водоснабжения (замена аварийных участков трубопроводов в количестве 6 % от общего количества, восстановление тепловой изоляции на трубопроводах ГВС и системы отопления в неотапливаемых подвальных помещениях в количестве	Снижение рисков возникновения аварийных ситуаций на трубопроводах
Внедрение системы автоматизации и интеллектуального мониторинга инженерных систем и оборудования на базе ПО «Пирамида 2.0»	

В целом существенный запас проектных нагрузок можно объяснить перспективным развитием островной территории г. Владивостока, о чем свидетельствует план мероприятий по реализации концепции развития о. Русский (распоряжение правительства РФ от 23 ноября 2019 г. № 2797-р). Что касается ДВФУ, учтены большие мощности при пусках лабораторного оборудования, научная установка класса «Мегасайенс», многотысячная численность проживающих, гостей, постоянная интенсивность в работе, автономность, что подтверждает проведенный энергетический анализ суммарной тепловой нагрузки зданий [4], а именно существенную невязку тепловых нагрузок – между проектной и фактической часовой:

- общеуниверситетский студенческий центр (корпус 24) – в 9 раз;
- естественно-научный учебный корпус ДВФУ (корпус 12) – в 6 раз;
- конференц-центр (корпус 20) – в 4,5 раза.

При отсутствии данных о фактическом теплоснабжении, при неисправности УУТЭ более 15 суток расход тепловой энергии потребителем пересчитывается на нормативные условия от базового показателя, основанного на проектных значениях [Правила коммерческого учета тепловой энергии, теплоносителя № 1034 от 18.11.2013 г.]. В результате в счетах за потреблённые энергетические ресурсы могут отражаться излишние миллионные затраты, пропорциональные вышеизложенным превышающим значениям.

Широко известный факт, что к показателям, характеризующим величины расхода энергетических ресурсов в здании, относятся нормируемые показатели суммарных удельных годовых расходов тепловой энергии на отопление, вентиляцию и ГВС.

Расчёт удельных характеристик [4] раскрывает, что тепловые нагрузки на отопление и вентиляцию по корпусам близки, невязка выявлена в значениях на ГВС и при пересчете показателей с поправочным коэффициентом на численность, проектные величины теплоснабжения по корпусам в среднем выше в 2 раза.

Неоспоримо напрашивается требование об актуализации проектных значений к реальным показателям теплоснабжения, о проведении работ по нормированию и согласованию обновленных базовых удельных показателей для повышения энергетической эффективности кампуса ДВФУ. И при осуществлении вышеописанных изменений будут внесены правки в тарифное дело энергоснабжающих компаний, запустится механизм качественных изменений в энергетическом комплексе не только университета, но и региона в целом. Что ещё раз доказывает важность величин фактического теплоснабжения как показателя качества и надежности проектирования и энергоэффективности.

Достаточно интересный факт: большинство руфтопов в плоть до 2022 г. работало в минимальном режиме, некоторые отключены, и полная рабочая нагрузка на систему ВиК составила менее 10 % от всей электрической нагрузки корпуса А. После включения системы ВиК до номинальных значений нагрузка на систему увеличилась в разы и заняла уже свыше 50 % от общей электрической нагрузки корпуса А.

Назревает вопрос о целесообразности огромного резерва мощности оборудования ВИК и допущение простоя нового оборудования порядка 10 лет, а также исправление данной ситуации в направлении энергосбережения и повышения энергетической эффективности путем реализации свободной мощности крышных кондиционеров на замещение тепловой энергии из водяных систем на тепловую энергию из горячего воздуха.

Таблица 2. Итоговые данные свободной мощности согласно расчету

Table 2. Total data of available power according to calculation

Корпус	Максимальная мощность вентиляционного оборудования, Гкал/час	Свободная мощность вентиляционного оборудования для замещения, Гкал/час	Требуемая мощность для замещения, Гкал/час
Корпус 20 (B, D, S)	7,568	4,904	1,339
Корпус 12 (C, E)	1,843	1,194	1,110
Корпус 24(A)	3,162	2,049	0,612
ИТОГО	12,573	8,147	3,062

Для внедрения КЭЭМ произведён расчёт [2], обосновывающий существенную экономию финансовых затрат (в миллионном порядке) за один месяц переходного периода. Ориентировочная стоимость тепла на газе (без учёта потребленной электрической энергии) составляет 1317,50 руб./Гкал против 3675,87 руб./Гкал. Итоговые данные свободной мощности представлены в табл. 2.

Стоит отметить, что расчет достаточно детален и точен (со сверкой максимальных фактических и проектных данных), но носит укрупненный характер, так как не внесен коэффициент, учитывающий реальные условия инженерных систем и конструкций, а именно:

- аудитории, в которых не установлены руфтопы;
- аудитории с совмещением водяного отопления (радиаторы) с водяной и газовой вентиляциями;
- 12 уровней 12 корпуса, обладающие большими площадями панорамного остекления.

Для того чтобы в полной мере судить о сокращении затрат, с учётом индивидуальных особенностей зданий, кратности циркуляции от объема посещаемости, в период с 31.10.2020 г. по 23.12.2020 г. проведен I этап исследования параметров работы калориферов и оценки сжигания газового топлива, а также определения эколого-экономической эффективности работы центральных кондиционеров York DM в режиме нагрева воздуха. Проведено техническое обследование 98 шт. газовых калориферов (43 % от общего числа) [5] и установлено:

- 9 блоков не удалось ввести в эксплуатацию по различным техническим причинам (автоматика выдает ошибку, отсутствует дымовая труба и др.);
- 12 блоков имеют серьезное превышение ПДК оксида углерода в продуктах сгорания;
- 77 блоков находятся в исправном состоянии, КПД устройств и концентрация загрязняющих веществ в продуктах сгорания находятся в допустимых значениях.

После прохождения технического обслуживания (очистка газового оборудования, настройка регулятора давления газа) у 5 блоков удалось снизить концентрацию CO до допустимых значений, однако в ряде случаев при этом снизился КПД воздухоподогревателей, незначительно ниже требуемых нормативных значений [ГОСТ 31848–2012 Оборудование промышленное газоиспользующее. Воздухонагреватели].

В результате обследования проведена наладка и регулировка газового оборудования, составлен план рекомендаций по ремонтным работам калориферов и технического обслуживания.

Следующий этап технического обследования незадействованных крышных кондиционеров назначен на 2024 год. После подведения итогов реализации Программы, внесения корректировок в связи с обновленными статистическими данными, изменениями в работе оборудования и инженерных систем актуализация Программы на 3-годовой период и прогноз, связанный с выходом ДВФУ на федеральный оптовый рынок электрической энергии, повлекут за собой снижение тарифа на электрическую энергию на 14 %.

Также разрабатывается пособие с целью включения в образовательный процесс по профильным предметам практических занятий с использованием объектов энергетической инфраструктуры и их наладки, что повлечет за собой увеличение эксплуатационной наработки Программы.

Первые итоги реализации мероприятий по повышению энергетической эффективности

На сегодняшний день имеются в полном объёме статистические данные для подведения первых промежуточных итогов реализации Программы. Финальный же результат не настанет, потому что актуализация и развитие Программы идут в ногу со временем и прогрессируют до тех пор, пока технико-экономические показатели не достигнут своего оптимального значения и не смогут быть сокращены.

Потребление энергоресурсов в 2019–2020 гг. достаточно специфичное в связи с самоизоляцией и дистанционным образованием, по причине распространения коронавирусной инфекции COVID-19, также в этот период имело место осуществление пилотных ЭЭМ. Поэтому для сопоставления промежуточных результатов действия Программы приняты фактические натуральные показатели полного 2022 календарного года, в сравнении с аналогичным периодом до внедрения новых ЭЭМ, согласно Программе 2018 г., а также по причине того, что количество проживающих в гостиничных корпусах в 2018 г. сопоставимо с 2022 г. (11 715 и 11 607 соответственно).

За счет реализации Программы зафиксировано увеличение резерва тепловой мощности на 1,3 % (0,63 Гкал/ч), внушающий размер общего экономического эффекта в размере 85,4 млн руб. и снижение потребления энергетических ресурсов в 2022 г.:

- тепловая энергия на 15,8 %;
- электроэнергия на 3,5 %;
- водоснабжение и водоотведение на 15,6 %.

Требуемый финансовый эффект промежуточного этапа реализации Программы, который должен быть не менее 25,4 млн руб., достигнут, отражая достижение целевых показателей Программы (далее по тексту – ЦП) и подтверждая правильный вектор реализуемых ЭЭМ.

По тепло- и водопотреблению фактические показатели превышают ЦП в десятки раз. ЦП по потреблению электроэнергии (2 330 тыс.кВт*ч) не достигнут (факт 1 369 тыс.кВт*ч) по причине не учтённых в Программе затрат на электроэнергию, связанных с КЭЭМ. Данная погрешность учтена в дальнейшей работе и существенно не отразится на итоговой картине реализации Программы.

Также необходимо отметить, что зафиксировано превышение потребления природного газа на 300 тыс.м³ от базового периода (2018 г.) по причине дополнительной работы системы

вентиляции и кондиционирования (далее – ВИК), направленной на выполнение КЭЭМ и дополнительной реализации 663 Гкал.

Тесная взаимосвязь мероприятий, направленных на сбережение разных энергоресурсов, и их комбинирование в общий положительный баланс

Имея высокий потенциал КЭЭМ продолжает детально прорабатываться. Проводится экспериментальное переключение нагрузок для подтверждения расчётных величин с целью повышения энергетической эффективности систем теплоснабжения и ВИК объектов ДВФУ, что отражается на улучшении показателей микроклимата в аудиторном фонде, а также уменьшении затрат на тепловую энергию.

Как было замечено выше, действие КЭЭМ существенно сказывается на ЦП других энергетических ресурсов, и эта тесная взаимосвязь мероприятий требует грамотного комбинирования и учета всех взаимосвязей в общий положительный баланс.

Стоит отметить, что для увеличения теплосъема и скорости реагирования при дистанционном управлении КЭЭМ комбинируется с двумя ЭЭМ Программы. Иначе возможно недостижение ЦП.

Одно из них – модернизация системы автоматики в ИТП путем регулирования режима потребления тепловой энергии, а именно ограничением циркуляции теплоносителя, размер уменьшения теплоснабжения за год в среднем составляет 1900 Гкал, в денежном выражении экономия составляет порядка 6,7 млн руб. [6].

На сегодняшний день изменение параметров автоматического регулирования на поддержание заданных режимов работы теплообменного оборудования возможно в каждом ИТП кампуса ДВФУ. Выполнена замена контроллеров управления режимами работы.

Третьим звеном в данном комплексе, которое объединяет мероприятия Программы по всем направлениям, – внедрение системы автоматизации и интеллектуального мониторинга инженерных систем, оборудованного на базе программного обеспечения «Пирамида 2.0» (далее – ПАК). До реализации Программы университет имел упрощенную систему диспетчеризации с 30-минутными-часовыми запозданиями от реального времени.

Важная роль ПАК обусловлена поддержанием комплексных методов и алгоритмов верификации данных:

- контроль полноты собранных данных;
- контроль уставок (минимум и максимум, резкие изменения значений профиля нагрузок) и небалансов (подстанций, шин и т.п.);
- контроль потребления энергоресурсов;
- анализ журналов событий, сравнение с данными из резервных источников информации;
- контроль сходимости профиля нагрузок с другими результатами измерения;
- контроль соответствия результатов измерения состоянию генерирующего оборудования;
- контроль параметров качества электроэнергии;
- контроль соответствия результатов измерения (изменяющийся во времени), используемым схемам измерения.

На данный момент проводится замена и ввод в ПАК приборов учета, контроллеров, установлены тревоги по превышению/понижению пофазного напряжения в ВРУ корпуса 24(А) и настройка контроля параметров качества энергии, что приведет к детальному графическому анализу потребляемой энергии с привязкой к оборудованию и дистанционному управлению инженерными системами ДВФУ.

Планы исследований до 2030 года

Настройка мониторинга и детального анализа потребляемой тепловой энергии: подключение тепловычислителей объектов кампуса к ПАК, в совокупности с универсальными датчиками контроля микроклимата ПАК, позволит оперативно корректировать фактический режим потребления тепловой энергии не только в зависимости от заданных температурных графиков, а от фактической температуры в помещениях кампуса, что обеспечит создание комфортных условий в помещениях. Также развитие ПАК направлено на автоматическое сезонное (фасадное) регулирование микроклимата в зависимости от изменения погодных условий и расположение аудиторий по сторонам света (южные, северные, муссонные).

По результатам тепловизионного обследования 32 корпусов кампуса (проведенного в 2021 г.) определено некорректное выполнение ограждающих конструкций, влияющее на смещение точки росы внутрь помещения, что приводит к образованию дефектов как на поверхности фасада, так и внутренних слоев ограждающих конструкций (зависит от температуры наружного воздуха. На момент обследования точка росы находится на внутренней поверхности здания), которые вызывают:

- разрушение отделочного покрытия стен, отслаивание штукатурного фасада и отделки цоколя ввиду утяжеления материала утеплителя и расширения накопившейся влаги при замерзании;
- проникновение и накопление влаги в утеплителе фасада и потерю теплоизоляционных свойств;
- появление следов замокания, протечек, грибка и трещин на внутренних поверхностях стен ввиду конденсации на данных поверхностях влаги и нарушении паропроницаемости стен;
- коррозию металлического каркаса здания;
- коррозию металлического профиля подвесных стеновых и потолочных систем из гипсокартона (выполнена вся внутренняя отделка здания);
- коррозию токоведущих частей электроустановочных изделий, что, в свою очередь, может повлечь излишний нагрев и возгорание.

Вышеописанные дефекты ограждающих конструкций не соответствуют требованиям ГОСТ 30494–2011. «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях».

При внутренней температуре ограждающих конструкций +15 °С и менее градусов невозможно обеспечить требуемый микроклимат в помещениях корпуса, независимо от интенсивности работы штатных систем отопления.

Среднее фактическое сопротивление теплопередачи стен значительно меньше нормируемого значения приведенного сопротивления теплопередаче стены [СП 50.13330.2012], вследствие чего потери тепла через стены выше нормативных.

Для прекращения распространения подобных дефектов и восстановления работоспособности фасада запланировано выполнить комплексный капитальный ремонт фасадов зданий

с полной заменой всей конструкции фасада на навесной вентилируемый фасад, исключающий возможность накопления влаги в утеплителе и, как следствие, препятствующий появлению вышеописанных дефектов, что позволит снизить потребление тепловой энергии на 35 %.

Многообещающая модернизация запущена в феврале 2023 г. – система контроля и управления доступом по биометрическим данным (face id) для пропуска в учебно-административные корпуса университета. Нововведение планируется задействовать в уменьшении затрат на содержание и эксплуатацию инфраструктуры ДВФУ за счет алгоритма в математической модели: соотношения площадей инженерных конструкций к плотности распределения учащихся, посетителей (благодаря расписанию, аналитики данных посещаемости пропускной системы); модель сможет запускать автоматическое управление освещением, оптимизировать работу систем теплоснабжения и ВИК [7, 8].

Подведение итогов исследования

Как мы видим, повышение эффективности энергосбережения изолированного объекта (на примере кампуса ДВФУ) – это мультинаправленный, ёмкий и постоянно развивающийся процесс. Предельные значения потенциала возможного энергосбережения оцениваются с помощью результатов отбора, полученных математической моделью методом многофакторного регрессионного анализа (регрессионный анализ excel) и искусственных нейронных сетей (на основании макроса excel прогнозирования спроса на энергоресурсы, прошедшего государственную регистрацию). Тип сети – персептрон. Метод обучения – Resilient Propagation. Предлагаемое планирование энергопотребления взаимосвязано не только на температурном графике, но и на основании большого множества статистических и физических решающих факторов, входящих в уравнение многовариантного анализа [9].

В разработке, в аналитике, в тестировании и пуско-наладочных работах ЭЭМ Программы, а также в разрешении поставленных энергоэффективных задач и неувязок задействована сплоченная группа технических специалистов различных направлений, эксплуатационный персонал и научно-педагогический состав университета.

Именно поэтому результаты расчетов хорошо согласуются с данными эксплуатации: реализация свободной мощности крышных кондиционеров рационально применена на частичное замещение тепловой нагрузки из водяных систем на вентиляционный обогрев (газ), в комбинации с осуществлением интеллектуального онлайн-надзора за комплексным состоянием энергохозяйства университета в целом, что в результате приводит к существенной разнице в стоимости покупаемой тепловой энергии, отпущенной от мини-ТЭЦ, и вырабатываемого теплового потока собственными мощностями ДВФУ и, как следствие, приносит экономическую выгоду и эффективное задействование работы инженерного оборудования в полной мере, достигнув проектных величин и нормативов для университета фактическими значениями, не забывая о максимальном комфорте сотрудников, студентов, гостей и партнеров университета.

Список литературы / References

[1] Полей А. К., Штым К. А., Гончаренко Ю. Б. Анализ эффективности и опыт эксплуатации объектов распределённой когенерации на о. Русском. *Журнал Электрические станции*, 2020, 3,

17–21 [Polyei A. K., Shtym K. A., Goncharenko Yu. B. Analysis of efficiency and operating experience of distributed cogeneration facilities on the island. Russian. *Journal of Electric Power Plants*, 2020, 3, 17–21 (in Rus.)].

[2] Терёшина Д. В. Замещение тепловой энергии из водяных систем на тепловую энергию из горячего воздуха системы кондиционирования на объектах кампуса ДВФУ. *Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума «Наука и инновации-современные концепции»*. Москва, 2020, 1, 125–132 [Tereshina D. V. Replacement of thermal energy from water systems with thermal energy from hot air of the air conditioning system at FEFU campus facilities. *Collection of scientific articles based on the results of the International Scientific Forum «Science and innovation – modern concepts»*. Moscow, 2020, 1, 125–132 (in Rus.)].

[3] Tereshina D. V., Goncharenko Y. B., Taranenko O. I. Replacing thermal energy from water systems with thermal energy from hot air of decentralized heating systems at the far eastern federal university. *Collection of selected articles based on the materials of scientific conferences of the State Research Institute “National development”*. Saint Petersburg, 2021, 1, 182–185.

[4] Терёшина Д. В. Сравнительный анализ теплопотребления корпусов кампуса ДВФУ. *Материалы региональной научно-практической конференции «Молодежь и научно-технический прогресс»*. Владивосток, 2021, 1, 244–247 [Tereshina D. V. Comparative analysis of heat consumption of FEFU campus buildings. *Materials of the regional scientific and practical conference «Youth and scientific and technological progress»*. Vladivostok, 2021, 1, 244–247. (in Rus.)].

[5] Еськин А. А., Байдак В. В., Слабуха Г. А., Капитула А. В. Отчёт по результатам технического обследования газовых калориферов центральных крышных кондиционеров York DM (1-й этап). *Политехнический институт Департамент энергетических систем ДВФУ*, Владивосток, 2020. 25 с. [Eskin A. A., Baydak V. V., Slabukha G. A., Chapter A. V. report on the results of technical inspection of gas heaters of central rooftop air conditioners York DM (1ststage). *Polytechnic Institute, Department of Energy Systems, FEFU*. Vladivostok, 2020. 25. (in Rus.)].

[6] Терёшина Д. В. Расчет регулирования тепловой нагрузки системы теплоснабжения на примере объектов кампуса ДВФУ. *Сборник докладов молодежной научно-технической конференции «Современные задачи автоматизации»*. Москва, 2020, 1, 83–88 [Tereshina D. V. Calculation of regulation of the heat load of the heat supply system using the example of FEFU campus facilities. *Collection of reports of the youth scientific and technical conference «Modern problems of automation»*. Moscow, 2020, 1, 83–88 (in Rus.)].

[7] АО «ИД «КОМСОМОЛЬСКАЯ ПРАВДА». Эффективно использовать каждый квадратный метр: «Умный кампус» появился в ДВФУ при помощи Сбера [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.kp.ru/daily/27554/4822057/> – Заглавие с экрана. [JSC “ID “KOMSOMOLSKAYA Pravda”. Effectively use every square meter: “Smart Campus” appeared in FEFU with the help of Sber [Electronic resource] – Access: <https://www.kp.ru/daily/27554/4822057/>

[8] ДВФУ. Сбер и ДВФУ открыли Ситуационный центр для управления инфраструктурой «Умного кампуса» [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.dvfu.ru/news/fevu-news/sber_i_dvfu_otkryli_situatsionnyy_tsentr_dlya_upravleniya_infrastrukturoy_umnogo_kampusa/ – Заглавие с экрана. [FEFU. Sber and FEFU opened a Situation Center to manage the Smart Campus infrastructure [Electronic resource] – Access: https://www.dvfu.ru/news/fevu-news/sber_i_dvfu_otkryli_situatsionnyy_tsentr_dlya_upravleniya_infrastrukturoy_umnogo_kampusa/

- [9] Терёшина Д. В. Использование математической модели для оптимального управления энергопотреблением кампуса ДВФУ. *Материалы региональной научно-практической конференции «Молодежь и научно-технический прогресс»*. Владивосток, 2022, 1, 459–464 [Tereshina D. V. Application of a mathematical model for optimal energy management of FEFU campus. *Materials of the regional scientific and practical conference «Youth and scientific and technological progress»*. Vladivostok, 2021, 1, 459–464. (in Rus.)].

Radio Location & Radio Navigation
Радиолокация и радионавигация

EDN: NGUPSM

УДК 528.88

**Atlantic Ocean Zones That Are Quasi-Stationary
in Terms of Surface Temperature Dynamics
(Based on Satellite Monitoring Results)**

**Galina S. Vysotskaya, Tamara I. Pisman,
Irina Y. Botvich* and Anatoliy P. Shevyrnogov**
*Institute of Biophysics SB RAS
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 13.01.2024, received in revised form 18.01.2024, accepted 23.02.2024

Abstract. Using data from the MODIS-Aqua satellite scanner, seasonal changes in ocean surface temperature (OST) in the Atlantic Ocean for the period 2003–2019 were studied. Based on these data, quasi-stationary zones were calculated based on the average monthly ocean surface temperature using the moving window variance method. Zones were identified that are quasi-stationary in terms of the seasonal dynamics of OST and that correspond to the present position of current boundaries. Significant differences in ocean surface temperatures were revealed. Areas in the ocean were identified that differ in absolute OST values, but have similar seasonal dynamics, as well as areas with different seasonal OST dynamics. An interesting fact has been revealed when currents that geographically continue each other do not always coincide in seasonal dynamics. For example, at the boundary of the North Atlantic Current and the Gulf Stream, there is a vast zone with no stable seasonal dynamics. The possibility of using this method for monitoring of mixing zones that arise at the boundaries of currents was shown.

Keywords: Atlantic Ocean, ocean surface temperature (OST), quasi-stationary zones, MODIS-Aqua, seasonal dynamics.

Acknowledgements. The research was carried out within the framework of a state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 0287–2021–0018).

Citation: Vysotskaya G. S., Pisman T. I., Botvich I. Y., Shevyrnogov A. P. Atlantic Ocean zones that are quasi-stationary in terms of surface temperature dynamics (based on satellite monitoring results). J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 17(2), 205–213. EDN: NGUPSM



Квазистационарные по динамике поверхностной температуры зоны в Атлантическом океане (по результатам спутникового мониторинга)

Г. С. Высоцкая, Т. И. Письман,
И. Ю. Ботвич, А. П. Шевырных
Институт биофизики СО РАН
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. По данным спутникового сканера MODIS-Aqua исследуются сезонные изменения температуры поверхности океана (ТПО) в Атлантическом океане за период 2003–2019 гг. По этим данным вычислены квазистационарные зоны по среднемесячной температуре поверхности океана с помощью метода скользящего окна дисперсии. Выделены зоны, квазистационарные по сезонной динамике ТПО, соответствующие текущему положению границ течений. Обнаружены существенно значимые перепады температур поверхности океана. Выделены участки в океане, различные по абсолютным значениям ТПО, но с подобной сезонной динамикой, а также участки с различной сезонной динамикой ТПО. Выявлен интересный факт, когда течения, географически продолжающие друг друга, не всегда совпадают по сезонной динамике. Например, на границе Северо-Атлантического течения и Гольфстрима наблюдается обширная зона с отсутствием стабильной сезонной динамики. Показана возможность использования данного метода для мониторинга зон перемешивания, возникающих на границах течений.

Ключевые слова: Атлантический океан, температура поверхности океана (ТПО), квазистационарные зоны, MODIS-Aqua, сезонная динамика.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 0287–2021–0018).

Цитирование: Высоцкая Г. С. Квазистационарные по динамике поверхностной температуры зоны в Атлантическом океане (по результатам спутникового мониторинга) / Г. С. Высоцкая, Т. И. Письман, И. Ю. Ботвич, А. П. Шевырных // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(2). С. 205–213. EDN: NGUPSM

Introduction

The ocean is a self-organizing system that occupies most of the Earth's surface. It has a major influence on climate formation, which is due to the strong interaction between the atmosphere and the ocean.

The patterns of temperature, salinity, and chlorophyll concentration being formed on the ocean surface reflect the characteristics of the surface structure of the ocean. Ocean surface temperature (OST) is one of the most important parameters of the marine environment, allowing us to assess the significant influence of the ocean on the Earth's climate.

The problems of modern climate change and identifying the causes of climate change are among the most discussed. The main recognized factors of climate change are: 1) an increase in atmospheric air temperature due to an increase in the concentration of carbon dioxide, methane, and other greenhouse gases, and 2) “wave-like” fluctuations in air temperature at the Earth's surface with slow changes in OST.

The greatest attention has been drawn to the study of atmospheric air temperature. However, in recent years, the role of the ocean in modern climate change has attracted attention [1, 2]. One of the

factors accompanying these processes is the spatial variability of OST patterns since it is an indicator of such dynamic processes in the ocean as currents, turbulence, upwelling, etc.

Changes in the structure of the ocean surface layer are significantly associated with vertical movements of water, especially with the manifestation of such a process as upwelling. Due to the redistribution of horizontal flows associated with currents, frontal zones and frontal interfaces between water masses with significantly different properties are formed on the ocean surface [3].

The development of satellite methods for monitoring the state of the ocean opens up new opportunities for continuous monitoring of changes in the ocean. Analysis of the ocean's spatial structure makes it possible to timely detect and predict hazardous phenomena and trends on regional and global scales [4, 5]. Satellite methods make it possible to regularly obtain data on surface temperature over the entire ocean area.

It was previously shown that quasi-stationary zones (areas with a stable spatiotemporal structure of the seasonal dynamics of chlorophyll concentration in the surface layer of the ocean) can serve as a basis for characterizing fundamental biological and hydrological processes in the ocean [6]. Based on satellite data from CZCS (1978–1986) and SeaWiFS (1997–2010), zones in the World Ocean were discovered within which the seasonal dynamics of chlorophyll concentration changes quite smoothly. Areas where sudden, often chaotic changes occur, were also found.

The Atlantic Ocean covers all climate zones of the Earth. Within its boundaries, the interaction of ocean currents and air currents with significant differences in OST has determined significant climatic features: the entire southern part of the ocean is strongly influenced by the Antarctic continent. Seasonal fluctuations in temperature, salinity, oxygen saturation, and other indicators of ocean waters are much less pronounced than atmospheric ones. This feature is determined by the constant movement of water masses by ocean currents.

Changes in surface temperature affect almost all manifestations of ocean activity: the hydrosphere, ocean biosphere, hydrochemistry, etc. Hence it is clear that studying the stability of the spatial position of ocean currents is relevant. Their dynamics directly influences the climate and is an important indicator of global trends in atmospheric temperatures, such as warming of atmospheric air.

The purpose of this work is to identify and analyze the seasonal dynamics of the surface temperature of the Atlantic Ocean using MODIS/Aqua satellite data for the period 2003–2019.

Materials and methods

The object of study is the Atlantic Ocean, the second largest and deepest ocean after the Pacific Ocean.

The work analyzes monthly data from the MODIS-Aqua satellite scanner on the temperature of the surface layer of water with a resolution of 4320×2160 (9 km at the equator) for 2003–2019, obtained from the Ocean Color Data website [7].

Based on these data, quasi-stationary zones were identified for the monthly average ocean surface temperature using the moving window variance method with a window size of 21×21 pixels for each month. Then the average temperatures for each year were calculated.

Quasi-stationary zones (QSZ) are areas with a stable spatiotemporal structure of seasonal temperature dynamics in the surface layer of the ocean. The variance estimate characterizes the variability of the variable, in this case, ocean surface temperature, over a set of observations within a

selected square. Variance characterizes the degree of dispersion of individual values of a characteristic in the aggregate from the average value.

For those zones where the values of the variables inside the selected square change slowly, the values of the moving variance are insignificant, but increase sharply where the seasonal dynamics of the variables begins to change. Depending on the number of pixels inside the window, areas with different spatial characteristics are distinguished.

The moving variance method for isolating QSZ of chlorophyll concentration in the ocean was first used in 1996 [6]. A modification of this method also makes it possible to identify zones that are stable in terms of the seasonal dynamics of ocean surface temperature, within which the variance is small. At the boundary of quasi-stationary zones, there are frontal zones and interfaces in which the variance sharply increases.

Results and discussion

Ocean surface temperature characterizes the thermal state of the ocean's surface layer. It is determined mainly by the absorption of solar radiation, evaporation, and currents.

In Fig. 1, numbers from 1 to 8 mark characteristic quasi-stationary zones associated with various hydrological and hydrobiological features of the Atlantic Ocean. Blue color indicates zones with the same seasonal dynamics of ocean surface temperature (quasi-stationary) and with low variance. Transition areas between quasi-stationary zones are marked brown. They are characterized by high

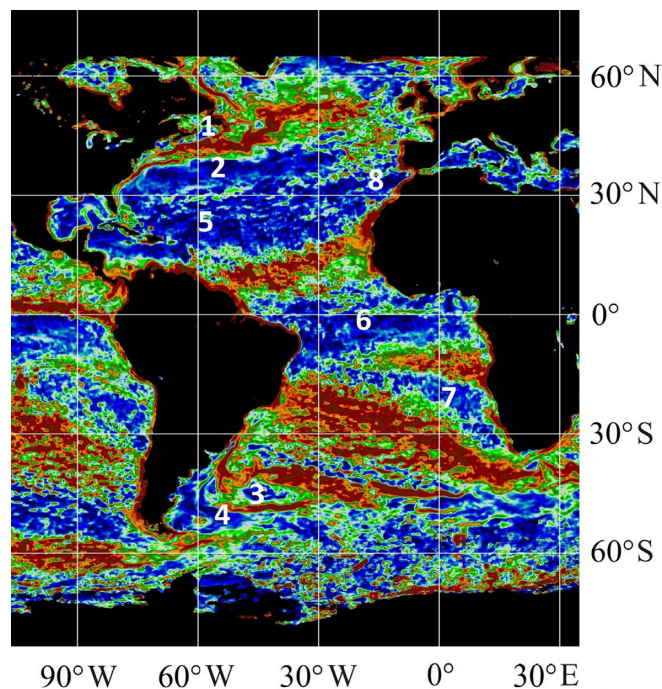


Fig. 1. The Atlantic Ocean: zones that were quasi-stationary in terms of ocean surface temperature in 2019: 1. The Labrador Current, 2. The Gulf Stream, 3. The Argentine Basin, 4. The Falkland Islands zone, 5. The southern part of the subtropical gyre, 6. The equatorial gyre, 7. The Benguela Current, 8. The Gibraltar region. The QSZ in which the variance is low are highlighted in blue. The transition zones in which variance is increased are highlighted in brown

variance. The variance increases sharply when crossing the interface of waters with different seasonal OST dynamics.

Using the example of the Atlantic Ocean, we can show quasi-stationary zones 1, 2, 3, and 4, the formation of which is associated with large ocean currents and ocean floor profiles. These are the Labrador Current, the Gulf Stream, the Argentine Basin, and the Falkland Islands zone. Mostly, their location remains unchanged (Fig. 2), although some movement of boundaries occurs. The use of this method made it possible to identify new zones in 2019: zone 5 (the southern part of the subtropical gyre) and zone 8 (the Gibraltar region).

As a result of the analysis, the seasonal dynamics of OST was revealed for quasi-stationary zones identified in the northern part of the Atlantic Ocean and its southern part. In the northern part of the ocean, the shape of the curves of seasonal temperature dynamics for quasi-stationary zone 5 (the southern part of the subtropical gyre) and zone 8 (the Gibraltar region) is similar, but the levels differ by 8 °C, which is quite significant (Fig. 3). This is due to the fact that water masses come to the Gibraltar area from the north, where the cold Canary Current begins.

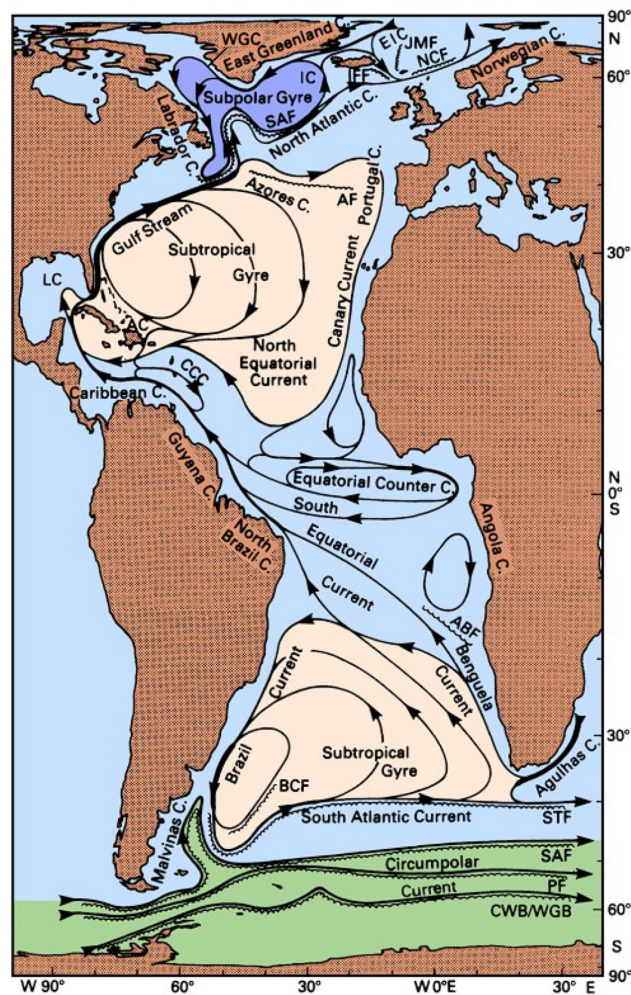


Fig. 2. Scheme of the main currents of the Atlantic Ocean

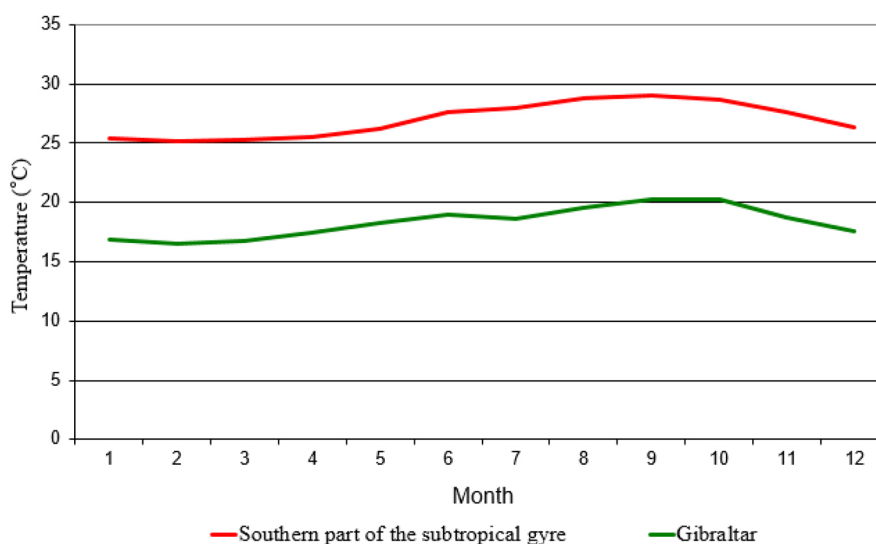


Fig. 3. Seasonal dynamics of ocean surface temperature for zone 5, the southern part of the subtropical gyre, and zone 8, the Gibraltar region

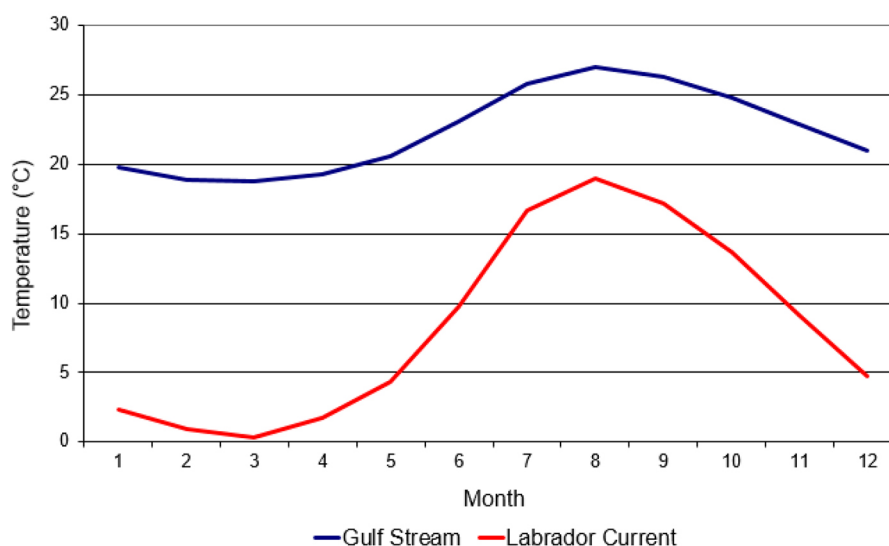


Fig. 4. Seasonal dynamics of ocean surface temperature for zone 2, the Gulf Stream, and zone 1, the Labrador Current

For quasi-stationary zone 1 (the Labrador Current) and zone 2 (the Gulf Stream), the seasonal dynamics of OST is different, in August the temperature is relatively similar, and in the winter months it differs by 18 °C. (Fig. 4). This is due to different temperatures and directions of currents.

The Labrador Current is a cold sea current in the Atlantic Ocean that flows southward from the Baffin Sea to the Grand Banks of Newfoundland. Accordingly, the temperature of the quasi-stationary zone associated with the Labrador Current approaches 0 °C in the winter months, rising to 19 °C in August.

The Gulf Stream is a warm sea current in the Atlantic Ocean. The temperature of the quasi-stationary zone associated with the Gulf Stream reaches 27 °C in August, and drops to temperatures close to 20 °C in the winter months.

Fig. 5 shows the seasonal dynamics of OST for quasi-stationary zones identified in the southern part of the Atlantic Ocean. An example has been revealed of how, in very close areas of the ocean for zones 3 (the Argentine Basin) and 4 (the Falkland Islands zones), the seasonal dynamics of OST differs in absolute values (the difference is 4 °C), but is similar in the dynamics of seasonal changes. At the same time, the temperature decreases in the summer and autumn months and increases in winter.

The Argentine Basin is an underwater basin in the southwestern part of the Atlantic Ocean. The depth of the basin reaches 6,681 m. There are seasonal changes in temperature and salinity of the surface layer, extending to a depth of approximately 200 m. Seasonal OST dynamics for the Argentine Basin is typical for the Southern Hemisphere: lowest in August and highest in February.

The Falkland Islands are an archipelago in the southwest Atlantic Ocean. It is influenced by powerful cold currents. One of them, the Falkland (Malvinas) current, runs from the Falkland Islands to the Rio de La Plata Bay.

Zone 6 (the equatorial gyre) and zone 7 (the Benguela Current) were also identified, in which the absolute values of the OST seasonal dynamics were quite close, but from September to December changes in the shape of the curve of seasonal temperature dynamics were observed (Fig. 6).

The equatorial gyre is determined by several factors, including temperature, humidity, and ocean currents. Warm surface water from the equator is carried by ocean currents to the poles, and cold water from the poles returns to the equator. This process regulates the Earth's climate and is an important part of the ocean water cycle.

The Benguela Current is a cold Antarctic current located near the South Equatorial and Brazil Currents. The Benguela Current is a special type of ocean current in which warm waters from the

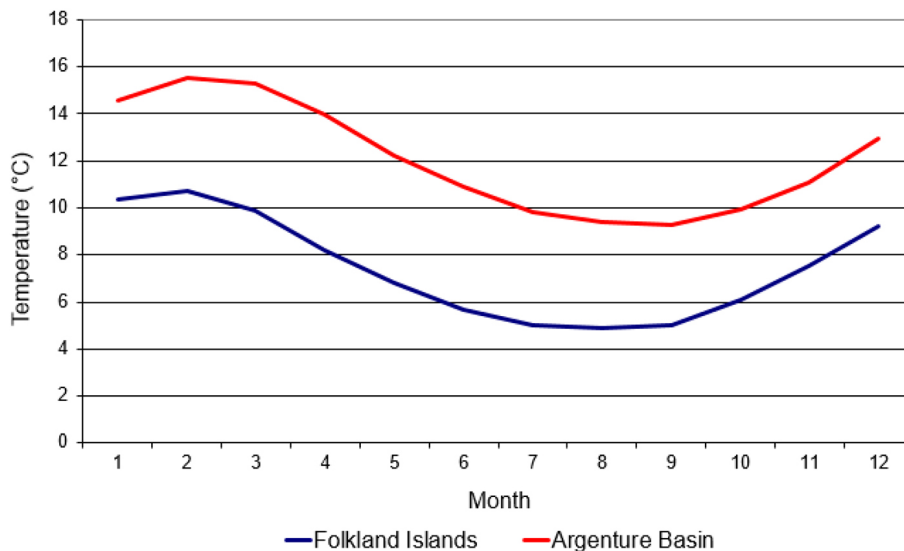


Fig. 5. Seasonal dynamics of ocean surface temperature for zone 3, Argentine Basin, and zone 4, Falkland Islands

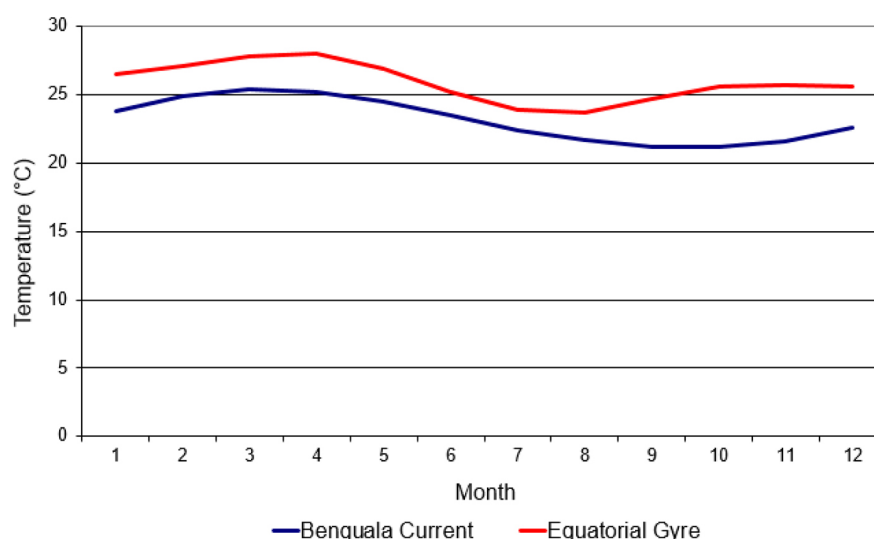


Fig. 6. Seasonal dynamics of ocean surface temperature for zone 6, the equatorial gyre, and zone 7, Benguela Current

western part of the ocean move towards the eastern part. Thus, it influences the distribution of heat in the ocean and atmosphere. This current has a significant impact on the climate, influencing weather conditions and, in turn, ecological systems [8].

Ocean surface temperature is determined by the dynamics of the structure of ocean waters and, in part, by latitude. It is possible to clearly observe the highest temperature values (+28–29 °C) at the equator and their decrease near the poles. The proximity of the cold Antarctica affects the rate of temperature decrease. To the south the decrease occurs much faster than to the north.

The dynamics of QSZ may also be associated with a disturbance in the location of the current. Currents have a huge impact on the redistribution of heat in the ocean [9]. In the northern hemisphere, the warm waters of the western part of the ocean go to the poles, and in the east, they return cooled to the equator. On the other hand, changes in the temperature of ocean currents may be the result of global warming, since their dynamics is significantly influenced by the salinity of ocean waters, which is decreasing due to the melting of ice in the Arctic and Antarctica. There may also be an effect of the decreasing temperature difference between the poles and the equator due to an increase in the greenhouse effect.

Conclusion

This article presents the results of calculations of seasonal changes in surface temperature of the Atlantic Ocean for the period 2003–2019 according to MODIS/Aqua satellite data. Based on the results obtained, the following conclusions were drawn.

- Identifying zones that are quasi-stationary in terms of the seasonal dynamics of OST makes it possible to identify areas that correspond to the present location of current boundaries.
- Significant differences in ocean surface temperatures were revealed. Areas were identified that differ in absolute temperature values, but have similar seasonal dynamics, as well as areas with different seasonal dynamics.

- An interesting fact has been revealed when currents that geographically continue each other do not always coincide in seasonal dynamics. For example, at the boundary of the North Atlantic Current and the Gulf Stream, there is a vast zone with no stable seasonal dynamics.
- The possibility of using this method for extensive mixing zones that arise at the boundaries of currents was shown.
- Express determination of quasi-stationary zones can be used in practice for ocean fisheries, as it marks frontal interfaces, zones that are potentially attractive due to increased productivity at upwellings.

References

- [1] Zhang R., Sutton R., Danabasoglu G., Kwon Y.O., Marsh R., Yeager S.G., Amrhein D.E., Little C.M. A review of the role of the Atlantic Meridional Overturning Circulation in Atlantic Multidecadal Variability and associated climate impacts. *Rev. Geophys.*, 2019, 57, 316–375. doi.org/10.1029/2019RG000644
- [2] Smeed D.A., Josey S.A., Beaulieu C., Johns W.E., Moat B.I., Frajka-Williams E., Rayner D., Meinen C.S., Baringer M.O., Bryden H.L., McCarthy G.D. The North Atlantic Ocean is in a state of reduced overturning. *Geophys. Res. Lett.*, 2018, 45, 1527–1533. doi.org/10.1002/2017GL076350
- [3] Kartushinsky A.V. The investigation on the dynamics of frontal zones in the ocean based on the numerical modelling, using the AVHRR satellite data. *Adv. Space Res.*, 2004, 7(33), 1173–1178
- [4] Khodyaev A.V., Shevyrnogov A.P., Vysotskaya G.S., Kozikova O.S. Using Moving Variance Method to Detect Ocean Currents from Space. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2011, 4(2), 179–184
- [5] Shevyrnogov A.P., Vysotskaya G.S., Shevyrnogov E.A. Spatial and temporal anomalies of sea surface temperature in global scale (by space-based data). *Adv. Space Res.*, 2004, 33, 1179–1183. doi:10.1016/S 0273–1177(03)00369–7
- [6] Shevyrnogov A.P., Vysotskaya G.S., Gitelson J.I. Quasistationary areas of chlorophyll concentration in the world ocean as observed satellite data. *Adv. Space Res.*, 1996, 18(7), 129–132
- [7] <https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/MODIS-Aqua/Mapped/Monthly/9km/>
- [8] <https://lagurus-shop.ru/bengelskoe-tecenie-i-ego-vliyanie-na-klimat>
- [9] Caesar L., Rahmstorf S., Robinson A., Feulner G., Saba V. Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature*, 2018, 556, 191–196. DOI: 10.1038/s41586–018–0006–5

EDN: OQZTKV

УДК 629.7.018

Overview of Known Power Methods for Measuring the Jet Thrust of Ion Engines: Torsion Pendulums

Igor S. Vavilov*,
Dmitry V. Lokotaev, Pavel S. Yachmenev,
Victor V. Fedyanin, Konstantin I. Zharikov,
Pavel V. Stepen and Anton I. Lukyanchik
*Omsk State Technical University
Omsk, Russian Federation*

Received 27.10.2023, received in revised form 13.01.2024, accepted 26.02.2024

Abstract. The paper presents an overview of the majority of existing designs of power stands based on a torsion pendulum designed to measure the thrust of ion thruster. 23 unique stand designs developed by various scientific groups are presented. The presented stands cover the range of steady-state loads of 10 nN to 4.5 N and thrust pulses in the range from 1 $\mu\text{N} \cdot \text{s}$ to 10 N $\cdot \text{s}$. The temporary section from 1971 to 2019 is covered. The methods of recording micro displacement of the sensing element, damping of parasitic vibrations and calibration of stands are shown. Data on errors in the measurement of traction by stands are presented.

Keywords: torsion pendulum, optical sensor, jet propulsion, ion thruster, calibration, LVDS, capacitive sensor.

Acknowledgements. The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 19–79–10038, <https://rscf.ru/project/19–79–10038/>

Citation: Vavilov I. S., Lokotaev D. V., Yachmenev P. S., Fedyanin V. V., Zharikov K. I., Stepen P. V., Lukyanchik A. I. Overview of known power methods for measuring the jet thrust of ion engines: torsion pendulums. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(2), 214–238. EDN: OQZTKV



Обзор известных силовых способов измерения реактивной тяги ионных двигателей: торсионные маятники

**И. С. Вавилов, Д. В. Локотаев,
П. С. Ячменев, В. В. Федянин,
К. И. Жариков, П. В. Степень, А. И. Лукьянчик**
*Омский государственный технический университет
Российская Федерация, Омск*

Аннотация. В работе представлен обзор большинства существующих конструкций силовых стендов на основе торсионного маятника, предназначенных для измерения тяги ионных двигателей. Представлено 23 уникальных конструкций стендов, разработанных различными научными группами. Данные стенды охватывают диапазон установившихся тяг от 10 нН до 4,5 Н и импульсов тяги в диапазоне от 1 мкН·с до 10 Н·с. Охвачен временной участок от 1971 до 2019 г. Показаны способы регистрации микроперемещений чувствительного элемента, демпфирования паразитных колебаний и калибровки стендов. Приведены данные по погрешностям измерения тяги стендами.

Ключевые слова: торсионный маятник, оптический датчик, реактивная тяга, ионный двигатель, калибровка, LVDS, ёмкостный датчик.

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

Цитирование: Вавилов И. С. Обзор известных силовых способов измерения реактивной тяги ионных двигателей: торсионные маятники / И. С. Вавилов, Д. В. Локотаев, П. С. Ячменев и др. // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(2). С. 214–238. EDN: OQZTKV

Введение

Ионные двигатели используются человечеством с 60-х годов XX века. С ростом интереса к малым космическим аппаратам микро- и нанокласса появилась потребность в соответствующих ионных двигательных установках. Миниатюризация ионных двигателей влечет проблему экспериментального определения их реактивной тяги. Тяга ионных двигателей очень мала и большинство устройств измерения силы тяги не способны регистрировать её. Поэтому задача точного определения силы тяги ионных микродвигателей является актуальной до сих пор.

Существует два подхода силового определения силы тяги: весовой метод (двигатель установлен подвижно) и аэродинамический метод (двигатель неподвижен). Традиционный весовой подход к измерению тяги основан на чувствительных весах тяги, на которых двигатель устанавливается во время измерения. Тяга измеряется непосредственно с использованием третьего закона Ньютона, т.е. абсолютные значения импульса массы выбрасываемого топлива в единицу времени и силы, действующей на систему баланса двигателя и тяги, равны. Балансы тяги обычно выполнены в виде висячего, обратного или крутильного маятника. Обычный висячий маятник не только является простейшей конфигурацией, но и наименее чувствителен к внешним возмущениям. Весовой метод реализуется в виде упорных стендов. В основе таких стендов лежат торсионные вертикальные (крутильные) маятники, маятники с непрямым уравниванием,

весы с двойным маятником и весы с магнитной левитацией. Чувствительными элементами в таких конструкциях являются лазерные интерферометры, волоконно-оптические датчики линейных перемещений (LDS), гетеродинные интерферометры, ёмкостные датчики, датчики дифференциального трансформатора линейного перемещения (LVDT). Недостатки этих элементов – чувствительность к электромагнитным помехам и ВЧ/СВЧ-полям, что наблюдается при испытаниях ионных двигателей с постоянной разностью потенциалов на электродах ионно-оптической системы (ИОС) и с СВЧ-генерацией плазмы.

Аэродинамический метод основан на определении силы давления ионной струи на чувствительный элемент, в результате чего элемент перемещается или деформируется. По величине перемещения или деформации определяется величина реактивной тяги. В источнике [1] представлены виды фундаментальных схем устройств измерения тяги микродвигателей (рис. 1). В источнике [1] аэродинамический метод именуется как метод измерения тяги с помощью мишени и является разновидностью маятникового метода. Возможности аэродинамического метода и маятникового в части измерения тяги и импульса двигателя равнозначны. Возможности метода измерения тяги с помощью качели шире других способов, так как он позволяет определять массовый расход рабочего тела.

В основе всех подходов лежат простые физические принципы, однако мизерность измеряемых силовых величин является главной сложностью подобного рода измерений. В основе разрабатываемых стендов должна сохраняться базовая простота принципа измерения, так как систем калибровки и эталонных воздействий таких малых величин сил (нН и мкН) не существует. Страховкой от ошибочной интерпретации результатов измерений является простота математического аппарата и ограниченное число факторов влияния.

Материал, представленный в этой статье, служит частью большого обзорного исследования силовых методов определения малых реактивных тяг. Данная статья рассматривает мировые

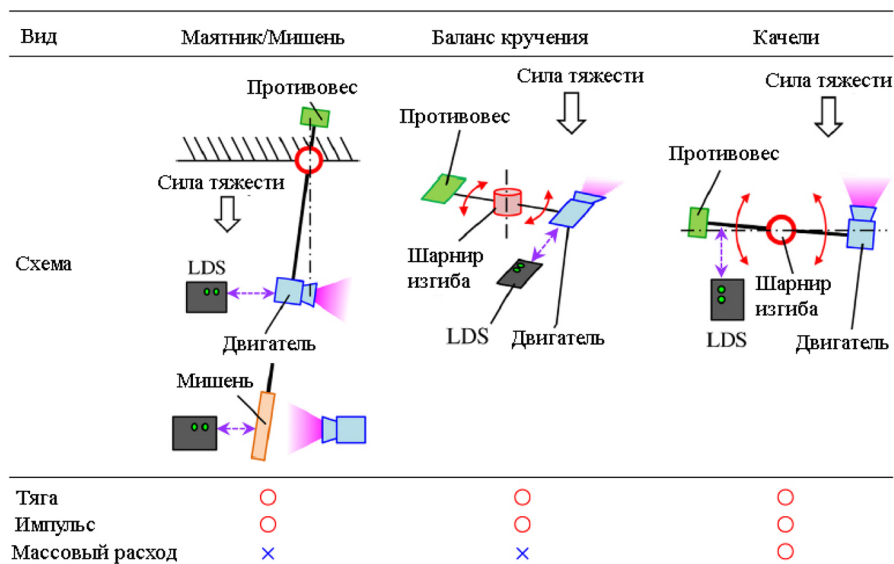


Рис. 1. Конструктивные схемы основных принципов измерения тяги и их возможности

Fig. 1. Design schemes of the basic principles of traction measurement and their capabilities

достижения в области торсионных маятниковых стендов (баланс кручения). Всё обзорное исследование даёт представление о современном состоянии дел в области стендового измерения микротяги ионных двигателей. Необходимость обзорной работы обусловлена тем, что авторы данной статьи ведут научные изыскания в области резонаторных СВЧ-ионных двигателей для малых космических аппаратов микро- и нанокласса и сами столкнулись с проблемой экспериментального определения уровня тяг ионных двигателей с энергопотреблением до 10 Вт. Данная категория двигательных систем имеет уровни тяг до 50 мкН. На материально-технической базе научно-исследовательской лаборатории «Двигательные установки микротяги малых космических аппаратов» разработан стенд измерения микротяги на основе силового аэродинамического метода. Данный стенд будет представлен в следующих опубликованных частях большого обзорного исследования.

Торсионные маятники (баланс кручения)

На основе торсионного маятника для измерения тяги двигательных установок MEMS (microelectromechanical systems) был разработан стенд nNTS (nano-Newton thrust stand) [2]. Для поддержки упорной стойки и обеспечения восстанавливающего усилия используются два изгибных шарнира (рис. 2). Постоянная упругости шарниров $0,0016 \text{ Н} \cdot \text{м}^0$. Стенд симметричен относительно оси вращения. Рычаги упорной стойки длиной 25 см от оси вращения. Для измерений тяги менее 1 мкН к стенду были добавлены удлинители, обеспечивающие большие отклонения. Схематично это показано на рис. 3. Измерения тяги включают в себя измерение углового смещения, возникающего в результате крутящего момента, приложенного к демпфированной поворотной системе. Определение углового отклонения заключается в измерении линейного перемещения на известном радиальном расстоянии с использованием датчиков LVDT.

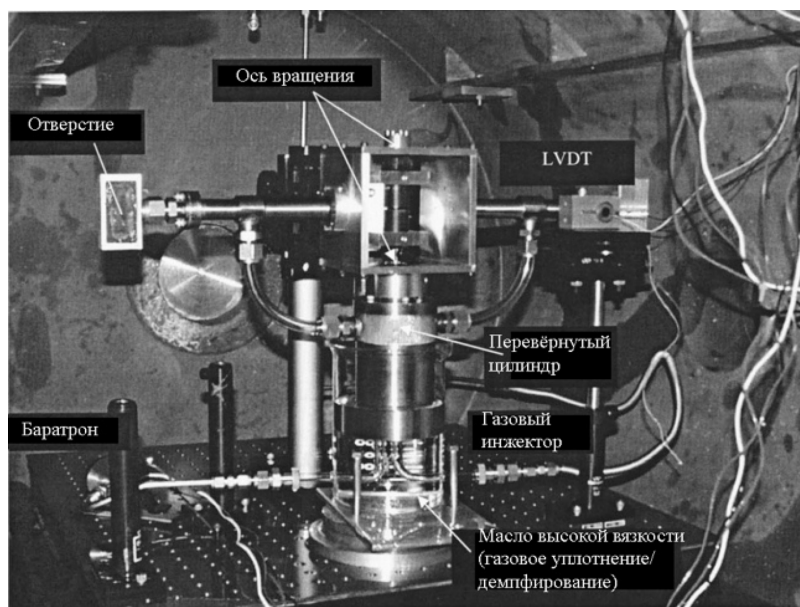


Рис. 2. Стенд nNTS в вакуумной камере

Fig. 2. nNTS stand in a vacuum chamber

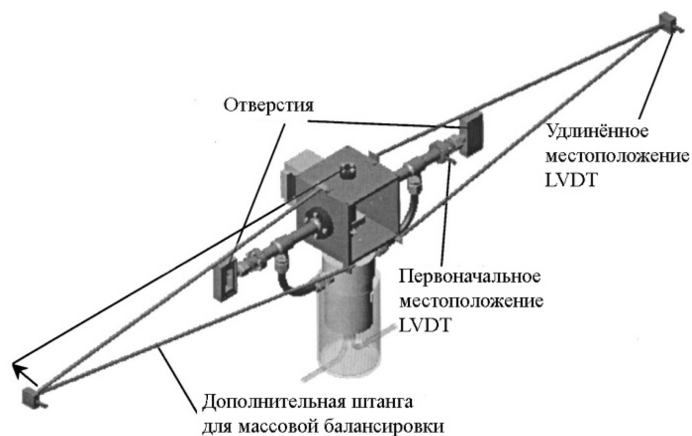


Рис. 3. Стенд nNTS с удлинителями

Fig. 3. nNTS stand with extension cords

Датчик LVDT расположен приблизительно в 19,7 см от оси вращения в стандартной конфигурации и в 61 см от оси вращения в конфигурации с вытянутой рукой. При уровне тяги 100 нН линейное перемещение на концах рычагов удлиненной конфигурации составляет приблизительно 0,264 мм.

Конструктивным ограничением для измерений тяги является невозможность прямого механического подключения линий подачи топлива или энергии к тяговому стенду. В стенде nNTS это достигается установкой нескольких ванн для жидкости. Назначение ванны с высоковязким маслом:

- газовое уплотнение, благодаря чему топливо, подаваемое в перевернутый цилиндр стенда (рис. 4), не выходит в окружающий вакуум иначе как через двигательную установку;
- вязкостный демпфер для системы упорной стойки.

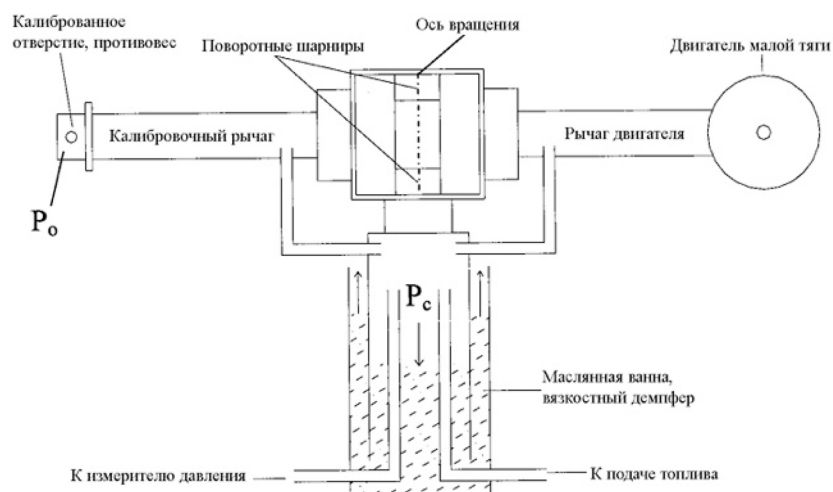


Рис. 4. Схема стенда с масляной ванной

Fig. 4. Diagram of the stand with an oil bath

Уровень вязкостного демпфирования меняется путем изменения высоты слоя масла по бокам перевернутого цилиндра.

Стенд позволяет проводить измерения уровня тяги до 86,2 нН с оценочной точностью $\pm 11\%$, уровни тяги в диапазоне от 712 нН до 1 мкН – с оценочной точностью в $\pm 2\%$. Стенд калибруется с использованием результатов прямого моделирования численных моделей Монте-Карло и аналитических решений для потока свободных молекул через калиброванное отверстие. Калибровочные газы – гелий, аргон, азот.

В работе [3] представлен упорный стенд, состоящий из четырёх компонентов: балансира, датчиков LVDT, электромагнитного демпфера и подвижного шарнира (рис. 5).

На крутильных весах установлен двигатель, а противовес находится с другой стороны. Ось вращения поддерживается двумя поворотными (торсионными) шарнирами. Отклонение весов обнаруживается с помощью датчика LVDT. Для подавления нежелательных вибраций, вызванных фоновыми колебаниями, установлен электромагнитный демпфер. Калибровка выполняется путем удара по упорной стойке ударным маятником. Ударный маятник ударяется о датчик силы, закрепленный на упорной стойке. Датчик силы записывает временную диаграмму силы импульса, интегрирование дает значение импульса. Воздействие варьировалось от 80 до 300 мкН·с путем изменения начального угла наклона маятника. Расстояние до двигателя составляло от 35 до 45 см в зависимости от конфигурации двигателя. Эффективный импульс, подаваемый на тяговый стенд, составлял 20–80 мкН·с. Стенд предназначен для измерения тяги импульсных микродвигателей: жидкостного импульсно-плазменного двигателя (LP-PPT) и абляционного лазерного микродвигателя. Точность упорного стенда составила 2,1 мкН·с в случае LP-PPT и 0,7 мкН·с в случае абляционного лазерного микродвигателя.

Ещё один торсионный стенд представлен в работе [4]. Тяговый стенд μ NTS (micro-Newton thrust stand) предназначен для измерения усилий, меньших 1 мкН, предпочтительно до 10 нН. На рис. 6 показана 3D-модель стенда.

Поперечная балка несимметрична с боков для оптимизации чувствительности в условиях ограниченного пространства. Медный блок, подвешенный на коротком конце поперечной балки, действует как противовес и уравнивает несимметричную балку. Пара алюминиевых

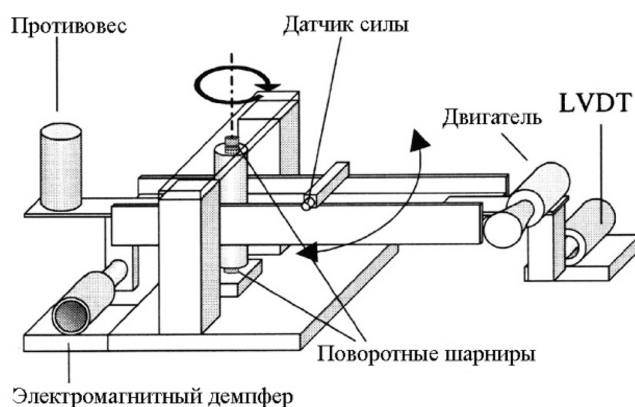
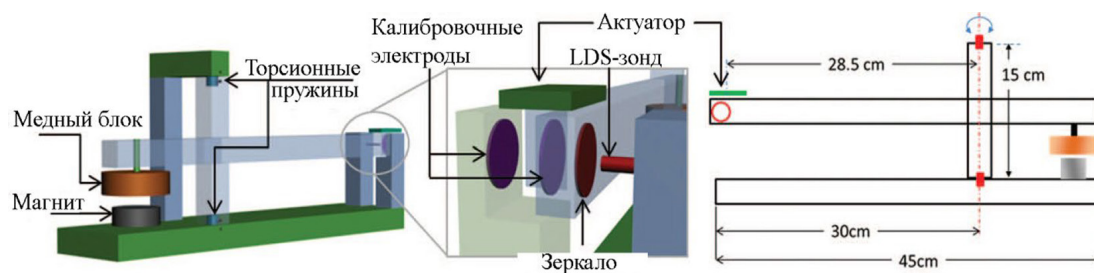


Рис. 5. Схематичное изображение стенда тяги

Fig. 5. Schematic representation of the traction stand

Рис. 6. 3D-модель стенда μ NTSFig. 6. 3D-model of the μ NTS stand

дисковых электродов обеспечивает известное усилие или контролируемое смещение для калибровки. Оптический датчик линейного перемещения (модель Philtec D-100) измеряет смещение балансира на определенное расстояние для расчета углового отклонения.

Для исследования коллоидного двигателя (тяга в диапазоне 2–13 мкН) и импульсного плазменного двигателя (импульсы до 19 мкН·с) был разработан стенд на основе крутильных весов [5]. Конструкция основана на торсионных шарнирах и электростатических силах (для калибровки и активного демпфирования). Стенд позволяет тестировать двигатели массой в несколько килограммов и измерять силы на уровне до 1 мкН с разрешением более 0,03 мкН. На рис. 7 представлена схема стенда.

Поворотный рычаг поддерживается алюминиевой рамой, закрепленной на вакуумной установке. Наклон рамы регулируется с помощью двух шаговых двигателей. Рычаг вращается вокруг оси, образованной двумя торсионными шарнирами, прикрепленными как к раме, так и к рычагу. Каждая ось может выдержать осевую нагрузку до 431 Н. Линейное смещение рычага с плечом 0,22 м от оси вращения измеряется датчиком LDS. Набор электродов (два обращенных друг к другу диска) использовался для калибровки смещения весов, возникающего в результате заданного крутящего момента. Один диск (диаметром 5,08 см) был прикреплен

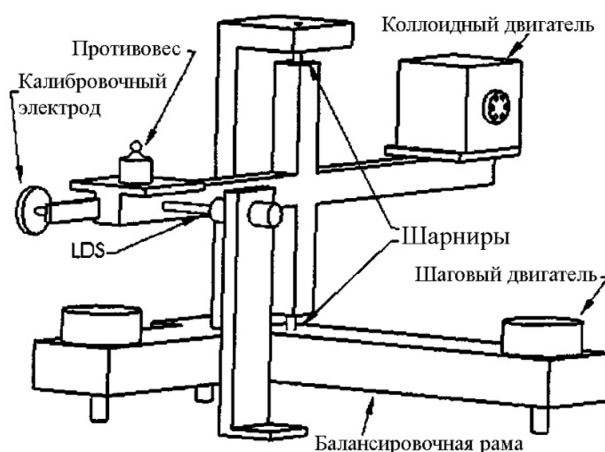


Рис. 7. Схема крутильных весов

Fig. 7. Scheme of torsion scales

к весам, второй диск (диаметр 1,9 см) был закреплен на внешнем позиционере. Зазор между дисками обычно составлял 1,10 мм (фактическое значение измерялось для каждой калибровки). Расстояние между осью дисков и осью весов составляло 0,266 м. Для балансировки применялась электростатическая сила по следующим причинам:

- она действует на расстоянии, т.е. между вращающимся рычагом и прижимным элементом нет физического контакта;
- электростатическая сила может быть точно рассчитана;
- ее амплитуду можно изменять «непрерывно»;
- ее временным изменением можно управлять в масштабах, значительно меньших, чем характерное время отклика весов.

Электростатическая сила на поверхности электродов была рассчитана с использованием программных пакетов MAXWELL 2D и MAXWELL 3D.

Диапазон измерений упорного стенда, представленного в [6], составляет 1...3000 мкН для стационарных измерений силы с точностью около 1 мкН при окружающем шуме. Основными элементами являются маятниковый рычаг, калибровочная катушка, демпфер, датчик смещения и два торсионных шарнира (рис. 8). Каждый шарнир имеет постоянную упругости $1,92 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}^0$. Датчик смещения в системе – емкостный сенсор, имеющий дальность действия 100 м и точность 2 нм. Демпфер состоит из круглого постоянного магнита и медной пластины, работает по закону Ленца, но также действует как противовес. Этот маятник выдерживает осевую нагрузку до 2 кг. Маятниковый рычаг длиной 50 см использовался для уравнивания силы тяжести и преобразования тяги в смещение.

В стенде реализован метод электромагнитной калибровки. Система калибровки для генерации внешнего возбуждения состоит из двух компонентов: постоянного магнита и медной катушки. Катушка закреплена на опорной пластине напротив магнита, закрепленного на стойке, и соединена с высокоточным источником тока, образуя систему магнит-катушка, обеспечивающую известное усилие от 2 до 10000 мкН. Плоский цилиндрический магнит изготовлен из сплава рубидия и никеля.

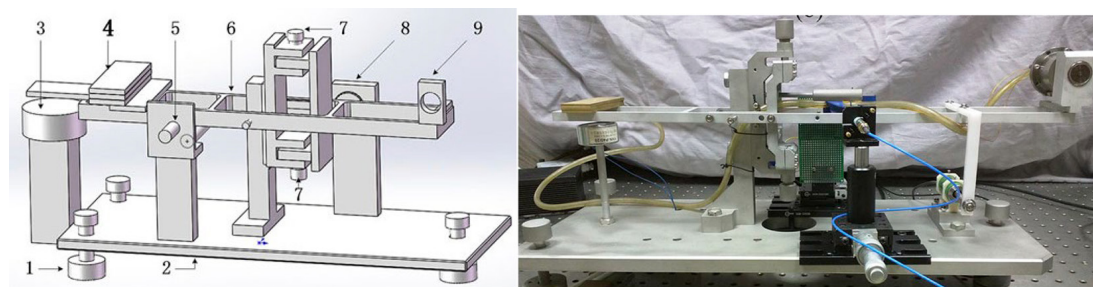


Рис. 8. Принципиальная схема и фотографическое изображение стенда: 1 – выравнивающий болт; 2 – опорная плита; 3 – демпфирующий магнит; 4 – противовес и демпфирующая пластина; 5 – датчик перемещения; 6 – маятниковый рычаг; 7 – ось поворота (пара); 8 – система калибровки; 9 – крепление подруливающего устройства

Fig. 8. Schematic diagram and photographic image of the stand: 1 – leveling bolt; 2 – base plate; 3 – damping magnet; 4 – counterweight and damping plate; 5 – motion sensor; 6 – pendulum lever; 7 – axis of rotation (pair); 8 – calibration system; 9 – thruster attachment devices

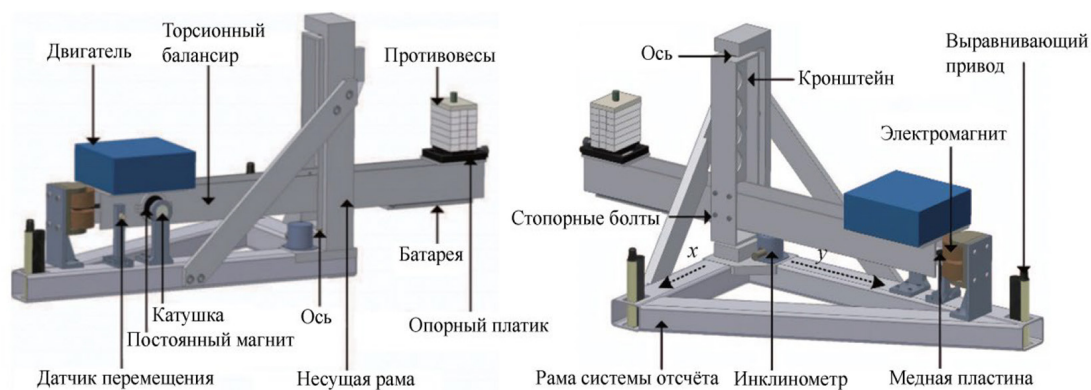


Рис. 9. 3D-изображение стэнда

Fig. 9. 3D-image of the stand

Пример ещё одного крутильного маятника представлен в источнике [7]. 3D-изображение стэнда показано на рис. 9.

Устройство состоит из следующих основных элементов: опорной рамы, емкостного датчика перемещения, катушки, демпфера и системы выравнивания. Опорная рама образует основание упорного стэнда. Опорный рычаг проходит через два шарнира, прикрепленных к опорной раме, один конец рычага поддерживает микродвигатель, другой поддерживает противовес, позволяющий компонентам достичь статического равновесия. Система отсчета должна быть выровнена как в направлении X, так и в направлении Y, чтобы обеспечить горизонтальную привязку. Система выравнивания состоит из двухосного инклинометра (Measurement Specialties, NS-5/DMG2-I, разрешение: $0,001^\circ$) и приводов выравнивания (Newport, LTA-HL, разрешение: 7,4 нм). Инклинометр измеряет углы наклона в направлениях X и Y системы отсчета, а приводы выравнивания регулируют углы.

Тяговый стэнд выдерживает нагрузку до 10 кг и теоретически может измерять усилие до 609,6 мкН с разрешением 24,4 нН. Статические калибровки были выполнены на основе калибровочного узла, состоящего из многооборотной катушки и постоянного магнита. Узел из многооборотной катушки и постоянного магнита также использовался в качестве возбудителя для имитации микродвигателя с целью дальнейшего исследования характеристик тяги. Были протестированы три набора силовых импульсов частотой 17; 33,5 и 55 Гц с одинаковой амплитудой и длительностью импульса. Ошибка повторяемости на каждой частоте составила 7,04 %, 1,78 % и 5,08 % соответственно.

Харбинский технологический институт разработал трехпроводное устройство для измерения силы кручения [8]. На рис. 10 представлена схема, где подруливающее устройство закреплено в плоскости кручения.

Торсионная платформа поднимается с помощью трех нитей, противовес уравнивает платформу. Создается равномерное усилие к трёхпроводной системе. Тяга, создаваемая работой двигателя, приводит к кручению. Поворотный стол отклоняется вместе с зеркалами, установленными на платформе. Величина отклонения определяется за счет смещения лазерного пятна на линейке. По величине отклонения определяется тяга. Стэнд является только механи-

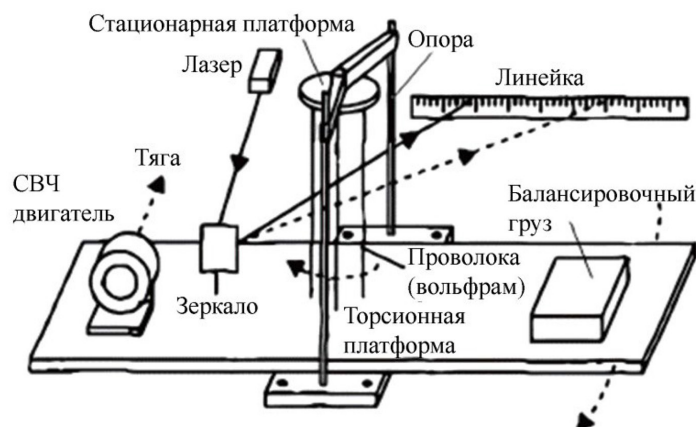
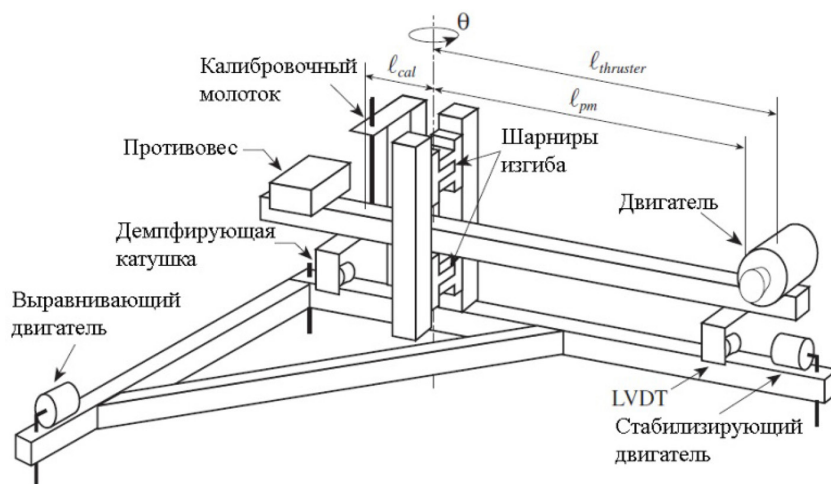


Рис. 10. Схема торсионного стенда с трёхпроводным подвесом

Fig. 10. Diagram of a torsion stand with a three-wire suspension

ческим устройством и поэтому не подвержен электромагнитным помехам. Калибровка производится изменением веса. Уменьшением силы трения в ролике можно добиться высокой точности измерения тяги [9]. В диапазоне тяги не менее 3 мН минимальная погрешность измерения прибора составляет 1,5 % [10].

Стенд для измерения тяги на уровне субмикроньютонов μTS , представленный в [11], использовался для оценки тяги пяти различных микродвигателей. Используя конструкцию крутильных весов, стенд способен измерять установившуюся тягу в 1 мкН с разрешением субмикроньютон и импульс в 1 мкН·с с разрешением субмикроньютон-секунды. Стенд (рис. 11) может поддерживать испытуемый объект массой до 10 кг, одновременно подводя к двигателю несколько диагностических линий, линий питания и топливоподдачи. Тяга, или импульс, измеряется путем контроля положения тягового рычага и использования откалибро-

Рис. 11. Конструкция стенда μTS Fig. 11. Construction of the stand μTS

ванной динамической модели. С помощью этого испытательного стенда были измерены характеристики вакуумно-дугового двигателя (VAT), импульсно-плазменного двигателя с газовым питанием (PPT), электродвигателя с эмиссионным излучением индия (In-FEEP), микродвигателя с испаряющейся жидкостью (VLM) и микродвигателя с холодным газом для подтверждения его точности.

В Центре космических полетов имени Годдарда НАСА создан стенд измерения тяги для двигателей, соответствующих требованиям проекта LISA [12]. Стенд представляет собой торсионные весы, в которых используется несколько методик, разработанных для измерения гравитационной постоянной Ньютона [6]. Стенд может работать в режиме разомкнутого контура или в активно управляемом нулевом режиме с использованием электростатических приводов для уравнивания крутящего момента от двигателя. Стенд использовался для измерения абсолютной тяги от 1 до 100 мкН с разрешением более 0,1 мкН, шума от усилия стационарного двигателя от 10^{-4} до 1 Гц и динамический отклик двигателя от 10^{-4} до 10 Гц. Маятник с упорной стойкой показан на рис. 12.

Стенд располагается внутри вакуумной камеры. Двигатель (поз. 1) установлен с одной стороны торсионного маятника. Напротив торсионной нити (поз. 7) установлен небольшой груз (поз. 2) для уравнивания веса двигателя. Угловое положение маятника контролируется с помощью автоколлиматора, направленного на зеркало (поз. 4) в центре маятника. Основная торсионная нить поддерживается более толстой нитью, которая изолирует тонкую нить от наклона. К толстой нити прикреплен гаситель вихревых токов для гашения колебаний. Четыре автономных электрода нацелены на корпус маятника (поз. 6) для приложения усилий обратной связи и калибровки маятника. Датчик емкости также нацелен на корпус маятника и позволяет следить за его колебанием. Момент инерции подставки может быть определен путем измерения изменения периода кручения после перемещения известных масс (поз. 3) на фиксированное расстояние от оси вращения. Сигналы питания и управления передаются по тонким проводам и прикрепляются к верхней части маятника (поз. 5). Торсионная нить служит основанием для маятника и двигателя. Высоковольтные силовые сигналы экранированы, чтобы предотвратить появление помех от коронального разряда и воздействия поля.

В источнике [13] представлена оптическая интерферометрическая проксимальная измерительная система (IPS) для измерения тяги и импульсного разряда импульсных электрических двигателей малой тяги. Данный тяговый стенд на базе IPS обладает преимуществом в части измерения тяги без электромагнитных помех с высокой точностью (погрешность $< 2\%$) в широком диапазоне импульсов (от 100 мкН·с до 10 Н·с). Теоретически показано, что IPS способен

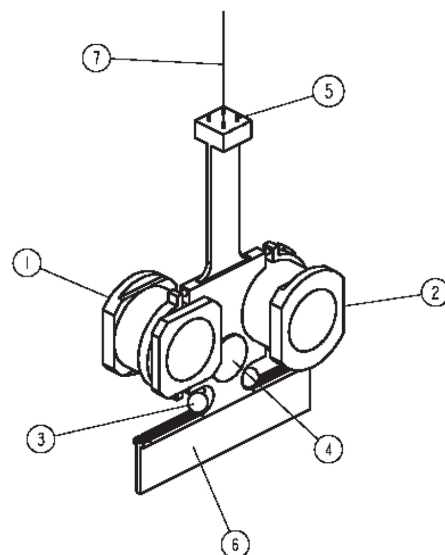


Рис. 12. Схема маятникового стенда

Fig. 12. Schema of the pendulum stand

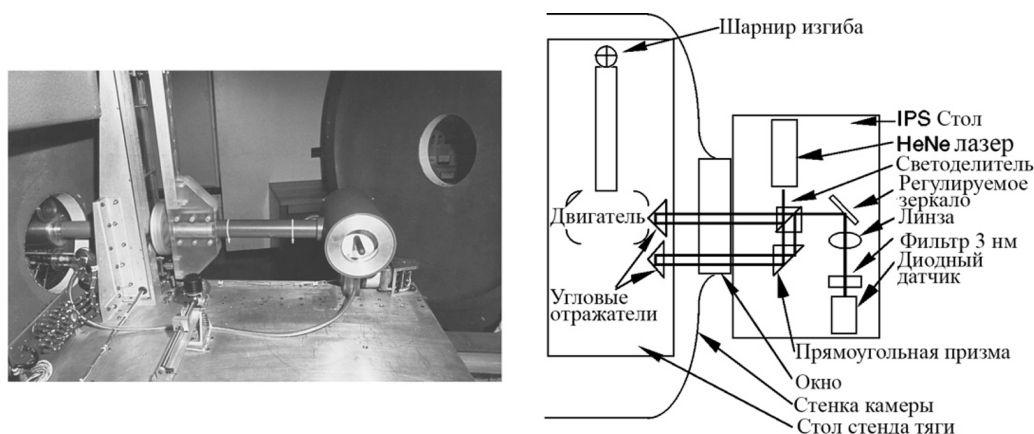


Рис. 13. Фотографическое изображение и схема работы стенда

Fig. 13. Photographic image and the scheme of the stand operation

измерять установившиеся значения тяги до 20 мкН. Тяговый стенд на базе IPS основан на измерении динамической характеристики качающегося рычага с помощью лазерного интерферометра с двумя датчиками с точностью определения положения 10 нм. Стенд в вакуумной камере и схема работы стенда представлены на рис. 13.

Работа IPS-стенда основана на интерферометре Майкельсона [14]. Оптическая природа этой системы устраняет электромагнитные помехи. Другой особенностью является высокое пространственное разрешение оптической интерферометрии. Свет, излучаемый лазерным источником, разделяется на два луча в светоделителе. В конце пути каждого луча находится уголкового отражатель. Два луча отражаются обратно к светоделителю и проходят через линзу к диодным датчикам. Выходные сигналы с диодных датчиков записываются в ПК. Наличие нескольких полос достигается за счет небольшого смещения двух лучей на диодных датчиках. Когда длины пути, пройденные двумя лучами, отличаются на нецелочисленное число, кратное длине волны лазерного излучения, между ними возникает разница в фазовом угле при их воссоединении. Наложение этих двух волн приводит к конструктивной или деструктивной интерференции.

Был спроектирован и изготовлен тяговый стенд крутильного типа для испытания импульсных плазменных двигателей в одиночном и в повторяющемся режимах работы [15, 18]. Количество импульсов определяется строго в зависимости от прогиба стойки, жесткости пружины и собственной частоты. Точность метода была проверена с помощью качающегося ударного маятника (погрешность до 1 %).

Стенд был использован для тестирования пульсирующего плазменного двигателя (ППД) Lincoln экспериментального спутника LES-8/9. Было индивидуально измерено 34 одиночных импульса двигателя. Средний импульс составлял 266 мкН·с. Стенд представлен на рис. 14.

Одна из первых разработок торсионного маятника представлена в источнике [16]. Конструкция системы MERTS (micropound extended range thrust stand – микропоундовый тяговый стенд увеличенного радиуса действия) (рис. 15) имеет следующие характеристики:

- система полностью лишена трения. Единственный физический контакт с балансиrom осуществляется через два изгибных шарнира. Шарниры обеспечивают требуемую низкую

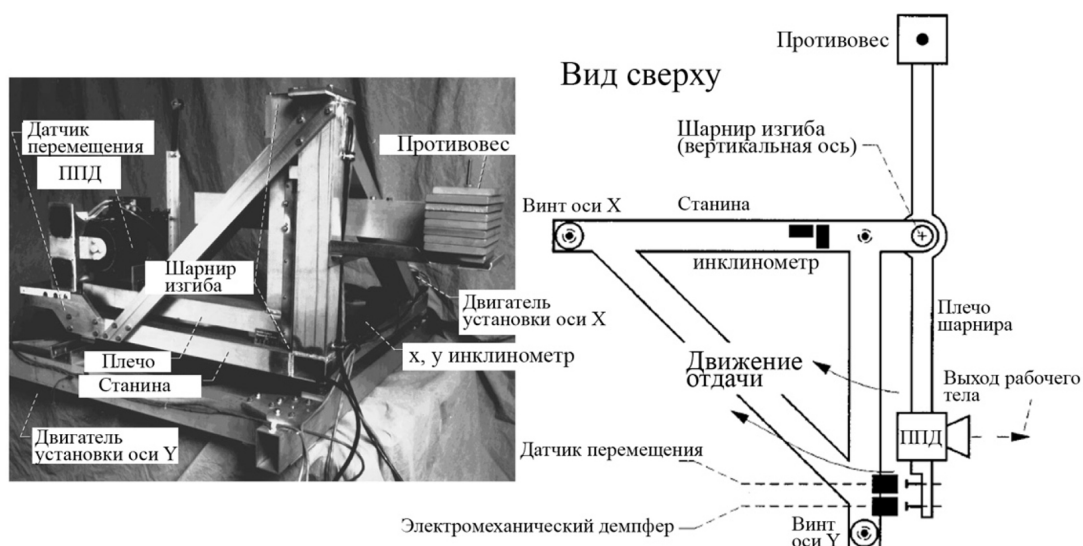


Рис. 14. Фотографическое изображение и схема стэнда (вид сверху)

Fig. 14. Photographic image and scheme of the stand (top view)

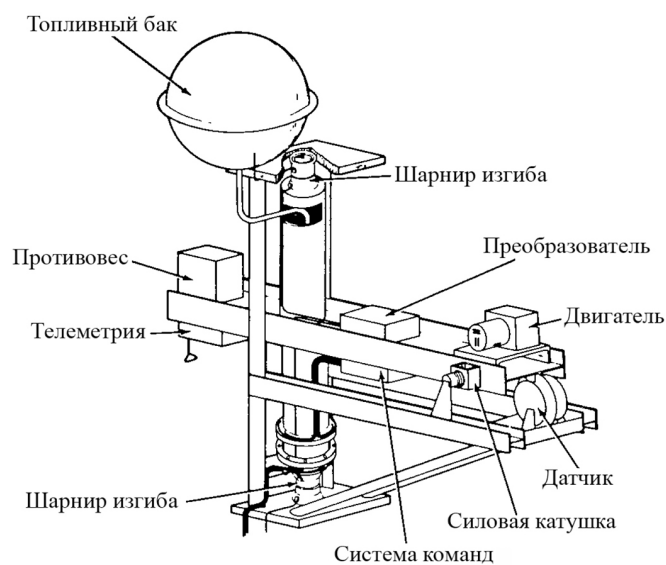


Рис. 15. Схема стэнда MERTS

Fig. 15. Schema of the MERTS stand

жесткость пружины при кручении и в то же время обеспечивают требуемую несущую способность;

- угловое смещение коромысла измеряется дифференциальным пластинчатым конденсатором;

- предусмотрены три диапазона измерения тяги: от 4,4 мкН до 445 мкН, от 445 мкН до 8,9 мН и от 8,9 мН до 222 мН. Для двух верхних диапазонов система работает в режиме нулевой балансировки;

- питание подается на балку через поворотные шарниры;
- предусмотрено как электромагнитное, так и вихретоковое демпфирование;
- телеметрическая система используется для получения данных датчиков от весов и двигателя;
- команды на двигатель активируются по оптическому каналу связи.

Резонансный стенд на основе торсионного маятника представлен в источнике [17]. Большинство торсионных стендов работает на методе стационарного смещения. На точность этого метода могут отрицательно влиять температурный дрейф и вибрации помещения. Данный упорный стенд работает по резонансному принципу, который сводит к минимуму воздействие внешних вибраций и температурных колебаний. Данный стенд разработан для измерения тяги микроимпульсных плазменных двигателей (μ ППД), работающих на частоте ~ 1 Гц. Данный тяговый стенд работает в колебательном, незатухающем режиме. Двигатель приводится в действие в резонансе с колебаниями поворотного рычага. Так как тяга резонансно прикладывается при движении поворотного рычага, амплитуда колебаний усиливается, что облегчает измерение. Движение поворотного рычага ведет себя как вынужденный гармонический генератор с соответствующим нечувствительным откликом на внешние колебательные силы. Система нечувствительна к тепловому дрейфу. Конструкция стенда представлена на рис. 16.

Данный стенд является модернизацией стенда, представленного в [15, 18]. Чтобы повысить чувствительность тягового стенда к микроныютонам силы, от метода стационарного перемещения отказались в пользу резонансного метода работы. Этот метод преднамеренно приводит в колебательное состояние упорную стойку без активного демпфирования, при этом приложенная сила (калибровочная или толкающая) воздействует на упорную стойку в течение половины периода каждого колебания.

Следует отметить, что авторы данной обзорной статьи проводили работу в части резонансного определения тяги ионного двигателя [19]. В отличие от упорного метода в резонанс вводился вертикальный маятник с установленной на нём мишенью (аэродинамический метод).

Для испытаний полевого эмиссионного электродвигателя (FEER) был изготовлен упорный стенд на основе торсионных весов [20]. Двигатели FEER отличаются высоким удельным импульсом и низким уровнем тяги (до 1 мкН). В стенде применена оптическая система считывания, электрические соединения установлены через подвесные линии, чтобы свести к мини-

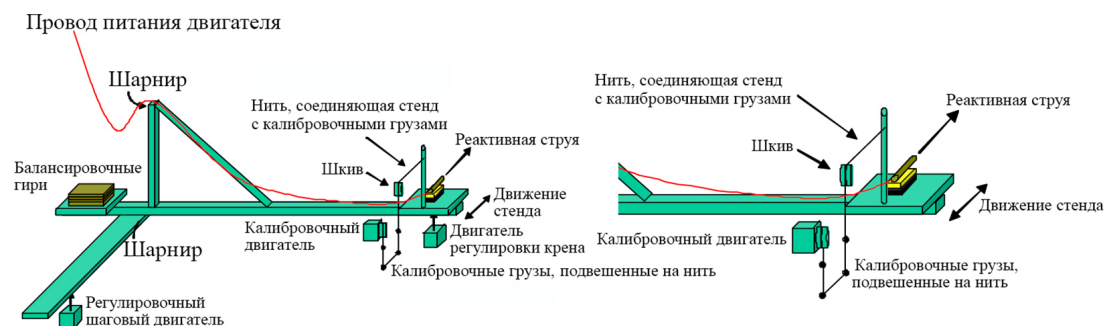


Рис. 16. Конструкция и метод калибровки стенда

Fig. 16. Design and calibration method of the stand

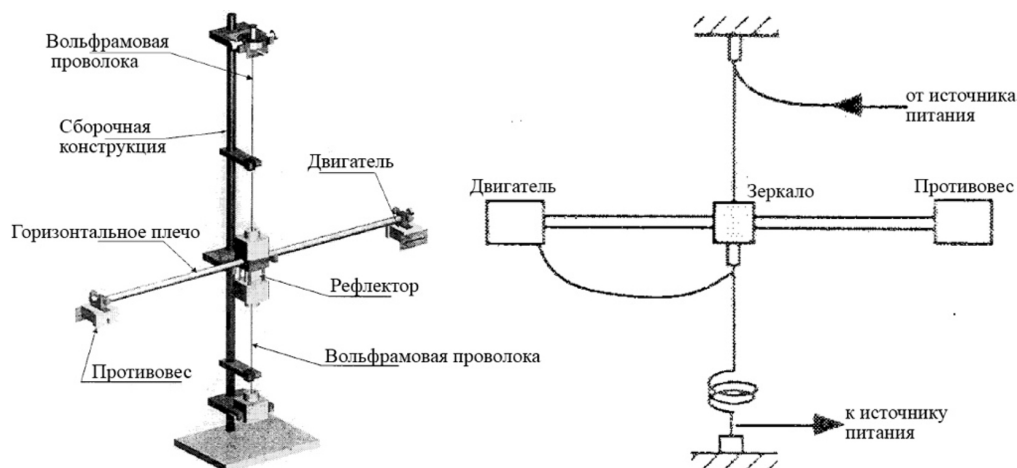


Рис. 17. Стенд и его электрическая схема

Fig. 17. The stand and its electrical schema

муму механические помехи. Стенд рассчитан на измерение тяги в диапазоне 1–100 мкН с погрешностью менее 3 %. Стенд представлен на рис. 17.

Оригинальная конструкция стенда приведена в [21]. Было спроектировано и изготовлено устройство для измерения тяги методом газонаполнения. Все компоненты ионного двигателя были размещены на плавающем поворотном столе, поддерживаемом в осевом и радиальном направлениях газовым подшипником. Этим обеспечивалось вращение без трения. Измеренная тяга составила 83 % от значения, рассчитанного по току пучка и ускоряющему потенциалу.

Характеристики стенда: измерение тяги в диапазоне 100–200 мкН и вес всей системы не более 20 кг. На рис. 18 показаны эскизы стенда и упорного подшипника, а также фотографическое изображение стенда. Смазочный газ подается из газозаборника и выбрасывается через центральное отверстие упорного подшипника. Он плавает во внутреннем цилиндре. Ионная тяга измерялась с помощью датчика крутящего момента.

Стенд измерения малой тяги (в мкН) на основе крутильных весов представлен в [22]. Асимметричный рычаг способен вращаться с помощью двух изгибных шарниров. Линейное смещение рычага (которое является функцией приложенной силы тяги) измеряется с помощью оптического датчика перемещения. Весы состоят из симметричного рычага (полый прямоугольный алюминиевый профиль с длиной стороны 20 мм и общей длиной около 60 см), который может свободно вращаться с помощью двух поворотных шарниров (рис. 19). Шарниры были выбраны из-за их низкого трения, высокой линейности и незначительного гистерезиса. Шарниры способны выдерживать нагрузки порядка нескольких килограммов. Выбранный шарнир для изгиба – это шарнир G-10 от C-Flex Inc. (Нью-Йорк, США). Отклонение весов является линейной функцией приложенной силы.

В источнике [23] представлен крутильный стенд с разрешением тяги 25 нН, который может нести полностью работоспособный микродвигатель и источник питания общей массой до 15 кг. Тяговое усилие составляет 500 мкН с точностью 0,5 %, минимальный отклик устройства составляет 100 нН при точности 25 %. Так как это торсионный баланс с критическим

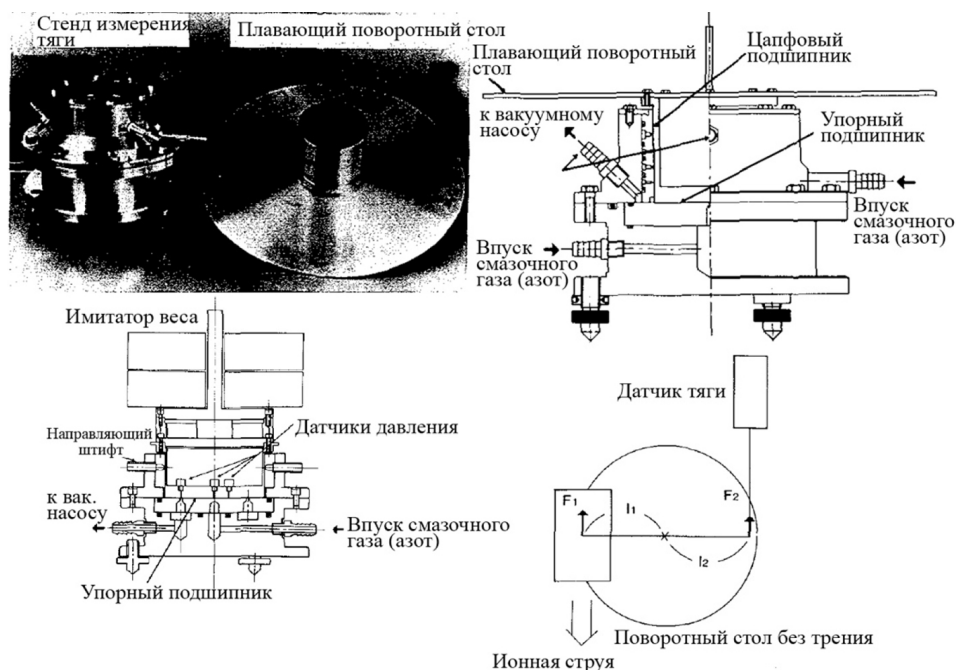


Рис. 18. Фотографическое изображение стенда, его схемы и принцип измерения тяги

Fig. 18. Photographic image of the stand, its schemes and the principle of traction measurement

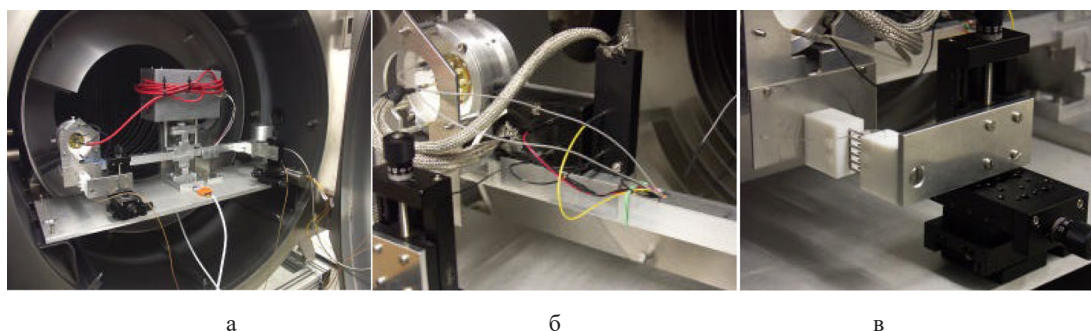


Рис. 19. Фотографическое изображение стенда и его узлов: а – стенд в вакуумной камере; б – двигатель в составе стенда; в – калибровочные электроды

Fig. 19. A photographic image of the stand and its components: а – a stand in a vacuum chamber; б – an engine as part of the stand; в – calibration electrodes

демпфированием и временем отклика в десятки секунд, то шум при считывании тяги практически отсутствует на частотах выше 0,1 Гц. Ключевой элемент стенда – оптический датчик, который реагирует только на вращение торсионного стержня, но не на окружающую вибрацию. На рис. 20 представлена схема стенда.

Для измерения вращения торсионного стержня применялся оптический интерферометр. Световозвращатель «Р» (рис. 20) имеет отверстие диаметром 2,54 см. Луч (1) представляет собой непрерывный пучок мощностью 5 мВт, длиной волны 532 нм. Торсионный стержень подвешен на стальном волокне диаметром 254 мкм в точке «S». Микродвигатель создает тягу в точ-

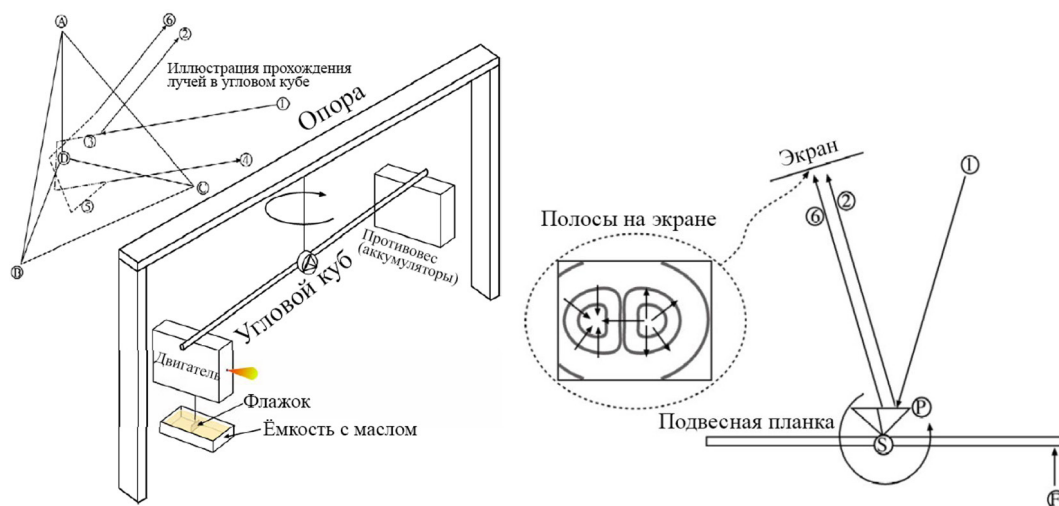


Рис. 20. Схема станда, угловой куб и схема измерения

Fig. 20. The scheme of the stand, the angular cube and the measurement scheme

ке «F». Световозвращающая призма «P» из цельного стекла (угловой куб) крепится к планке в центре. Луч (1) ударяется об угловой куб и создает два отраженных луча (2) и (6). Начальный угол между лучом (1) и балками (2) и (6) регулируется примерно на 30 мрад для оптимизации работы датчика. Они интерферируют на экране, создавая полосы, показанные на вставке. При вращении эти полосы перемещаются радиально наружу (показано стрелками на вставке) или внутрь, в зависимости от направления вращения стержня.

В источнике [24] представлена информация о работе тягового станда торсионного типа. Стенд обладает грузоподъемностью до нескольких килограммов и способен измерять импульсную нагрузку до 1350 мкН·с с разрешением 0,47 мкН·с и среднюю тягу до 264 мкН с разрешением 0,09 мкН. Схема упорного станда показана на рис. 22. Корпус изготовлен из алюминиевого прямоугольного блока размером $27 \times 3 \times 6$ см. Маятник подвешен на вольфрамовой нити длиной 1160 мм и диаметром $(502,0 \pm 6,1)$ мкм. Постоянная пружины кручения нити составляет $K = 8,47 \cdot 10^{-4}$ Нм/рад. Верхний конец нити соединен с вращающимся вакуумным каналом, закрепленным в верхней части вакуумной камеры, который используется для регулировки начальной амплитуды и положения маятника. Нижний конец нити прикреплен к специально сконструированному зажиму (см. рис. 21).

На одном конце маятника установлен пульсирующий плазменный двигатель (ППД), ось сопла выровнена так, чтобы она была касательной к вращательному движению маятника. Когда двигатель приводится в действие, маятник реагирует вращением вокруг оси волокна. Три спиральные пружины, изготовленные из алюминиево-кремниевых проволок длиной 40 мм и диаметром 50 мкм каждая, соединены с центром маятника от нижней плоскости, которые используются для подачи питания и трансляции сигнала зажигания для ППД. Таким образом, в нити отсутствует рабочий ток, что позволяет избежать ее термоупругости при кручении. Эквивалентная жесткость проводящих пружин на кручение, измеренная путем сравнения периодов маятника до и после подсоединения трех проводов, оказывается меньше одной тысячной

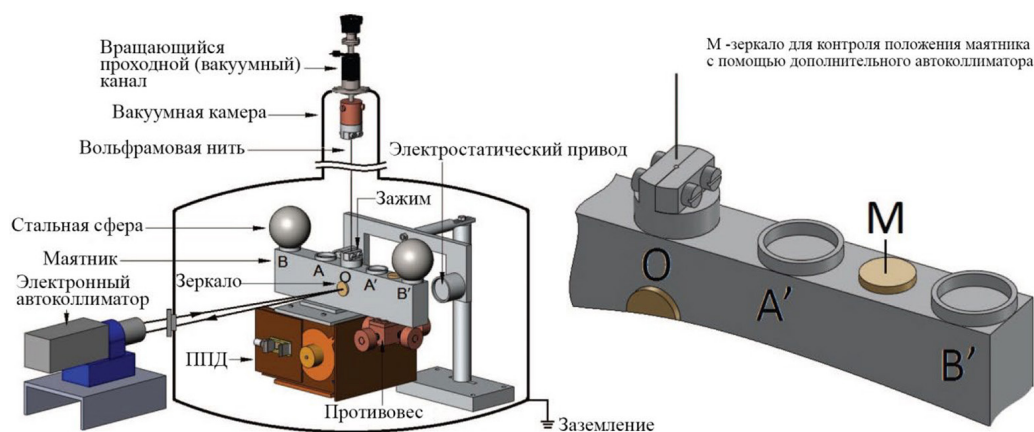


Рис. 21. 3Д-модель стенда и узла крепления вольфрамовой нити

Fig. 21. 3D-model of the stand and the fastening unit of the tungsten thread

жесткости волокна и остается почти постоянной при нескольких повторяющихся измерениях. На противоположной стороне ППД установлен медный противовес весом 850 г, чтобы уравновесить вес двигателя и отрегулировать положение маятника. Для изменения момента инерции маятника на него надеваются две стальные сферы диаметром 57 мм и массой ≈ 780 г.

В источнике [25] представлен торсионный стенд для измерения тяги двигателей от 100 мН до 4,5 Н. Конструкция стенда включает в себя шарниры без трения, моментный рычаг, противовес и лазерный триангуляционный датчик перемещения для компенсации помех окружающей среды. Удлиненный моментный рычаг стенда позволяет оценить тягу двигателей уровня 100 мН, в то время как укороченный моментный рычаг позволяет оценить большие диапазоны тяги. Баланс тяги использовался для измерения установившихся и пульсирующих характеристик двигателя на холодном газе мощностью 100 мН. Было установлено, что максимальная погрешность измерения тяги в установившемся режиме и в пульсирующем режиме составляет 5,4 мН и 7,9 мН соответственно. Фотографическое изображение стенда представлено на рис. 22.

Для тестирования пульсирующих плазменных двигателей (ППД) и других ЭРД малой тяги был разработан стенд на основе крутильного маятника [26]. Текущая конфигурация способна измерять импульсные разряды в диапазоне от 14 до 79 мкН·с с разрешением от 0,05 до 0,10 мкН·с. Использование изгибных шарниров с низкой жесткостью делает весы компактными с меньшей длиной рычага. Для калибровки стенда было спроектировано и изготовлено электростатическое калибровочное устройство (ECD). Достигнутая максимальная погрешность измерения импульсного разряда составила 10 %, что ниже среднего значения в 12–15 %, типичного для этого типа балансиров тяги. ECD был откалиброван с использованием ранее откалиброванной прецизионной аналитической шкалы. Конструкция стенда представлена на рис. 23.

Рычаг упорных весов состоит из квадратной алюминиевой трубки со стороной 76 мм и длиной 550 мм. Этот рычаг прикреплен к немагнитной опорной раме из нержавеющей стали с помощью двух поворотных шарниров, образуя конфигурацию крутильного маятника.

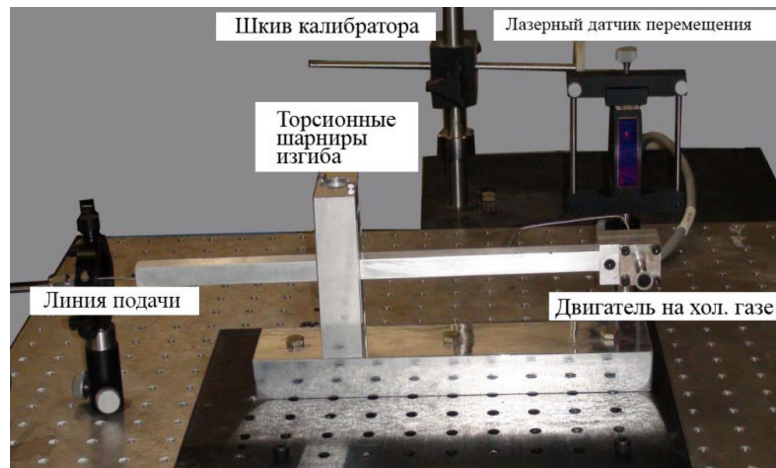


Рис. 22. Торсионный стенд тяги

Fig. 22. Traction torsion stand

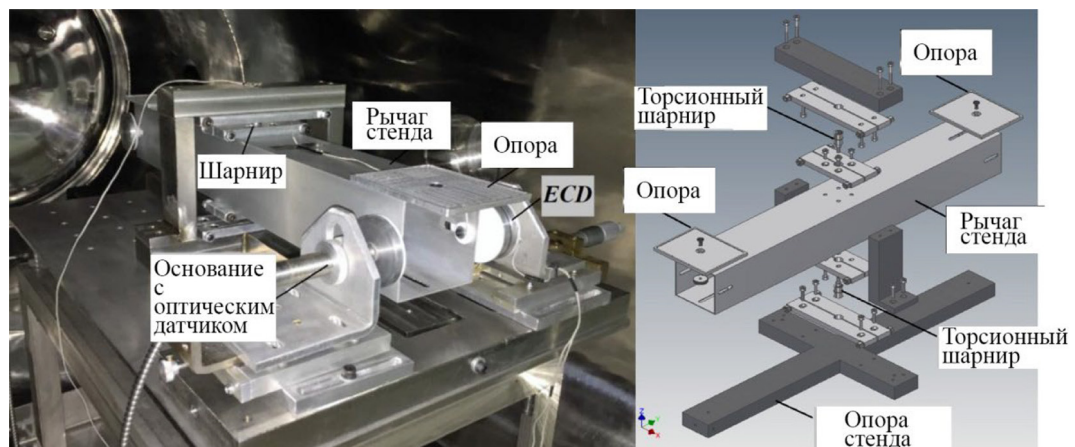


Рис. 23. Фотографическое изображение стенда и его взрыв-схема

Fig. 23. Photographic image of the stand and its explosion-scheme

В патенте [27] представлено тягоизмерительное устройство (ТИУ) на основе торсионного маятника. Предлагается способ измерения боковой составляющей вектора тяги, основанный на том, что размещают ЭРД на одном конце подвижной системы ТИУ, осуществляют прокладку линий электропитания ЭРД по подвижной системе ТИУ с подведением к нему гибких частей этих линий. Затем включают ЭРД и снимают показания датчика боковых усилий. После этого отключают ЭРД и устанавливают его на неподвижно закрепленный сменный кронштейн рядом с предыдущим местом его размещения. Производят совмещение оси ЭРД с его осью при предыдущем размещении на подвижном коромысле, подводят к ЭРД дополнительные гибкие линии электропитания, соединяют их с концами линий, проложенных по подвижной системе ТИУ. Затем совмещают положение подвижной системы ТИУ с ее положением при первичном размещении на нем ЭРД, после чего повторно включают ЭРД. Величина боковой составляющей

щей вектора тяги ЭРД определяется разностью показаний датчика боковых усилий при первом и повторном включении.

Устройство для реализации данного способа включает в себя подвижную систему ТИУ, выполненную в виде горизонтально расположенного и подвешенного на упругом на кручение подвесе подвижного коромысла, на котором при первом включении первоначально размещен ЭРД, линии электропитания ЭРД, проложенные по коромыслу и имеющие гибкие участки в месте перехода с подвижной системы ТИУ на неподвижную часть ТИУ, датчик бокового усилия (рис. 24).

Позициями на рис. 24 обозначены: 1 – подвес; 2 – коромысло; 3 – ЭРД; 4 – противовес; 5 – линии электропитания и газовые линии; 6 – гибкие участки линий; 7 – неподвижная часть стенда; 8 – датчик бокового усилия; 9 – узел стыковки; 10 – сменный кронштейн; 11 – гибкие линии электропитания ЭРД; 12, 13 – платы; 14 – парные связки линий; 15 – газовые линии.

В источнике [28] представлен стенд, аналогичный стендам из источников [3], [5] и [18]. Тяговый стенд предназначен для точного измерения импульсных разрядов в диапазоне 10–1000 мкН·с с использованием бесконтактного метода электромагнитной калибровки. В частности, конструкция с постоянным магнитом была спроектирована для создания однородного магнитного поля, а многovitковая катушка была изготовлена для создания калибровочного усилия менее 10 мН. Электромагнитная калибровочная сила для измерения импульсной тяги была линейной по отношению к току катушки и изменялась менее чем на 2,5 % при изменении расстояния на 6 мм между катушкой и магнитом. ППД был сначала протестирован на испытательном стенде, а затем были измерены пять одиночных импульсных разрядов, чтобы получить средний импульсный разряд в 310 мкН·с. Для оценки качества измерения была проанализирована неопределенность измеренного одиночного импульса и было установлено, что она составляет 10 мкН·с с достоверностью 95 %. Стенд представлен на рис. 25.

Стенд можно разделить на пять основных частей: рычаг кручения, шарниры изгиба, стационарная конструкция, датчик перемещения и электромагнитная калибровочная система (EMCS).

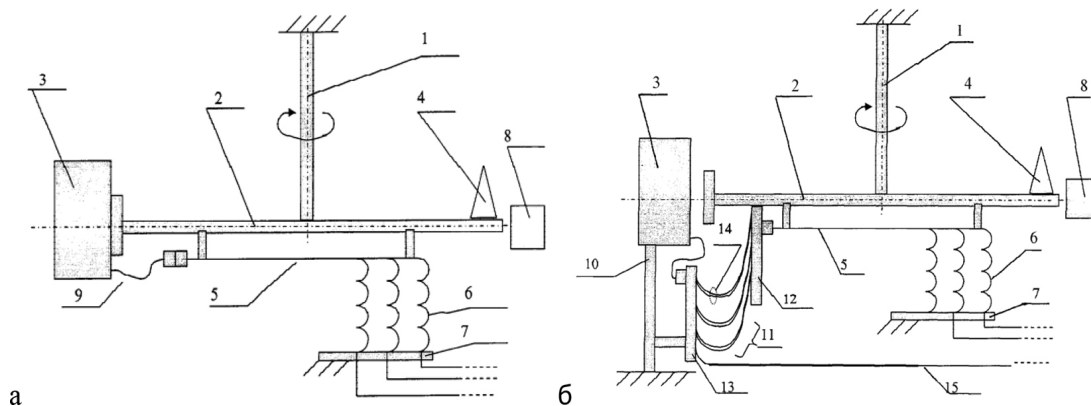


Рис. 24. Схема стенда: а) схема ТИУ, соответствующая установке ЭРД на подвижную систему ТИУ при первом включении ЭРД; б) схема ТИУ, соответствующая установке ЭРД на сменном кронштейне при повторном включении ЭРД

Fig. 24. The scheme of the stand: a) the scheme of the stand corresponding to the installation of the thruster on the mobile stand system when the thruster is switched on for the first time; b) the scheme of the stand corresponding to the installation of the thruster on a replaceable bracket when the thruster is switched on again

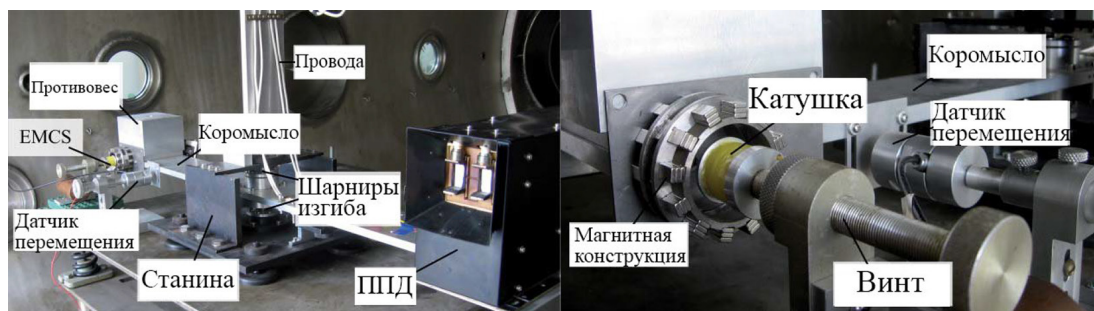


Рис. 25. Фотографическое изображение стэнда и его узлов

Fig. 25. Photographic image of the stand and its components

В работе [29] представлен стэнд для измерения импульсной тяги сегнетоэлектрического плазменного двигателя (ФЕРТ). Характеристики такого двигателя включают среднюю мощность 6 Вт, тягу 68–87 мкН, расчетный удельный импульс 1450 с и массу двигателя 5,7 г. Дополнительные преимущества двигателя включают в себя импульсные разряды менее 1 нН·с, для работы требуется только один источник питания и способность испускать как электроны, так и ионы. Объем и масса двигателя относительно невелики, необходимо два провода от источника питания, расположенного снаружи камеры, к двигателю. На одном оптическом макете размером 6×4 дюйма смонтированы двигатель, поворотный рычаг и интерферометр Майкельсона. Схема упорного стэнда и его фотография показаны на рис. 26. Лазер HeNe, диодный детектор и расширитель луча были расположены снаружи камеры, в то время как остальная часть упорного стэнда была установлена на макетной плате. Функция интерферометра заключалась

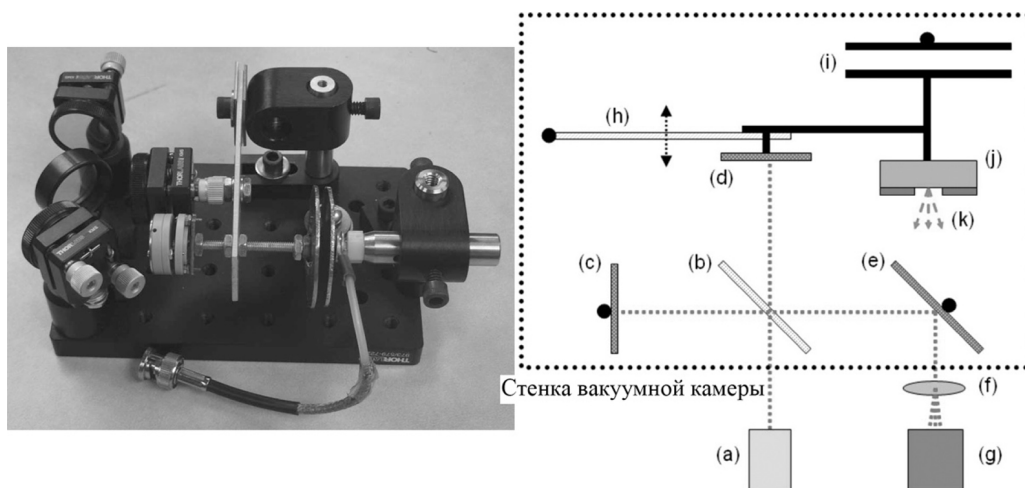


Рис. 26. Фотографическое изображение стэнда и его схема: (a) HeNe-лазер; (b) разделитель 50/50; (c) контрольное зеркало на ножке; (d) измерительное зеркало на ножке; (e) зеркало; (f) расширитель луча; (g) диодный детектор; (h) маятник; (i) калибровочные пластины; (j) ФЕРТ; (k) плазменный шлейф

Fig. 26. Layout of the thrust stand. (a) HeNe laser. (b) 50–50 splitter. (c) Reference leg mirror. (d) Measurement leg mirror. (e) Mirror. (f) Beam expander. (g) Diode detector. (h) Pendulum. (i) Calibration plates. (j) FEPT. (k) Plasma plume.

в преобразовании перемещений качающегося рычага в электрический сигнал. Зеркало было установлено на кронштейне в дополнение к двум отдельным источникам импульсов: калибровочному генератору импульсов и FEPT. Калибровочный генератор импульсов состоит из двух параллельных металлических дисков: один заземлен, а другой присоединен к генератору импульсов переменной ширины напряжением 0–500 В.

Обсуждение результатов

Представленные конструкции стендов можно систематизировать по времени публикации, уровню и типу (стационарный или импульсный режим) измеряемой тяги, типу применяемого датчика регистрации смещения чувствительного элемента, способу демпфирования паразитных колебаний, типу калибровки стенда и оцениваемой погрешности измерения тяги. Данные сведены в табл. 1. Концепция торсионных маятников как измерителей тяги родилась в 1970-х годах. Сам метод имеет ещё более раннее происхождение и реализован в виде весов Ка-

Таблица 1. Систематизация рассмотренных конструкций стендов

Table 1. Systematization of the considered stand designs

Год	Публ.	Изм. уровень тяг	Тип датчика	Демпфирование	Тип калибровки	Δ , %
1971	[16]	4.4–445 мкН 0.445–8.9 мН 8.9–222 мН	Ёмкостный	Электромагнитное Вихретоковое	Электромагнитный (калибровочная катушка)	4.5
1982	[21]	100–200 мкН	Датчик крутящего момента	-	LVDT с нулевым методом	17
1995 1997	[15, 18]	Имп. до 266 мкН·с, уст. 570 мкН	LVDT	Электромеханический	Качающийся ударный маятник	1
1997	[13]	Имп. 100 мкН·с – 10 Н·с, уст. 20 мкН	Лазерный интерферометр	Резиновые опоры	Качающийся ударный маятник	2
2000	[20]	1–100 мкН	Оптический (лазерный рычаг)	-	По периоду колебания известного веса	3
2001	[11]	Имп. 1 мкН·с Уст. 1 мкН	LVDT	Электромагнитное	Калибровочный молот	10
2002	[2]	до 86.2 нН 712 нН-1 мкН	LVDT	Масляное	Численное моделирование	± 11 ± 2
	[12]	1–100 мкН	Автоколлиматор	Вихретоковое	Электростатика	-
	[17]	5–75 мкН	LVDT	Электромагнитное	Калибровочные грузы	± 1.3
2003	[5]	Уст. 2–13 мкН Имп. до 19 мкН·с	LDS	Электростатическое	Электростатика	-
2004	[3]	Имп. 80–300 мкН·с	LVDT	Электромагнитное	Качающийся ударный маятник	2.6
2005	[22]	2–50 мкН	Оптический	Электростатическое	Электростатика	7–10

Продолжение таблицы 1

Table 1 continued

Год	Публ.	Изм. уровень тяг	Тип датчика	Демпфирование	Тип калибровки	Δ , %
2006	[23]	100 нН-500 мкН	Оптический	Масляное	Электромагнитный (калибровочная катушка)	25–0.5
2008	[29]	60–75 мкН	Интерферометр	-	Электростатика	8
2009	[27]	10–1000 мкН	Датчик силы	-	-	-
2011	[25]	100 мН-4.5 Н	Лазерный датчик перемещения	-	Калибровочные грузы	5–8
	[28]	Имп. 10–1000 мкН·с	Датчик перемещения	Электромагнитное	Электромагнитный (калибровочная катушка)	5
2012 2016 2017	[8–10]	до 3 мН	Аналоговое измерение	-	Калибровочные грузы	1.5
2012	[24]	Имп. до 1350 мкН·с Уст. до 264 мкН	Автоколлиматор	Электростатическое	По периоду колебания известного веса	0.16
2013	[4]	10 нН-1 мкН	LDS (лидар)	Вихретоковое	Электростатика	± 20
	[7]	до 600 мкН	Ёмкостный	Вихретоковое	Электромагнитный	5–7
2018	[6]	1...3000 мкН	Ёмкостный	Вихретоковое	Электромагнитный (калибровочная катушка)	10–0.5
2019	[26]	Имп. 14–79 мкН·с	Оптический	-	Электростатика	10

вендиша. До настоящего времени концепция торсионного стенда практически не изменилась. Не наблюдается временной прогресс в части повышения чувствительности стендов к более низким уровням тяг и повышения точности замеров. Диапазон измеряемых тяг и уровень чувствительности стенда обусловлен только типом исследуемого двигателя. Типы применяемых датчиков перемещения: ёмкостные, оптические, LVDT. Демпфирование паразитных колебаний от работы насосов и случайных смещений преимущественно магнитное (активное – электромагнитное, пассивное – вихретоковое). Реже встречается пассивное демпфирование в вакуумном масле. Все торсионные маятники из-за наличия упругих шарниров требуют калибровки. Наибольшее применение получили калибровочные грузы, ударные маятники (молотки) и калибровка электростатическими силами между электродами известной геометрии.

При калибровке широко используются численные методы моделирования электростатических сил. В источнике [2] калибровка проведена численным моделированием газодинамического истечения гелия через калибровочное отверстие. Погрешности измерения тяги стендом находятся в диапазоне 0,16–20 %. Большая погрешность характерна для стендов измерения тяги уровнем до 1 мкН. С увеличением реактивной силы микродвигателя погрешность стендового измерения тяги уменьшается.

Заключение

В статье представлено 23 конструкции стендов торсионного типа для измерения тяги микродвигателей малых космических аппаратов. Данное количество составляет абсолютное большинство существующих конструкций подобного принципа работы. Достоинством торсионных стендов принято считать точность измерения тяги, так как данный способ наиболее близок к непосредственному определению реактивной силы. Недостатки стендов данной конструкции заключаются в ориентированности на конкретный изучаемый двигатель (что не позволяет проводить лабораторные исследования различных конструкций двигателей), больших массогабаритных характеристиках, обязательность калибровки, сложность подвода рабочего тела и электрической мощности, чувствительность к электромагнитным воздействиям.

Список литературы / References

- [1] Yoshikawa T., Tsukizaki R., Kuninaka H. Calibration methods for the simultaneous measurement of the impulse, massloss, and average thrust or a pulsed plasma thruster, *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(9), 095103–1 – 095103–10
- [2] Jamison A. J., Ketsdever A. D., Muntz E. P. Gas dynamic calibration of a nano-Newton thrust stand, *Review of Scientific Instruments*, 2002, 73(10), 3629–3637
- [3] Koizumi H., Komurasaki K., Arakawa Y. Development of thrust stand for low impulse measurement from microthrusters, *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75 (10), 3185–3190
- [4] Soni J., Roy S. Design and characterization of a nano-Newton resolution thrust stand, *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(9), 095103–1 – 095103–9
- [5] Gamero-Castano M. A torsional balance for the characterization of microNewton thrusters, *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(10), 4509–4514
- [6] Chuansheng Wang, Changbin Guan, Xuhui Liu, Xudong Wang, Fei Li, Xilong Yu. Dynamic-force extraction for micro-propulsion testing: Theory and experimental validation, *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(11), 115110–1 – 115110–8
- [7] Zhou W. J., Hong Y. J., Chang H. A micronewton thrust stand for average thrust measurement of pulsed microthruster, *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(12), 125115–1 – 125115–9
- [8] Ning Z. X., FAN J. R. On line measurement method of three-wire torsion pendulum micro thrust and analysis of its uncertainty, *Measurement & Control Technology*, 2012, 31 (5), 45–48
- [9] Yang J, Liu X.-C., Wang Y.-Q., Tang M.-J., Luo L.-T., Jin Y.-Z., Ning Z.-X. Thrust measurement of an independent microwave thruster propulsion device with three-wire torsion pendulum thrust measurement system, *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(2), 362–371
- [10] Li D., Zhang W, Zhang T., Guo N., Meng W., Tang W., Tang F., Yang F. Ground integrated test and evaluation technology for space electric propulsion, *Vacuum and Cryogenics*, 2017, 23(5), 266–273
- [11] Ziemer J. Performance Measurements Using a Sub-Micronewton Resolution Thrust Stand, *27th International Electric Propulsion Conference, AIAA Paper*, 2001, 0238
- [12] Merkowitz S. M., Maghami P. G., Sharma A., Willis W. D., Zakrzewski C. M. A μ Newton thrust-stand for LISA, *Classical and Quantum Gravity*, 2002, 19(7), 1745–1750
- [13] Cubbin E. A., Ziemer J. K., Choueiri E., Jahn R. G. Pulsed thrust measurements using laser interferometry, *Review of Scientific Instruments*, 1997, 68(6), 2339–2346
- [14] Fowles G. R. *Introduction to Modern Optics*. Dover, New York: Courier Corporation, 1989. 328

- [15] Haag Thomas W. Thrust stand for pulsed plasma thrusters, *Review of Scientific Instruments*, 1997, 68(5), 2060–2067
- [16] Stark K. W., Dennis T., McHugh D. and Williams T. Design and development of a micropound extended range thrust stand (MERTS). NASA Technical Note D-7029, August 1971
- [17] Dulligan M., Lake J., Adkison P. and Spanjers G. Resonant Operation of a MicroPropulsion Thrust Stand, *American Institute of Aeronautics and Astronautics 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit – Indianapolis, Indiana*, 2002, 3821–1 – 3821–9
- [18] Haag T. PPT Thrust Stand, *Prepared for the 31st Joint Propulsion Conference and Exhibit cosponsored by AIAA, ASME, SAE, and ASEE San Diego*, California, 1995, 1–12
- [19] Вавилов И. С., Ячменев П. С., Федянин В. В., Степень П. В., Лукьянчик А. И., Жариков К. И. Определение тяги ионного двигателя резонансным аэродинамическим методом (РАМ-методом), *Динамика систем, механизмов и машин*, 2021, 9(2), 70–77 [Vavilov I. S., Yachmenev P. S., Fedyanin V. V., Stepen' P. V., Luk'yanchik A. I., ZHarikov K. I. Determination of the thrust of an ion thruster by the resonant aerodynamic method (RAM-method), *Dynamics of systems, mechanisms and machines*, 2021, 9(2), 70–77 (in Rus.)]
- [20] Boccaletto L., d'Agostino L. Design and Testing of a Micro-Newton Thrust Stand for FEEP, *36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2000, 3268
- [21] Murakami H., Hirata M., Kudo I. Thrust movement of an ion engine system, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1984, 21(1), 96–100
- [22] Marhold K., Tajmar M. Micronewton thrust balance for indium FEEP thrusters, *41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2005, 4387
- [23] Phipps C. R. et al. A Low-Noise Thrust Stand for Microthrusters with 25nN Resolution, *AIP Conference Proceedings*. – American Institute of Physics, 2006, 830(1), 492–499
- [24] Yang Y.-X., Tu L.-C., Yang S.-Q., Luo J. A torsion balance for impulse and thrust measurements of micro-Newton thrusters, *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(1), 015105
- [25] Flores J., Ingle M., Robinson N., Choudhuri A. Development of a Torsional Thrust Balance for the the performance evaluation of 100mN-5N class thrusters, *47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2011, 6016
- [26] Anselmo M. R., Marques R. I. Torsional thrust balance for electric propulsion application with electrostatic calibration device, *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(5), 055903
- [27] Грачев В. С., Салин В. Л., Шпанов И. Г., Шутов В. Н. Федеральное государственное унитарное предприятие «Исследовательский Центр имени М. В. Келдыша». Способ измерения боковой составляющей вектора тяги электрореактивного двигателя и устройство для его осуществления. Патент № 2363932 С 1 РФ, МПК G01L 5/13. № 2008114547/28; заявл. 17.04.2008; опубл. 10.08.2009. [Grachev V. S., Salin V. L., Shpanov I. G., Shutov V. N. Federal'noe gosudarstvennoe unitarnoe predpriyatie «Issledovatel'skij Tsentr imeni M. V. Keldysha». Method for measurement of lateral component of electrojet engine thrust vector and device for its realization. Patent No. 2363932 С 1 of the Russian Federation, IPC G01L 5/13. No. 2008114547/28; application 17.04.2008; publ. 10.08.2009.(in Rus.)]
- [28] Tang H., Shi C., Zhang X., Zhang Z., Cheng J. Pulsed thrust measurements using electromagnetic calibration techniques, *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(3), 035118.
- [29] Kemp M. A., Kovaleski S. D. Thrust Measurements of the Ferroelectric Plasma Thruster, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(2), 356–362

EDN: VDXOQI

УДК 537.86: 621.3.09

Assessment of the Electromagnetic Environment in Zones of Simultaneous Influence of Several Sources at Different Distances and Generation of Waves in One Measurement Plane

Evgeny V. Titov^a,
Alexander S. Solovskoy^{*a} and Elena B. Osmushkina^b
*^aPolzunov Altai State Technical University
Barnaul, Russian Federation
^bLimited Liability Company “Intek”
Novosibirsk, Russian Federation*

Received 12.01.2024, received in revised form 13.01.2024, accepted 24.02.2024

Abstract. The article deals with the issues of electromagnetic environment assessment in the zones of simultaneous influence of several sources at different distances from the control point, emitting electromagnetic waves in one plane, taking into account the superposition of electric, magnetic and electromagnetic fields in a wide frequency range from 3 Hz to 300 GHz. The analysis of generally accepted approaches to the superposition of electromagnetic waves is presented. The technique of determining the sum of harmonic waves and the resulting amplitude of superimposed frequency components of electric, magnetic and electromagnetic fields under specific conditions of influence is considered. Expressions are given for calculating the sum of harmonic waves and the resulting amplitude of electromagnetic field components in a wide range from decametre to millimetre waves in areas of simultaneous influence of two sources emitting waves in the same plane. The step-by-step process of superposition of harmonic electromagnetic waves is described. The algorithm of superposition of electromagnetic fields in the frequency range up to 300 GHz is presented. The results of experimental measurements of the electric field strength of the highest intensity in the frequency range 10–160 kHz from the microclimate control system and the electric panel located in the production room are presented. The picture of the superposition of the frequency components of the electric field obtained at the first stage of the calculation using the developed software is given.

Keywords: electromagnetic wave, superposition of waves, resultant amplitude, sum of harmonic waves, overlay technique, overlay pattern, electromagnetic environment.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: solovskoyas@mail.ru



Оценка электромагнитной обстановки в зонах одновременного влияния нескольких разноудаленных и излучающих в одной контролируемой плоскости источников

Е. В. Титов^а, А. С. Соловской^а, Е. Б. Осьмушкина^б

^аАлтайский государственный технический университет
имени И. И. Ползунова

Российская Федерация, Барнаул

^бОбщество с ограниченной ответственностью «Интэк»
Российская Федерация, Новосибирск

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы оценки электромагнитной обстановки в зонах одновременного влияния нескольких разноудаленных от точки контроля и излучающих электромагнитные волны в пределах одной плоскости источников с учетом наложения электрического, магнитного и электромагнитного полей в широком частотном диапазоне от 3 Гц до 300 ГГц. Представлен анализ общепринятых подходов к наложению электромагнитных волн. Рассмотрена методика определения суммы гармонических волн и результирующей амплитуды наложенных частотных составляющих электрического, магнитного и электромагнитного полей в рассматриваемых условиях влияния. Приведены выражения для расчета суммы гармонических волн и результирующей амплитуды составляющих электромагнитного поля в широком диапазоне от декамегаметровых до миллиметровых волн в зонах одновременного влияния двух источников, излучающих волны в пределах одной плоскости. Описан поэтапный процесс наложения гармонических электромагнитных волн. Показан алгоритм наложения электромагнитных полей в диапазоне частот до 300 ГГц. Представлены результаты экспериментальных измерений напряженности электрического поля наибольшей интенсивности в частотном диапазоне 10–160 кГц от системы управления микроклиматом и электрической панели, расположенных в производственном помещении. Приведена картина наложения частотных составляющих электрического поля, полученных на первом этапе расчета с использованием разработанного программного обеспечения.

Ключевые слова: электромагнитная волна, наложение волн, результирующая амплитуда, сумма гармонических волн, методика наложения, картина наложения, электромагнитная обстановка.

Цитирование: Титов Е. В. Оценка электромагнитной обстановки в зонах одновременного влияния нескольких разноудаленных и излучающих в одной контролируемой плоскости источников / Е. В. Титов, А. С. Соловской, Е. Б. Осьмушкина // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(2). С. 239–247. EDN: VDXOQI

Введение

Современное развитие электротехнологий и совместное использование источников, генерирующих широкополосные электромагнитные поля (ЭМП), на объектах электроэнергетики, в промышленности и сельском хозяйстве обуславливают необходимость оценки электромаг-

нитной обстановки в условиях одновременного влияния излучающих источников с различными амплитудными и частотными выходными характеристиками [1–2]. Однако известные подходы [3–5] не учитывают наложение частотных составляющих электромагнитного поля в широком спектре 3 Гц – 300 ГГц от нескольких излучающих источников [4–6]. Предложенный ранее подход к оценке электромагнитной обстановки, учитывающий наложение когерентных и некогерентных электромагнитных волн от одного источника поля [7–8], частично решает обозначенную проблему, не позволяя при этом определять результирующую амплитуду волн с учетом всего перечня накладываемых составляющих неионизирующего ЭМП (до 300 ГГц) в зонах одновременного влияния нескольких разноудаленных от точки контроля излучающих источников с различными амплитудами и частотами излучения, что обосновывает актуальность его развития.

Целью исследований является развитие подхода к оценке электромагнитной обстановки в зонах одновременного влияния нескольких разноудаленных от точки контроля излучающих источников, генерирующих электромагнитные волны в пределах одной плоскости с учетом наложения частотных составляющих электрического, магнитного и электромагнитного полей в широком частотном диапазоне от 3 Гц до 300 ГГц. Для достижения поставленной цели выявлена проблематика основанной на результатах инструментального контроля оценки электромагнитной обстановки, проведен анализ общепринятых подходов к наложению электромагнитных волн (ЭМВ), разработана методика определения суммы гармонических волн и результирующей амплитуды наложенных частотных составляющих электрического, магнитного и электромагнитного полей в зонах одновременного влияния нескольких разноудаленных от точки контроля и излучающих электромагнитные волны в пределах одной плоскости источников.

Материалы и методы

При наложении составляющих ЭМП от нескольких его источников, излучающих волны в пределах одной плоскости, результирующая амплитуда определяется по формуле (1) [5, 11] в соответствии с общепризнанным подходом, подробно рассмотренным в [7]. В зонах одновременного влияния гармонических электромагнитных волн с произвольными частотами формируется результирующая ЭМВ сложной формы, амплитудные и частотные выходные характеристики которой для упрощения вычислительных операций принято определять по уравнениям гармонических колебаний [3–6].

$$A_{\Sigma} = A_{\Sigma f_1} + A_{\Sigma f_2} + \dots + A_{\Sigma n}, \quad (1)$$

где $A_{\Sigma f_1}$ – результирующее значение амплитуды первой электромагнитной волны с частотой f_1 ; $A_{\Sigma f_2}$ – результирующее значение амплитуды второй волны с частотой f_2 ; $A_{\Sigma n}$ – результирующее значение амплитуды n -ой ЭМВ с частотой f_n .

Результирующая амплитуда частотных составляющих ЭМП, в частности формируемая при наложении первой электромагнитной волны из исследуемого спектра от двух разноудаленных от точки контроля излучающих источников, определяется с помощью формулы (2) [12, 13], учитывающей разность фаз накладываемых волн в широком спектре частот.

$$A_{\Sigma f_1} = A_{11f_1} \cos \omega_1 \left(t - \frac{l_{11}}{v} \right) + A_{12f_1} \cos \omega_1 \left(t - \frac{l_{12}}{v} \right), \quad (2)$$

где A_{11} – амплитудное значение волны от первого излучающего источника; A_{12} – амплитудное значение волны от второго источника; f_1 – частота электромагнитной волны, Гц; ω_1 – круговая частота, рад/с; t – время, с; v – скорость распространения волны, м/с; l_{11} – расстояние от первого излучающего источника до точки контроля, м; l_{12} – расстояние от второго источника до точки контроля, м.

При определении расстояния от излучающих источников до точки контроля вычисления можно проводить в декартовой системе координат (рис. 1). В данном случае расчет расстояния от первого источника осуществляется с использованием известного выражения (3) [14, 15].

$$l_{11} = \sqrt{(x_1 - x_{И1})^2 + (y_1 - y_{И1})^2}, \quad (3)$$

где x_1 – координата точки контроля по оси x ; $x_{И1}$ – координата излучающего источника по оси x ; y_1 – координата точки контроля по оси y ; $y_{И1}$ – координата излучающего источника по оси y .

Аналогично с помощью формулы (3) [14, 15] рассчитывается расстояние от второго источника до точки контроля.

При отличии менее чем в 3 раза частоты накладываемых ЭМВ с амплитудами много больших периода каждой волны сумму гармонических электромагнитных волн принято определять в соответствии с выражением (4) [9].

$$f_{\Sigma} = f_{cp.} + \frac{1}{2} \times \frac{A_2 - A_1}{A_1 + A_2} \times \Delta f_{1-2}, \quad (4)$$

где $f_{cp.}$ – средняя арифметическая частота электромагнитных волн, Гц; Δf_{1-2} – разность между частотами двух ближайших ЭМВ, Гц.

При значительной разнице между частотами накладываемых электромагнитных волн (более чем в 3 раза) при их амплитудах незначительно больших периода каждой волны разность

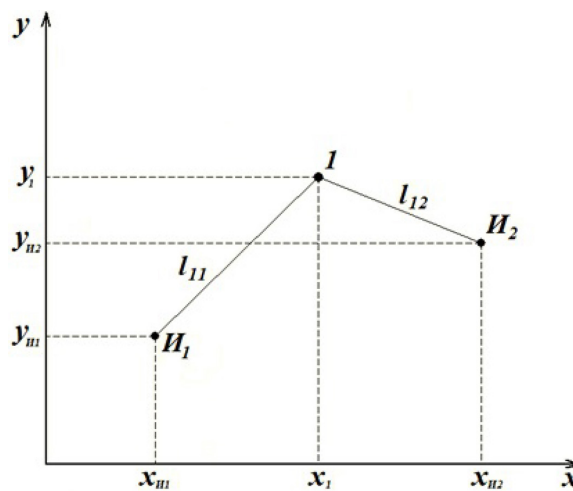


Рис. 1. Схема расположения точки контроля и излучающих источников: 1 – точка контроля ЭМП; И1 – первый источник излучения; И2 – второй источник излучения

Fig. 1. Location scheme of the control point and radiation sources: 1 – EMF control point; И1 – first source; И2 – second source

частот не является бесконечно малой величиной [11]. Для расчета дополнительной фазы ЭМВ недостаточно использование подхода, заключающегося в разложении одного члена фазы, как в выражении (4) [9]. Поэтому разложение описывающей тригонометрической функции в ряд до второго порядка малости позволяет уточнить сумму частотных составляющих двух гармонических волн. В этом случае, согласно [9], при определении данной функции с учетом длительности электромагнитных волн используют формулу (5) [11].

$$f_{рез.} = f_{cp.} + \frac{\Delta f_{1-2}}{2} \times \frac{A_2 - A_1}{A_1 + A_2} \times \left(1 + \frac{1}{12} \times (\Delta f_{1-2} t)^2\right). \quad (5)$$

Результаты и их обсуждение

Используя известный подход к оценке суммы гармонических волн с учетом гармонической функции средней частоты [9–11], для определения накладываемых составляющих ЭМП в расширенном до 300 ГГц диапазоне в зонах одновременного влияния нескольких разноудаленных от точки контроля излучающих источников с различными амплитудами и частотами излучения, отличающимися менее чем в 3 раза, предлагается использовать выражение (6), а при значительной разнице между частотами электромагнитных волн (более чем в 3 раза) – формулу (7) соответственно.

$$f_{рез.} = f_{cp.} + \frac{1}{2} \left(\frac{A_2 - A_1}{A_1 + A_2} |\Delta f_{1-2}| + \dots + \frac{A_n - A_{n-1}}{A_{n-1} + A_n} |\Delta f_{(n-1)-n}| \right) \quad (6)$$

$$f_{рез.} = f_{cp.} + \left(\frac{\Delta f_{1-2}}{2} \times \frac{A_2 - A_1}{A_1 + A_2} \times \left(1 + \frac{1}{12} \times (\Delta f_{1-2} t)^2\right) + \dots + \frac{\Delta f_{(n-1)-n}}{2} \times \frac{A_n - A_{n-1}}{A_{n-1} + A_n} \times \left(1 + \frac{1}{12} \times (\Delta f_{(n-1)-1} t)^2\right) \right), \quad (7)$$

где $\Delta f_{(n-1)-1}$ – разность между частотами $(n-1)$ и n накладываемых электромагнитных волн, Гц.

Подставляя формулу (2) в (3), можно получить выражение (8), позволяющее определять результирующее значение амплитуды накладываемых частотных составляющих электромагнитного поля в зоне влияния двух источников, излучающих волны в одной плоскости на различных расстояниях от точки контроля:

$$A_{\Sigma f_1} = A_{11f_1} \cos \omega_1 \left(t - \frac{\sqrt{(x_1 - x_{H1})^2 + (y_1 - y_{H1})^2}}{v} \right) + \quad (8)$$

$$+ A_{12f_1} \cos \omega_1 \left(t - \frac{\sqrt{(x_1 - x_{H2})^2 + (y_1 - y_{H2})^2}}{v} \right).$$

С учетом полученных выражений (6)-(8) разработана методика определения суммы гармонических волн и результирующей амплитуды наложенных частотных составляющих электрического, магнитного и электромагнитного полей (далее методика наложения ЭМП) в зонах одновременного влияния нескольких разноудаленных от точки контроля и излучающих электромагнитные волны в пределах одной плоскости источников широкого частотного диапазона

на, алгоритм которой представлен на рис. 2. Практическая реализация предложенной методики рассмотрена на примере производственного помещения тепличного хозяйства с системой управления микроклиматом и электрической панелью в зоне их одновременного влияния. При исследовании использовались анализатор спектра АКС-1201, устройство для измерения радиочастотных ЭМП (30 МГц – 30 ГГц), прибор ПЗ-41 и разработанное программное обеспечение [8, 10].

Инструментальный контроль электромагнитной обстановки проводился на высоте 1 м от уровня пола в средней точке между контролируемыми объектами (1,52 м), результаты которого для электрического поля частотного диапазона 10–160 кГц сведены в табл. 1. Промежуточные и конечные результаты определения суммы гармонических волн и результирующей

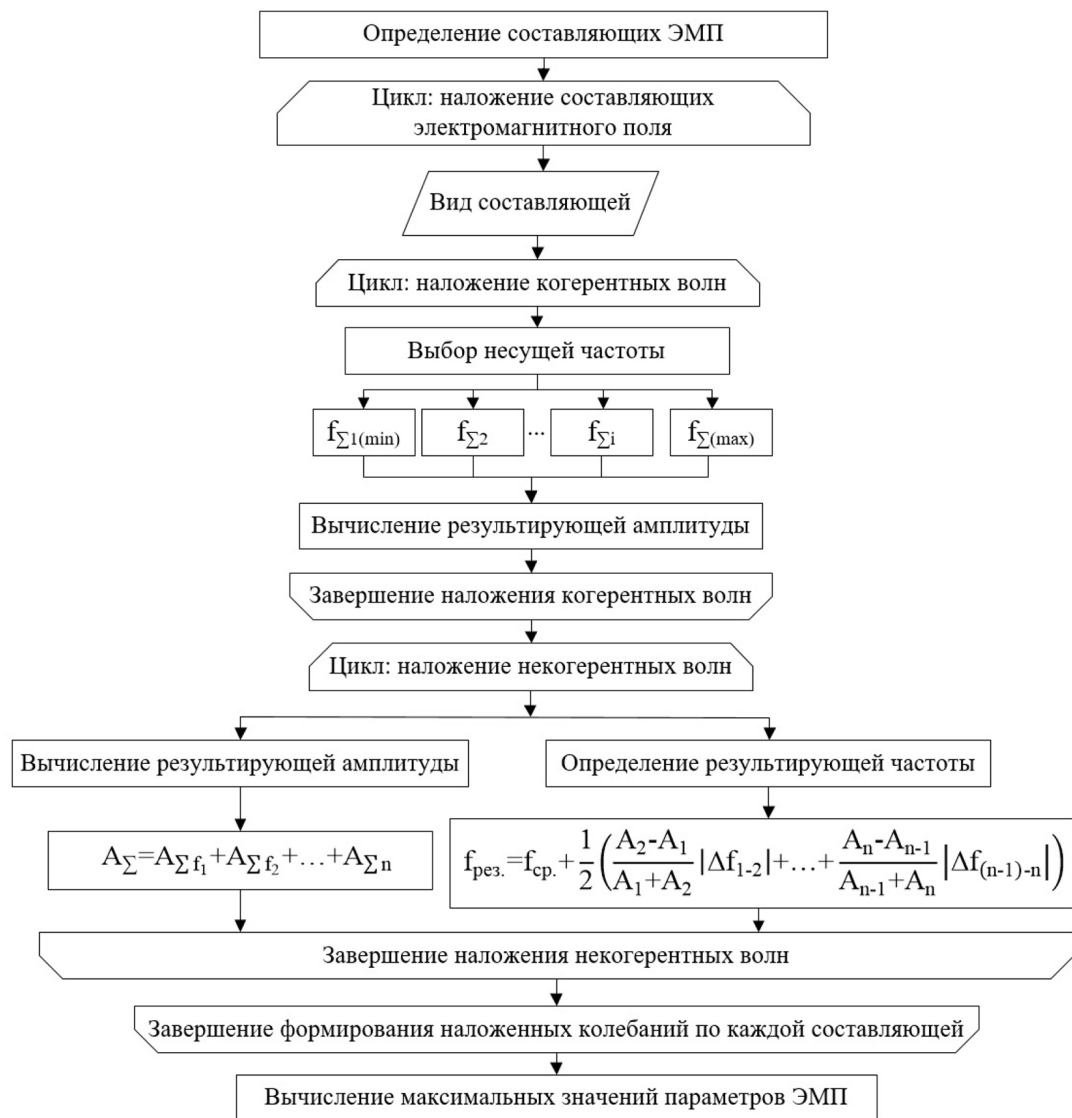


Рис. 2. Алгоритм наложения ЭМП в диапазоне частот до 300 ГГц

Fig. 2. EMF superposition algorithm in the frequency range up to 300 GHz

Табл. 1. Результаты определения наложенного электрического поля в диапазоне частот 10–160 кГц

Табл. 1. Результаты определения наложенного электрического поля в диапазоне частот 10–160 кГц

Результаты измерения		Результаты наложения частотных составляющих электрического поля			
		1 этап		2 этап	
Частота, кГц	Е, В/м	Сумма гармонических волн, кГц	Промежуточная амплитуда, В/м	Сумма гармонических волн, кГц	Результирующая амплитуда, В/м
10	2,27	29,76	4,12	71,35	5,96
50	1,85				
70	1,06	114,087	1,84		
160	0,78				

амплитуды получены в соответствии с предложенной методикой наложения электрического, магнитного и электромагнитного полей в условиях одновременного влияния нескольких излучающих источников (рис. 2) и также сведены в табл. 1. На рис. 3 представлена картина наложения частотных составляющих электрического поля, полученных на первом этапе расчета с использованием разработанного программного обеспечения [8, 10].

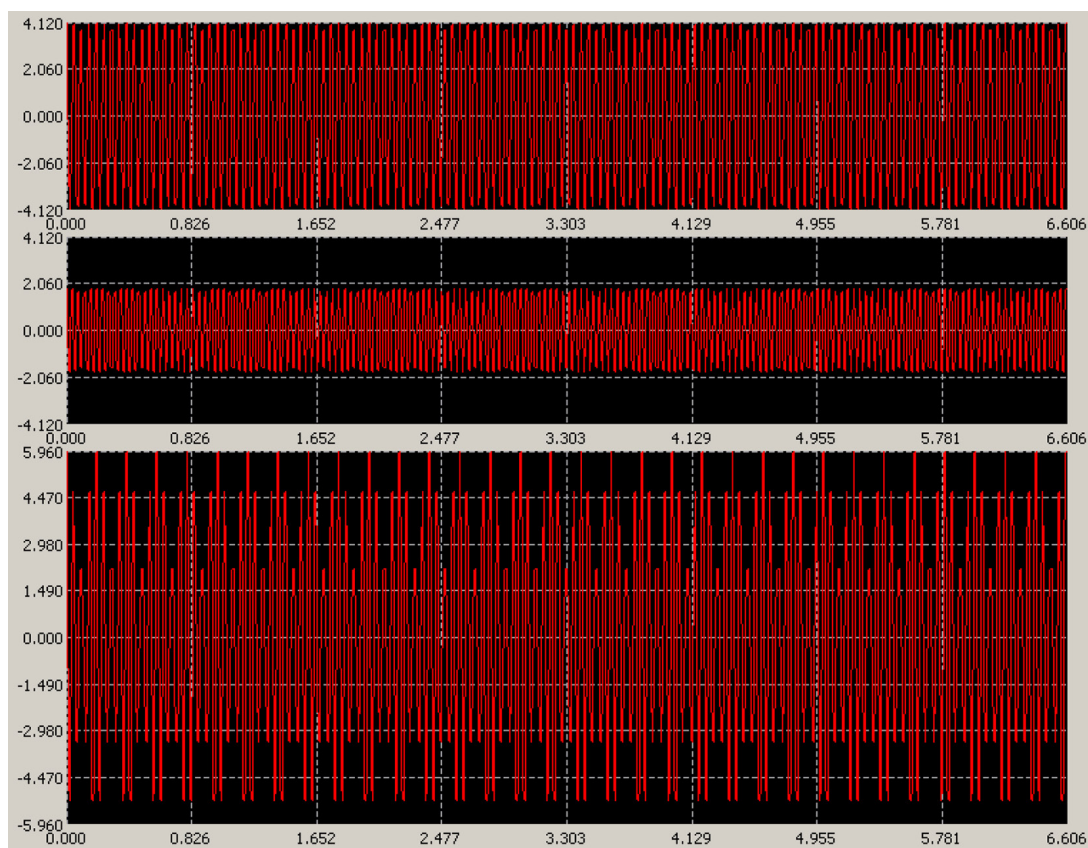


Рис. 3. Результат наложения результирующей составляющей электрического поля

Fig. 3. Result of superposition of resultant electric field components

Разработанную методику определения суммы гармонических волн и результирующей амплитуды наложенных электромагнитных волн предлагается использовать для оценки электромагнитной обстановки в зонах одновременного влияния нескольких разноудаленных и излучающих в пределах одной плоскости источников с учетом наложения частотных составляющих электрического, магнитного и электромагнитного полей в широком частотном диапазоне от 3 Гц до 300 ГГц. Процесс наложения гармонических электромагнитных волн условно можно разбить на два цикла: наложение когерентных и некогерентных волн. При наложении когерентных волн выбирается несущая частота и определяется результирующая амплитуда (выражение (8)). В условиях влияния некогерентных излучающих источников предлагается определять не только результирующую амплитуду, но и сумму гармонических волн (выражения (6)–(7)) с учетом математических функций, одна из которых является гармонической функцией средней частоты.

Заключение

Таким образом, при оценке электромагнитной обстановки в зонах одновременного влияния нескольких разноудаленных и расположенных в пределах одной плоскости излучающих широкополосные электромагнитные поля источников необходимо учитывать сумму гармонических волн и результирующую амплитуду частотных составляющих электрического, магнитного и электромагнитного полей в широком диапазоне от декамегаметровых до миллиметровых волн. Сумму гармонических волн и результирующую амплитуду наложенных электромагнитных волн можно определить с использованием предложенной методики наложения ЭМП и разработанного программного обеспечения.

Список литературы / References

- [1] Lai H. Genetic effects of non-ionizing electromagnetic fields, *Electromagnetic Biology and Medicine*, 2021, 40(2), 264–273
- [2] Маслов М. Ю., Сподобаев Ю. М., Сподобаев М. Ю. Обоснование предметной области электромагнитной безопасности, *Электросвязь*, 2018, 11, 63–67 [Maslov M. Yu., Spodobayev Yu. M., Spodobayev M. Yu. Substantiation of the subject area of electromagnetic safety, *Telecommunication*, 2018, 11, 63–67 (in Rus.)]
- [3] Ziegelberger G., Croft R., Feychting. M and et. al. Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz), *Health Physics*, 2020, 118, 5, 483–524
- [4] Gultekin D. H., Siegel P. H. Absorption of 5G Radiation in Brain Tissue as a Function of Frequency, Power and Time, *IEEE Access*, 2020, 8, 115593–115612
- [5] Pan D., Jiang Z., Maldague X., Gui W. Research on the Influence of Multiple Interference Factors on Infrared Temperature Measurement, *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21, 9, 10546–10555
- [6] Barnes F., Greenebaum B. Setting Guidelines for Electromagnetic Exposures and Research Needs, *Bioelectromagnetics*, 2020, 41, 5, 392–397
- [7] Малышев Л. Г., Повзнер А. А. *Избранные главы курса физики. Колебания и волны*. Урал. ун-т, 2017, 200 [Malyshev L. G., Povzner A. A. *Selected chapters of the physics course. Fluctuations and waves: Study guide*, Ural. Unct, 2017, 200 (In Rus.)]
- [8] Titov E. V., Soshnikov A. A., Drobyazko O. N. Experimental research of electromagnetic environment in domestic environment with computer visualization of electromagnetic pollution,

Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, Sochi. Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020, 9112010

[9] Ревинская О.Г., Кравченко Н.С. *Сложение колебаний. Биения*, Томский политехнический университет, 2022. 21 [Revinskaya O. G., Kravchenko N. S. *Addition of vibrations*, Tomsk Polytechnic University, 2022. 21 (In Rus.)].

[10] Titov E. V., Soshnikov A. A., Migalev I. E. Computer Imaging of Electromagnetic Environment in Air Space with Industrial Electromagnetic Field Sources in Conditions of Combined Influence of EM Radiation, *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, 2022, 22, 1, 34–40.

[11] Yang M., Xie S., Zhang S., Yang Y. Space-Frequency Domain Non-blind Method For Wideband Electromagnetic Imaging Restoration *International Applied Computational Electromagnetics Society (ACES-China) Symposium*, 2021, 1–2.

[12] Rylander T., Pär I., Bondeson A. *Computational Electromagnetics: In Texts in Applied Mathematics*. New York: Springer-Verlag, 2013. 222

[13] Круг К. А. *Основы электротехники. Учебник для вузов. Том 2*. Москва: Госэнергоиздат, 1946. 637 [Krug K. A. *Fundamentals of Electrical Engineering. Textbook for universities. Volume 2*, Moscow: Gosenergoizdat, 1946, 637 (In Rus.)].

[14.] Санникова Г.И. Применение метода координат при решении задач, *Старт в науке*, 2020, 6 (209), 102–108. [Sannikova G. I. Application of the coordinate method in problem solving. *Start in science*, 2020, 6(209), 102–108 (In Rus.)].

[15] Байрамкулова А.Х. Использование метода координат при решении задач на построение, *Проблемы современного педагогического образования*, 2019, 62–3, 19–23 [Bayramkulova A. H. Use of the method of coordinates in solving problems on construction. *Problems of modern pedagogical education*. 2019, 62–3, 19–23. (In Rus.)].

**Math Modeling.
Numerical Experiment**

**Математическое
моделирование.
Численный
эксперимент**

EDN: SQPUEG

УДК 621.745:621.746:621.791

Modeling of the Stage of the Combined Casting and Stamping Process of Cu–MMNCr Composite Material for Resistance Welding Electrodes with Features of the Formation of Structure and Properties

Sergei L. Busygin*, Ivan N. Dovzhenko,
Nikolai N. Dovzhenko and Aleksandr M. Tokmin
*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 17.10.2023, received in revised form 13.01.2024, accepted 24.02.2024

Abstract. The article discusses computer modeling of the stage of hot stamping of the volumetric thermal and stress-strain state for a product – a resistance welding electrode using the specialized professional program Deform 3D. Computer modeling has established that the greatest influence on the hardness over the cross section of the manufactured electrode is exerted by: average normal stress, intensity of deformation and deformation rate, which contributes to the generation of a large number of dislocations. The features of the formation of the macro- and microstructure of the Cu–MMNCr composite material were studied under the conditions of a combined process of casting and stamping with subsequent heat treatment. The mechanism for identifying grain boundaries is described. The relationships between the distribution of hardness and the parameters of the thermal and stress-strain state in the volume of a product made of the Cu–MMNCr composite material using the combined method of casting and stamping with subsequent heat treatment have been derived. The results of the physical and mechanical properties of the Cu–MMNCr composite material obtained by a combined method of casting and stamping with subsequent heat treatment are presented.

Keywords: computer modeling, chromium bronze, resistance welding electrodes, composite material, stress-strain state, etching.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (scientific topic code FSRZ-2020–0011).

Electron microscopic studies were carried out in the laboratory of electron microscopy of the SIBFU Center for Collective Use.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: politex_1999@bk.ru; ivandov@mail.ru; n.dovzhenko@bk.ru; tam550@yandex.ru

Citation: Busygin S. L., Dovzhenko I. N., Dovzhenko N. N., Tokmin A. M. Modeling of the stage of the combined casting and stamping process of Cu–MMNCr composite material for resistance welding electrodes with features of the formation of structure and properties. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(2), 250–264. EDN: SQPUEG



Моделирование стадии совмещенного процесса литья – штамповки композиционного материала Cu–MMNCr для электродов контактной сварки с особенностями формирования структуры и свойств

С. Л. Бусыгин, И. Н. Довженко,
Н. Н. Довженко, А. М. Токмин
*Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. В статье рассмотрено компьютерное моделирование стадии горячей штамповки объёмного теплового и напряженно-деформированного состояния для изделия – электрод контактной сварки с использованием специализированной профессиональной программы Deform 3D. Компьютерным моделированием установлено, что наибольшее влияние на твёрдость по сечению изготовленного электрода оказывают: среднее нормальное напряжение, интенсивность деформаций и скоростей деформации, способствующее генерированию большого числа дислокаций. Исследованы особенности формирования макро– и микроструктуры композиционного материала Cu–MMNCr в условиях совмещенного процесса литья и штамповки с последующей термообработкой. Описан механизм выявления границ зерен. Выведены взаимосвязи между распределением твёрдости и параметрами теплового и напряженно-деформированного состояния в объёме изделия из композиционного материала Cu–MMNCr при совмещённом способе литья – штамповки с последующей термической обработкой. Представлены значения физико-механических свойств композиционного материала Cu–MMNCr, полученного совмещённым способом литья – штамповки с последующей термической обработкой.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, хромистая бронза, электроды контактной сварки, композиционный материал, напряженно-деформированное состояние, травление.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код научной темы FSRZ-2020–0011).

Электронно-микроскопические исследования проведены в лаборатории электронной микроскопии Центра коллективного пользования СФУ.

Цитирование: Бусыгин С. Л. Моделирование стадии совмещенного процесса литья – штамповки композиционного материала Cu–MMNCr для электродов контактной сварки с особенностями формирования структуры и свойств / С. Л. Бусыгин, И. Н. Довженко, Н. Н. Довженко, А. М. Токмин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(2). С. 250–264. EDN: SQPUEG

1. Введение

Изготовление электродов контактной сварки совмещенным процессом литья – штамповки – позволяет за один цикл получить готовое изделие без дополнительных операций механической обработки. В процессе штамповки пуансоном прошивается канал охлаждения электрода с вытесне-

нием композиционного материала Cu–MMNCr из штампа. Построить модели процесса штамповки электродов контактной сварки типа D можно с помощью профессиональной системы компьютерного моделирования Deform 3D [1]. Компьютерная программа позволяет провести анализ трехмерного (3D) поведения металла при различных технологических процессах обработки давлением. Также предоставляет исчерпывающую информацию о течении композиционного материала Cu–MMNCr в штампе и распределении температур, а также давлений во время процесса штамповки.

В процессе штамповки композиционного материала Cu–MMNCr формируется структура, на которую могут оказывать влияние распределения в объёме заготовки таких параметров, как интенсивность деформаций, скоростей деформаций и интенсивность напряжений.

Целью данной работы является исследование методом компьютерного моделирования теплового и напряженно-деформированного состояния совмещённой горячей штамповки – прошивки изделий из композиционного материала Cu–MMNCr, изучение особенностей формирования структуры и физико-механических свойств.

2. Постановка задач для моделирования, материалы, оборудование и методика проведения экспериментов

Постановка задачи для моделирования в Deform 3D включает три базовых этапа:

1. Построение расчётной сетки из CAD-модели (штамп, электрод).
2. Задание материалов и параметров штамповки.
3. Расчёт и анализ результатов моделирования.

Штампующий композиционный материал Cu–MMNCr соответствует сплаву С 81300–С 82800 [2] системы Cu – 1,0 % Cr (мас.%).

Материалы штампа: форма – сталь X12M ГОСТ 5950–2000, пуансон – сталь У8 ГОСТ 1435–99.

Расплав заливали в металлическую форму, при достижении металлом температуры 950 °С производили прошивку на механическом прессе К117Д канала для охлаждения электрода в процессе эксплуатации. Получаемый электрод соответствует типу D ГОСТ ISO 15609–5–2020 [3].

Для выполнения операции старения электроды нагревали в муфельной печи СНОЛ-1.62.5.1/11–ИЗ при температуре 450 °С в течение 4 часов [3].

Измерения удельной электрической проводимости образцов осуществляли по ГОСТ 27333–87 на микроомметре Ф4104–М1 [3].

Из изготовленных электродов вырезали образцы для исследования механических, электропроводных свойств, макро– и микроструктуры.

Образцы подвергали тонкой шлифовке и полировке. Шлифовку проводили на абразивах разной степени дисперсности. Для окончательного выравнивания поверхности шлиф полировали до зеркального блеска, используя алмазную пасту АСМ 0,25/0 НОМ по ГОСТ 25593–83. Травление образцов для анализа микроструктуры осуществляли нанесением реактива (50 мл C_2H_5OH , 2,5 г $FeCl_3$) на поверхность образца. Микроструктуру образцов исследовали на инвертированном металлографическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer MAT. Микроструктуру образцов и элементный состав исследовали на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-7001F с использованием контраста во вторичных электронах и энергодисперсионного микроанализа (EDX) [3].

Измерения твердости образцов проводили по ГОСТ 9013–59 на твердомере ТР 5014, по шкале твердости F, при величине испытательной нагрузки $P=588,4$ Н, диаметр шарика 1,588 мм. Измерения микротвердости образцов осуществляли по ГОСТ 9450–76 на приборе ПМТ-3 при величине испытательной нагрузки $P=0,098$ Н с интервалом между замами 150–200 мкм [3].

3. Результаты моделирования проведенных экспериментов, обсуждение

При подготовке модели производили разбивку на элементы (рис. 1): заготовка 313 тыс. (на первом шаге, потом перестраивалась автоматически до 280 тыс.), металлическая форма 29 тыс., пуансон 32 тыс. Для расчёта использовали процессор Intel® Core™ i9–11900k 8 ядер, 16 МБ кэш-памяти, тактовая частота до 5,30 ГГц.

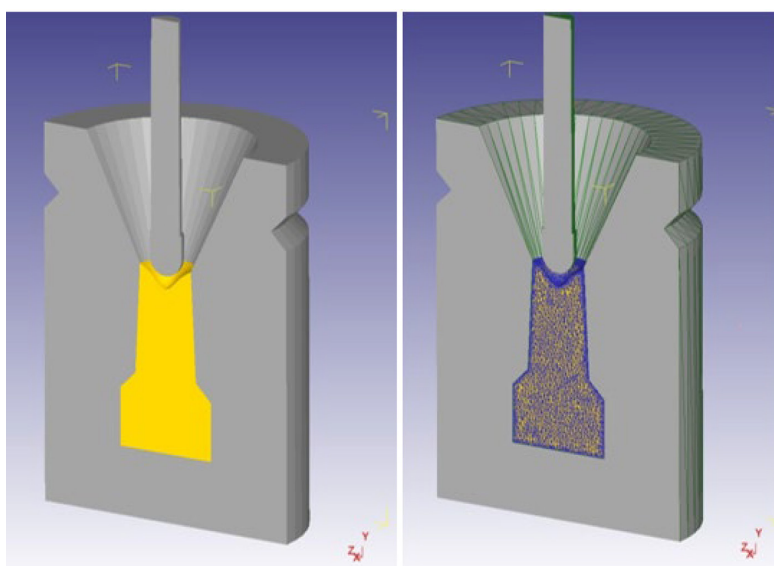


Рис. 1. Разбивка на элементы моделей штампа и электрода

Fig. 1. Breakdown of stamp and electrode models into elements

3.1. Моделирование прошивки охлаждаемого канала электрода штамповкой

Штамповка происходит при температуре 950 °С, изменение температурного поля во времени показано на рис. 2а, остывание происходит от угловых точек рабочей части электрода и сужения на конусе. График изменения усилия на пуансоне во времени показан на рис. 2b. Максимальное прилагаемое усилие составляет 29 кН.

Высокие скорости охлаждения (температура в поверхностных слоях снижается до 725 °С за 0,17 с) позволяют производить закалку в процессе штамповки заготовки, исключая дополнительную операцию нагрева для закалки.

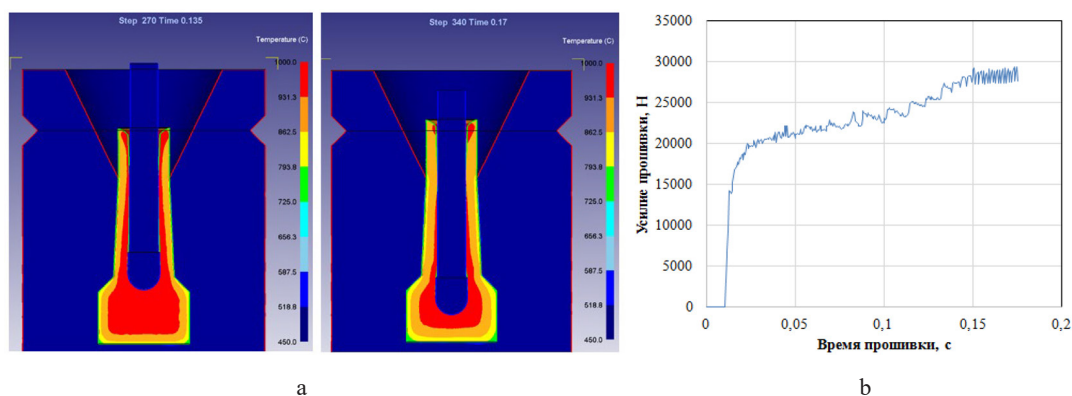


Рис. 2. Изменение температурного поля (а) и усилия на пуансоне (b) при прошивке во времени

Fig. 2. Change in temperature field (a) and force on the punch (b) during piercing over time

3.2. Моделирование параметров интенсивности деформаций, скоростей деформаций, интенсивности напряжений и объемного напряжения

На формирование будущей структуры может оказать влияние распределение в объеме заготовки таких параметров, как интенсивность деформаций, скоростей деформаций и напряжений. Поля интенсивности деформаций в различные моменты времени процесса показаны на рис. 3. Видно, что наиболее интенсивные деформации преобладают в конусной части и под пуансоном. Поскольку деформация идёт в закрытом объёме, то деформации будут достаточно малы, но их распространение можно увидеть при расчёте интенсивности скоростей деформации, как показано на рис. 4.

Температурный интервал горячего деформирования сплавов находится в пределах 700–950 °C [4]. На рис. 4 наблюдается более обширная область деформационного воздействия, что оказывает влияние на формирование точечных и линейных дефектов, размера зёрен с учётом температурного поля (рис. 2а). Характеру распределения интенсивности скоростей деформации соответствует и распределение интенсивности напряжений, показанное на рис. 5. Уровень интенсивности напряжений под пуансоном превышает предел текучести сплава, а, следова-

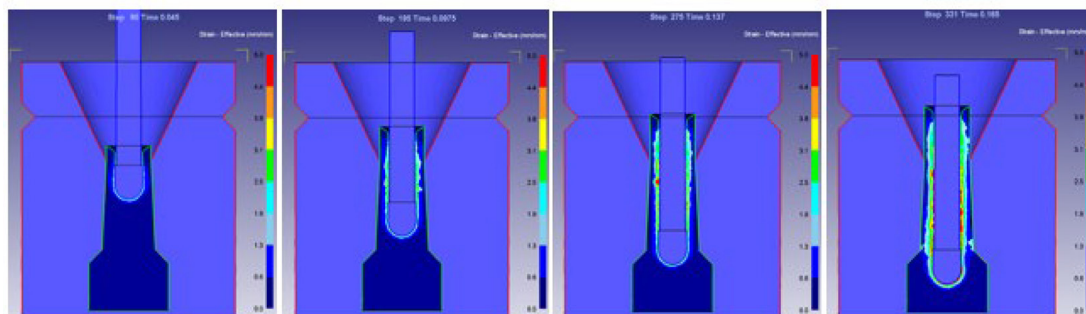


Рис. 3. Изменение интенсивности деформаций в различные моменты времени штамповки

Fig. 3. Change in strain intensity at different times of stamping

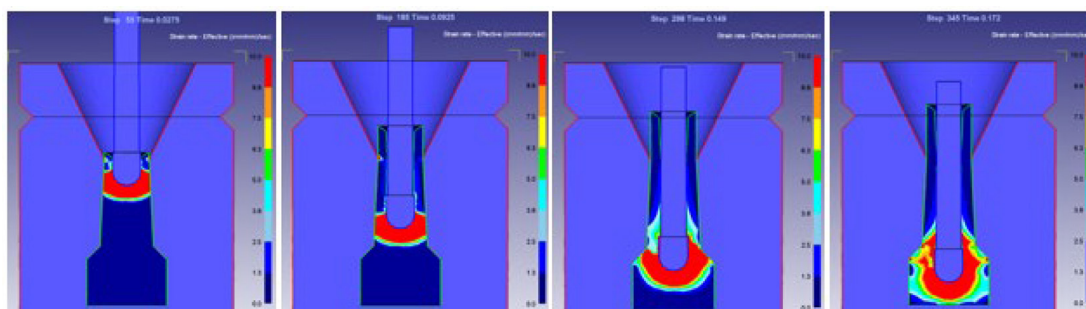


Рис. 4. Изменение интенсивности скоростей деформаций в различные моменты времени штамповки

Fig. 4. Changes in the intensity of strain rates at different moments of stamping time

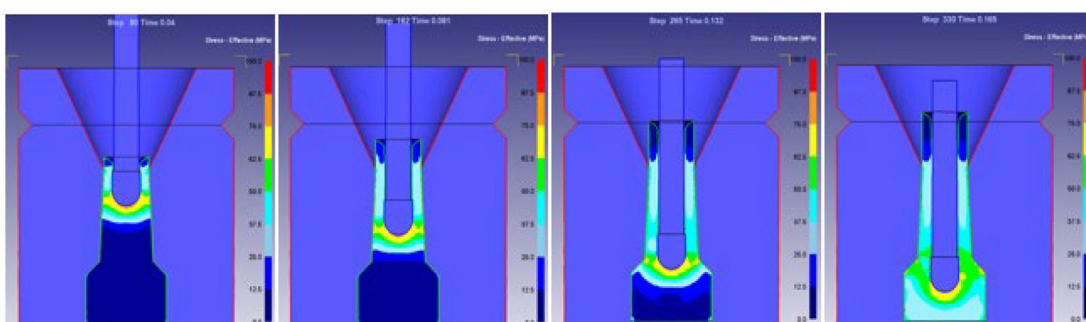


Рис. 5. Изменение интенсивности касательных напряжений в различные моменты времени штамповки

Fig. 5. Change in intensity of shear stresses at different moments of stamping time

тельно, область «теплового узла» с распределённой микропористостью продеформируется и при наложении сжимающих напряжений поры устраняются (рис. 6 – изменение напряжений вдоль оси электрода и рис. 7 – изменение радиальных напряжений).

Компьютерное моделирование распределения в объёме заготовки таких параметров, как интенсивность деформаций (Λ), интенсивность скоростей деформаций (H), интенсивность касательных напряжений (T) и среднее нормальное напряжение (σ_0), позволяет сформиро-

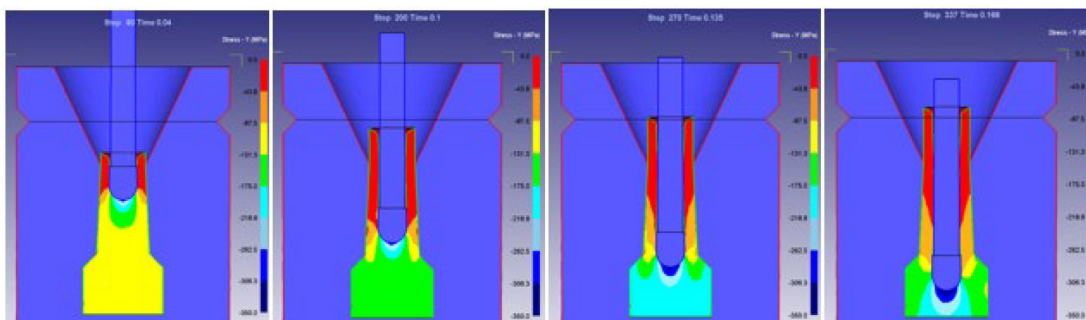


Рис. 6. Изменение напряжений вдоль оси электрода в различные моменты времени штамповки

Fig. 6. Change in voltages along the electrode axis at different times of stamping

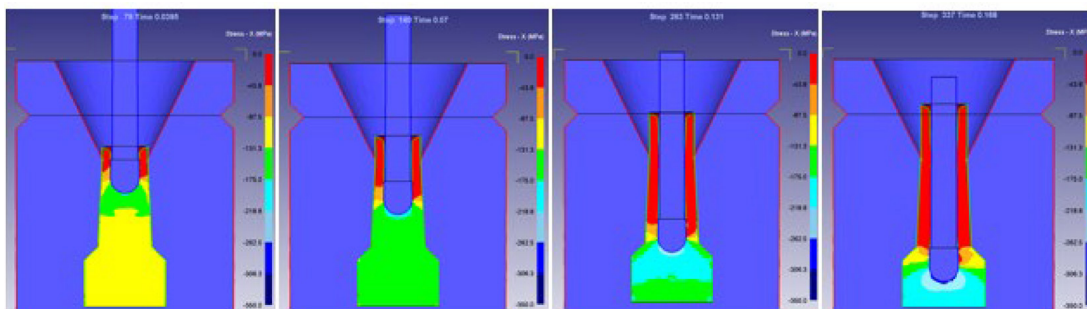


Рис. 7. Изменение радиальных напряжений в различные моменты времени штамповки

Fig. 7. Change in radial stresses at different times of stamping

вать представление о структурных изменениях, происходящих после деформации и охлаждения электрода. Так как по мере опускания пуансона в рабочую часть область действия деформаций расширяется, можно наблюдать места в заготовке, где преобладают совсем малые деформации. При малой деформации и при большом объемном напряжении генерируются дислокации [5].

3.3. Исследование особенностей формирования макро– и микроструктуры, элементного состава композиционного материала Cu–MMnCr в условиях совмещенного процесса литья и штамповки с последующей термообработкой

Высокая скорость при горячей деформации и пребывание металла в течение долей секунды при высокой температуре по завершении деформации вносит значительные изменения в структуру по сравнению с состоянием сразу после деформации.

В процессе штамповки сплава при 950 °C наблюдаются высокие скорости охлаждения (рис. 2). Температура сплава в поверхностных слоях снижается на 225 °C за 0,17 с, что позволяет производить закалку в процессе штамповки электрода с последующим охлаждением в воде. Образуется характерная микроструктура после закалки (рис. 8а). Следовательно, исключается дополнительный нагрев полученных изделий для закалки, так как высокотемпературный нагрев до 1000 °C приводит к сильному окислению изделий с образованием слоя окалины. Под окалиной формируются слои внутреннего окисления из-за диффузии вглубь металла кислорода и частичного или полного окисления хрома в твердом растворе. Хром в большинстве случаев остается в форме оксидов и не принимает участия в упрочнении при старении [6].

После штамповки наблюдается характерная макроструктура (рис. 9а). При горячей штамповке зерна структуры в месте прошивки пуансоном уплотняются и измельчаются (рис. 9а). Равноосное строение как мелких, так и укрупненных зерен наблюдается по всей площади рабочей части электрода.

В закаленном состоянии хромовые бронзы могут отличаться высокой пластичностью и вязкостью, при этом обладая невысокой прочностью [6]. Повысить прочность и твердость сплава можно старением, при котором увеличивается объемная доля выделений второй фазы. Оптимальные режимы старения штампованного сплава: нагрев до 450 °C в течение 4 часов [7].

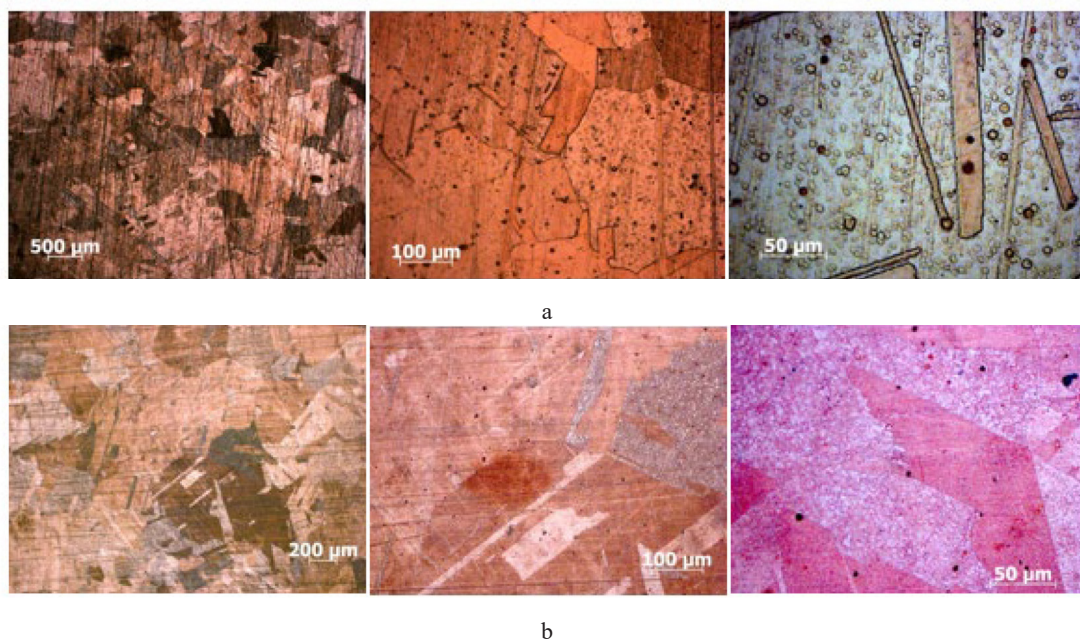


Рис. 8. Микроструктура литых – штампованных электродов: (а) литье – штамповка – закалка; (б) литье – штамповка – закалка – старение

Fig. 8. Microstructure of cast – stamped electrodes: (a) casting – stamping – hardening; (b) casting – stamping – hardening – aging



Рис. 9. Макроструктура литых – штампованных электродов: (а) литье – штамповка – закалка; (б) литье – штамповка – закалка – старение

Fig. 9. Macrostructure of cast – stamped electrodes: (a) casting – stamping – hardening; (b) casting – stamping – hardening – aging

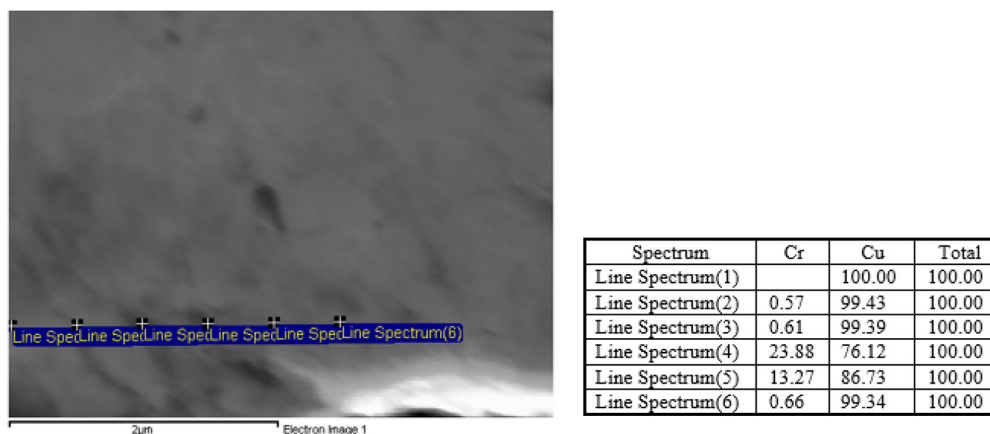


Рис. 10. СЭМ-изображение микроструктуры сплава с элементным составом

Fig. 10. SEM image of the microstructure of an alloy with elemental composition

Диффузионные процессы, происходящие во время старения, снижают концентрацию легирующего элемента по сечению зерен, что проявляется в формировании однородной структуры, приведенной на рис. 9б. Элементный состав поверхности образца электрода (рис. 10) показывает наличие частиц хрома в сплаве.

У большинства сплавов нарушена укладка плотных слоев атомов, имеющих низкую энергию дефекта упаковки [8]. На микроструктуре (рис. 8б) можно отчетливо наблюдать сформировавшиеся пары кристаллов двойников. Проходящая между двойниками граница имеет упорядоченную атомную структуру, что соответствует структуре дефекта упаковки. Границы зерен со строгой прямолинейностью придают структуре свойственный вид. Обнаруженный наблюдаемый зональный контраст границ двойников является строго прямолинейным, с соответствующими резкими изломами при переходе от когерентного к некогерентному участку и наоборот. Двойники в микроструктуре исчезают с большим трудом и при весьма высоких температурах нагрева. Исчезновение двойника происходит при движении некогерентной границы, поэтому при нагреве часто происходит укрупнение двойников и образуются двойники рекристаллизации, которые являются выросшими двойниками деформации [9].

Выявление границ зерен в литом деформированном состоянии и после операций термообработки позволяет осуществить технология травления. Длительное время травления проявляет как границы, так и поверхностные слои зёрен, а плотность упаковки атомов влияет на интенсивность травления. У плотно упакованных атомов растворение идет медленно (зерна светлого цвета), в отличие от атомов с низкой плотностью упаковки (зерна темного цвета) и одинаковым химическим составом (рис. 8). При слабой химической активности травителя сначала выявляются только границы зерен, а остальной шлиф смотрится светлым (рис. 8а). Определенные условия кристаллизации твердых растворов позволяют при травлении также выявлять ликвационную неоднородность. В этом случае ориентация зерен и химический состав элементов, входящих в твердый раствор, будут влиять на интенсивность травления [10, 11].

3.4. Механические и электропроводные свойства литого – штампованного композиционного материала Cu–MMNCr

В нашем случае горячая деформация композиционного материала происходит при 950 °С в состоянии повышенной пластичности, в том числе диффузионной. В этот момент совершаются два конкурирующих процесса – упрочнение и разупрочнение. При упрочнении увеличиваются плотности дислокаций под влиянием внешних сил, а также взаимодействием дислокаций с образованием сложных дислокационных сплетений разной степени стабильности и разной подвижности. Разупрочнение заключается в перераспределении и уменьшении плотности дислокаций с образованием энергетически более устойчивых конфигураций [12].

В табл. 1 приведены исходные данные для оценки корреляции между микротвердостью, Λ – интенсивностью степеней деформаций; H – интенсивностью скоростей деформации, c^{-1} ; T – интенсивностью касательных напряжений, МПа; σ_0 – средним нормальным напряжением (гидростатическим давлением), МПа; HV – микротвердостью в 10 точках.

В условиях малых деформаций при штамповке в фактически закрытом объёме массивной части электрода интенсивность касательных напряжений (T) не высока и превалирующую роль в формировании ячеистых дислокационных структур будут играть такие параметры [13], как температура, степень (Λ) и скорость деформации (H), вид напряженного состояния (σ). Небольшая пластическая деформация при $T < (0,2-0,3) \cdot T_{пл}$ в 1–2 % приводит к повышению плотности дислокаций от 10^8 см^{-2} (в исходном рекристаллизованном состоянии) до 10^9 см^{-2} с относительно однородным распределением их по объёму.

Для этого используем понятие среднего напряжения:

$$\sigma_{cp} = \sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}. \quad (1)$$

Схема напряжений по октаэдрической площадке, наклоненной по всем главным направлениям, представлена на рис. 11

Таблица 1. Исходные данные для оценки корреляции по микротвердости

Table 1. Initial data for assessing microhardness correlation

№ точек	Λ	H	T	σ	HV
1	0,049960133	2,44515089	40	–152,4	320
2	0,055287024	5,71775891	39,1	–175,9	458
3	0,113365577	14,3691218	49,84775751	–196,6	471
4	0,07437237	5,08	40,21256545	–195	362
5	0,330738003	17,2287519	56,38606888	–209	340
6	3,743263106	74,5008511	76,27275541	–299	472
7	0,082995641	3,35748315	37,75728082	–190	362
8	2,230712555	24,5695264	60,16157906	–214	302
9	7,24540079	73,7888664	72,73436968	–312	473
10	0,214038357	9,37534125	62,83040906	–214	320

Октаэдрическое нормальное напряжение (2) равно среднему из трех главных напряжений:

$$\tau_{\text{окт}} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (2)$$

Распределение значений параметров процесса по точкам фиксации деформационных параметров при моделировании штамповки электрода представлено на рис. 12.

Распределение значений параметров процесса штамповки (рис. 12а) по точкам фиксации деформационных параметров при моделировании штамповки электрода (рис. 12б) показывает, что (рис. 12с) в радиальном направлении наиболее тесная корреляционная связь микротвердости HV со всеми параметрами видна во 2-м слое (синяя стрелка) и затем в порядке убывания в 3-м (зеленая стрелка) и 1-м слоях (черная стрелка). Рассмотрение точек по диагонали рабочей части электрода (оранжевая стрелка) показывает очень сильную связь параметров процесса штамповки и микротвердости HV, близкой к ней является и взаимосвязь по оси электрода (красная стрелка). Наиболее тесные корреляционные взаимосвязи деформационных параметров выделены на рис. 12с красным цветом.

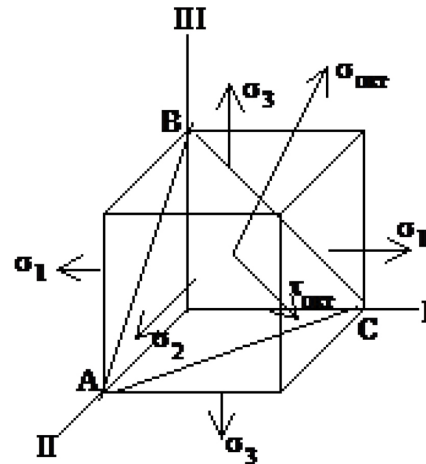


Рис. 11. Схема напряжений по октаэдрической площадке

Fig. 11. Diagram of stresses along the octahedral area

Прямое и косвенное упрочнение обычно вызвано дисперсными частицами второй фазы ($\tau_{\text{дч}}$) [13], выделившимися после операции старения. При прямом упрочнении дисперсные частицы активно взаимодействуют с дислокациями и при пластической деформации металла будут препятствовать распространению скользящих дислокаций. При косвенном упрочнении дисперсные частицы повышают стабильность неравновесного структурного состояния, а также температуру рекристаллизации. Движение дислокаций происходит в мягкой и вязкой матрице по модели Орована, содержащей твердые равноосные частицы упрочнения, и напряжение в этом случае будет определено необходимостью прогнуть дислокацию через рядом расположенные частицы в дугу λ (расстояние между частицами). Поэтому $\tau_{\text{дч}} = 2 \cdot F / b \cdot \lambda$, где $F = G \cdot b^2 / 2$ – линейное натяжение. Тогда $\tau_{\text{дч}} = G \cdot b / \lambda$.

Вводя объёмную концентрацию упрочняющей фазы f_v и учитывая, что:

$$\lambda = r \cdot \sqrt[3]{\frac{4}{3} \cdot \frac{\pi}{f_v}}, \quad (3)$$

где r – радиус частицы, получаем:

$$\tau_{\text{дч}} = 0,6 \cdot G \cdot b^3 \cdot \frac{\sqrt[3]{f_v}}{r}. \quad (4)$$

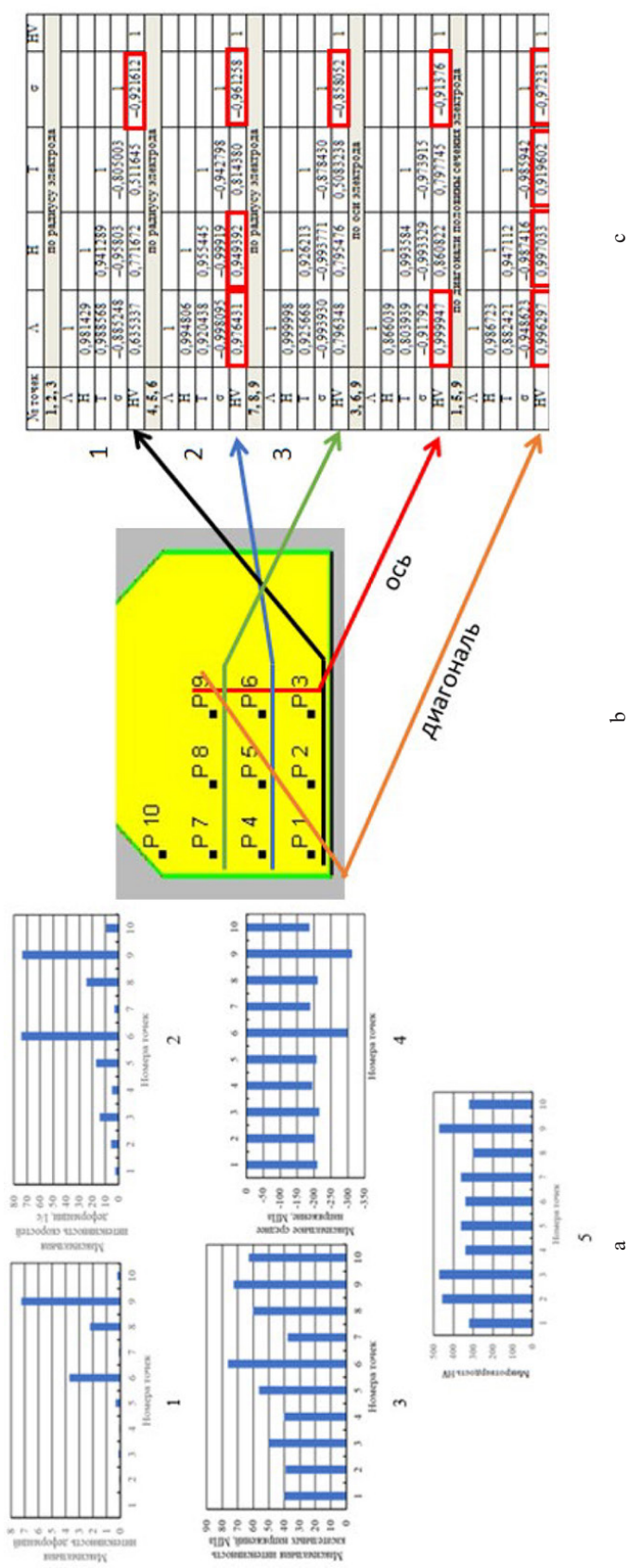


Рис. 12. Распределение значений параметров процесса (а) по точкам фиксации деформационных параметров при моделировании штамповки электрода (b) и коэффициенты корреляции Пирсона между микротвёрдостью HV и параметрами процесса деформации по сечению рабочей части электрода после литья – штамповки – закалки – старения (с)

Fig. 12. Distribution of process parameter values (a) across points of fixation of deformation parameters when simulating electrode stamping (b) and Pearson correlation coefficients between microhardness HV and deformation process parameters across the cross section of the electrode after casting – stamping – quenching – aging (c)

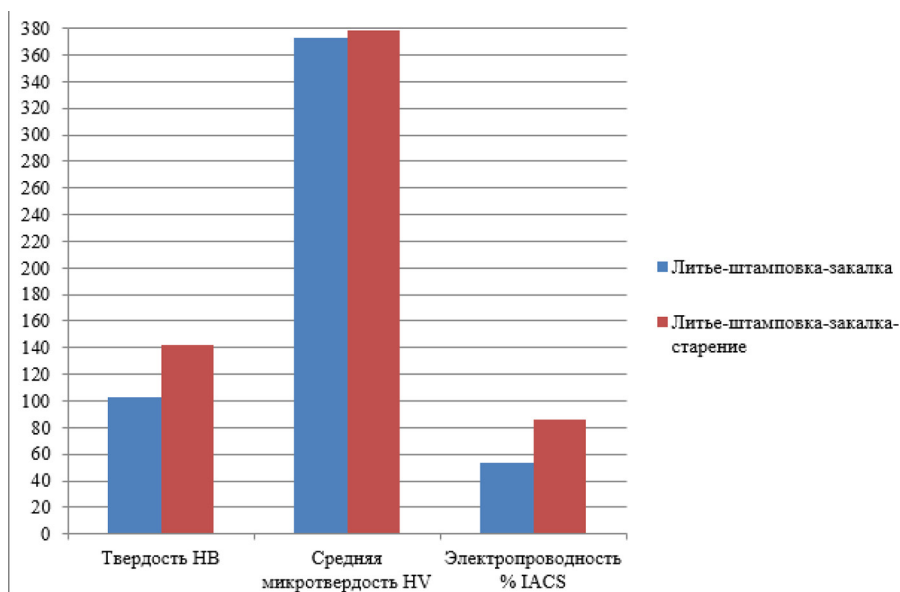


Рис. 13. Значения твердости, средней микротвердости и электропроводности литых – штампованных – закаленных и литых – штампованных – закаленных – состаренных электродов

Fig. 13. Values of hardness, average microhardness and electrical conductivity of cast – stamped – hardened and cast – stamped – hardened – aged electrodes

Таким образом, можно сделать вывод, что упрочняющий эффект существенно зависит от размера и расстояния между частицами и слабо зависит от общего содержания второй фазы.

Полученные значения твердости НВ и средней микротвердости НВ после литья – штамповки – закалки и литья – штамповки – закалки – старения электродов приведены на рис. 13.

После заливки металла в металлическую форму выполняется прошивка охлаждающего канала электрода. Промежуток времени между этими операциями составляет около 10 с. За это время распределение температуры по сечению отливки соответствует модели формирования твердой фазы. Можно отчетливо наблюдать, что начинается кристаллизация объемов металла, контактирующего с поверхностью металлической формы. Объемы металла, расположенные ближе к центральной части, находятся в жидком состоянии. В процессе прошивки происходит быстрая кристаллизация металла за счет возникновения большого градиента температур между жидким металлом и пуансоном (рис. 2а). После извлечения электрода из металлической формы выполняется охлаждение в воде. Такое комбинированное воздействие на кристаллизующийся металл приводит к повышению концентрации хрома в α -твердом растворе. Это вызвано подавлением диффузионных процессов во время охлаждения. Анализ данных электропроводности подтверждает этот эффект, что приводит к снижению электропроводности до 54 % IACS (рис. 13). В процессе старения происходит выделение дисперсных частиц хрома, приводящих к снижению легированности α -твердого раствора и к повышению электропроводности до 86 % IACS (рис. 13).

4. Заключение

1. Установлено на основании компьютерного моделирования стадии горячей штамповки тепловое и напряженно-деформированное состояние для изделия – электрод контактной

сварки. Показано, что наибольшее влияние на твёрдость по сечению изготовленного электрода оказывают в комплексе среднее нормальное сжимающее напряжение (от -180 до -320 МПа), интенсивность касательных напряжений (от 38 до 76 МПа) при малых деформациях, осуществляемых с высокими скоростями деформации, способствующее генерированию большого числа дислокаций.

2. Исследованы особенности формирования макро– и микроструктуры композиционного материала Cu–MMNCr в условиях совмещенного процесса литья и штамповки с последующей термообработкой. Описан механизм выявления границ зерен.

3. Выведены взаимосвязи между распределением твёрдости и параметрами теплового и напряженно-деформированного состояния в объёме изделия из композиционного материала Cu–MMNCr при совмещённом способе литья – штамповки с последующей термической обработкой.

4. Элементный состав поверхности образца электрода показывает, что в процессе старения происходит выделение дисперсных частиц хрома, приводящих к снижению легированности α -твёрдого раствора, что приводит к увеличению твёрдости до 142 НВ, микротвёрдости до 378 НВ и удельной электропроводности до 86 % IACS.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы / References

[1] Качанов И. В., Кудин М. В., Ленкевич С. А. Компьютерное моделирование в DEFORM-3D для анализа пластического течения при скоростном горячем выдавливании биметаллических формообразующих деталей штамповой оснастки. *Журнал Наука и техника*, 2015, 1, 20–24. [Kachanov I. V., Kudin M. V., Lenkevich S. A. Computer modeling in DEFORM-3D for the analysis of plastic flow during high-speed hot extrusion of bimetallic forming parts of die equipment. *Journal of Science and Technology*, 2015, 1, 20–24. (in Rus.)]

[2] Unified numbering system (UNS) for Copper and Copper Alloys

[3] Бусыгин С. Л., Токмин А. М., Довженко Н. Н., Казаков В. С. Влияние технологии изготовления на свойства электродов из хромистой бронзы для контактной рельефной сварки арматурных стержней. *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2021, 14(8), 914–929. [Busygin S. L., Tokmin A. M., Dovzhenko N. N., Kazakov V. S. The Influence of Manufacturing Technology on the Properties of Chromium-Bronze Electrodes for Contact Relief Welding of Reinforcing Rods. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2021, 14(8), 914–929. (in Rus.)] DOI: 10.17516/1999–494X-0368

[4] Николаев А. К., Розенберг В. М. *Сплавы для электродов контактной сварки*. М.: Металлургия, 1978. 96 [Nikolaev A. K., Rozenberg V. M. *Alloys for resistance welding electrodes*. Moscow, Metallurgiya, 1978, 96 (in Rus.)]

[5] Берштейн М. Л. *Структура деформированных металлов*. М.: Металлургия, 1977. 431 [Bershtein M. L. *Structure of deformed metals*. Moscow, Metallurgiya, 1977, 431 (in Rus.)]

[6] Осинцев О. Е., Федоров В. Н. *Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки. Справочник*. М: Машиностроение, 2004. 336 [Osintsev O. E., Fedorov V. N. *Copper and*

copper alloys. Domestic and foreign brands: Directory. Moscow, Mechanical engineering, 2004, 336 (in Rus.)]

[7] Николаев А.К., Новиков А.И., Розенберг В.М. *Хромовые бронзы*. М.: Металлургия, 1983. 176 [Nikolaev A.K., Novikov A.I., Rozenberg V.M. *Chromium bronze*. Moscow, Metallurgiya, 1983, 176 (in Rus.)]

[8] Вишняков Я.Д. *Дефекты упаковки в кристаллической структуре*. М.: Металлургия, 1970. 216 [Vishnyakov Ya.D. *Packing defects in the crystal structure*. Moscow, Metallurgiya, 1970, 216 (in Rus.)]

[9] Чикова Т.С. *Физика и механика деформационного двойникования металлов*. дис. докт. физ. – мат. наук. Санкт-Петербург, 2004, 281 [Chikova T.S. *Physics and mechanics of deformation twinning of metals*. Thesis doc. physics and mathematics. Sci. Saint Petersburg, 1983, 176 (in Rus.)]

[10] Большаков В.И., Сухомлин Г.Д., Лаухин Д.В. *Атлас структур металлов и сплавов*. Днепропетровск: ГВУЗ «ПГАСА», 2010. 174 [Bolshakov V.I., Sukhomlin G.D., Laukhin D.V. *Atlas of structures of metals and alloys*. Dnepropetrovsk, GVUZ «PGASA», 2010, 174 (in Rus.)]

[11] Баррет Ч.С., Массальский Т.Б. *Структура металлов*. М.: Металлургия, 1984. 686 [Barrett C.S., Massalsky T.B. *Structure of metals*. Moscow, Metallurgiya, 1984, 686 (in Rus.)]

[12] Горелик С.С. *Рекристаллизация металлов и сплавов*. М.: Металлургия, 1978. 568 [Gorelik S.S. *Recrystallization of metals and alloys*. Moscow, Metallurgiya, 1978, 568 (in Rus.)]

[13] Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. *Физические основы пластических деформаций*. М.: Металлургия, 1982. 584 [Polukhin P.I., Gorelik S.S., Vorontsov V.K. *Physical basis of plastic deformations*. Moscow, Metallurgiya, 1982, 584 (in Rus.)]

**Information and
Communication
Technologies**

**Информационно-
коммуникационные
технологии**



EDN: UBMXVW

УДК 621.397.7:614.842–047.25

Using the City's Surveillance Cameras to Create a Visual Sensor Network to Detect Fires

Omer A. Dheyab^{*a, b},
Dmitry Yu. Chernikov^a and Alexander S. Selivanov^a

^a*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

^b*University of Technology-Iraq
Baghdad, Republic of Iraq*

Received 13.01.2024, received in revised form 18.01.2024, accepted 27.02.2024

Abstract. One of the most destructive natural disasters that harms both the environment and human life is fire. They jeopardize human life and public safety in addition to causing enormous material damages. The development of an effective system for identifying city fires is the aim of this project. An AI method for enhancing fire detection operations is the YOLOv5 model. For precise and effective fire detection, city cameras are turned into a visual sensor network based on the YOLOv5 paradigm. This system scans camera footage to determine the specific location and presence of fires using deep learning technologies. WebRTC technology is also used to send fire alarms. WebRTC enables direct and efficient communication between the system and observers. Combining YOLOv5 and WebRTC with a visual sensor network can enhance and increase the effectiveness of early fire detection and response operations. This study presents a system for early identification of fire incidents in cities, at a low cost by taking advantage of the existing surveillance camera infrastructure.

Keywords: visual sensor network, WebRTC, YOLOv5, surveillance camera, fire detection.

Citation: Dheyab O. A. Chernikov D. Yu., Selivanov A. S. Using the city's surveillance cameras to create a visual sensor network to detect fires. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(2), 266–275. EDN: UBMXVW



Использование городских камер наблюдения для создания визуальной сенсорной сети для обнаружения пожаров

О. А. Деяб^{а,б}, Д. Ю. Черников^а, А. С. Селиванов^а

^аСибирский федеральный университет

Российская Федерация, Красноярск

^бТехнологический университет – Ирак

Республика Ирак, Багдад

Аннотация. Одним из самых разрушительных стихийных бедствий, наносящих вред как окружающей среде, так и жизни человека, являются пожары. Они не только наносят огромный материальный ущерб, но и ставят под угрозу жизнь людей и общественную безопасность. Целью данного проекта является разработка эффективной системы выявления городских пожаров. Метод искусственного интеллекта для улучшения операций по обнаружению пожара – это модель YOLOv5. Для точного и эффективного обнаружения пожара городские камеры превращаются в сеть визуальных датчиков на основе парадигмы YOLOv5. Эта система сканирует записи с камер, чтобы определить конкретное местоположение и наличие пожаров с помощью технологий глубокого обучения. Технология WebRTC также используется для отправки сигналов пожарной тревоги. WebRTC обеспечивает прямую и эффективную связь между системой и наблюдателями. Объединение YOLOv5 и WebRTC с сетью визуальных датчиков может улучшить и повысить эффективность операций по раннему обнаружению пожара и реагированию на него. В этом исследовании представлена система раннего выявления пожаров в городах с низкими затратами за счет использования существующей инфраструктуры камер наблюдения.

Ключевые слова: сеть визуальных сенсоров, WebRTC, YOLOv5, камера наблюдения, обнаружение пожара.

Цитирование: Деяб О. А. Использование городских камер наблюдения для создания визуальной сенсорной сети для обнаружения пожаров / О. А. Деяб, Д. Ю. Черников, А. С. Селиванов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(2). С. 266–275. EDN: UBMXVW

I. Introduction

Urban areas are highly vulnerable to fires, which can have catastrophic impacts on both human life and infrastructure. The swift propagation of fires in urban settings can result in extensive devastation, property damage, and potentially even fatalities. Due to the pressing necessity for prompt identification and efficient intervention, there is an increasing inclination towards utilizing technology to alleviate the detrimental consequences of fires. Early detection of fires allows for quick evacuation procedures, notification of emergency services, and application of firefighting techniques [1].

An effective strategy involves implementing a visual sensor network throughout the city, which would provide prompt identification and intervention. The extensive deployment of security cameras across the city ensures thorough monitoring, hence minimizing the likelihood of overlooking possible fire events [2, 3]. Furthermore, the instantaneous nature of the visual sensor network permits timely notifications and rapid action, facilitating firemen and emergency services to promptly respond and mitigate the propagation of fires [4].

Due to the progress of technology, one of the best methods for spotting fires is to use the object detection algorithm YOLOv5. A deep learning-based model called YOLOv5, or You Only Look Once version 5, is capable of precisely identifying and locating a variety of items in live photos and videos [5]. An extensive collection of fire photo datasets is necessary to train the YOLOv5 model for fire detection. A range of fire scenarios, including wildfires, interior and outdoor fires, and varying fire intensities, should be included in the dataset [6].

The utilization of communication and networking technology to establish connections between visual sensor networks and deliver notifications in fire detection systems has fundamentally transformed our approach to fire protection [7]. Through the establishment of a network of interconnected optical sensors, data can be effectively gathered from several locations in real-time. These sensors, comprising cameras, thermal imaging devices, and other visual sensors, acquire visual data pertaining to fire events. The collected data is transferred to a central monitoring system or a designated control center using modern networking techniques. This enables the consolidation of monitoring and analysis of the visual data. If a fire occurs, the network has the ability to promptly identify the existence of smoke, flames, or any other indications related to fire.

A number of methods have been proposed for creating a fire detection system. [8] This study investigates the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) and wireless sensor networks for early fire detection. [9] The purpose of this article is to develop a fire detection system that uses unmanned aerial vehicles and sensor network technologies to prevent fire occurrences. The suggested system uses sensors to monitor environmental parameters, and Internet of Things apps are used to process the data. It integrates cloud computing, UAVs, and wireless sensor technology. To increase the accuracy of fire incident recognition, the system also incorporates image processing algorithms. Sendra et al present a Lora WAN-based fire risk assessment system [10]. A LoRa node with several sensors to measure temperature, CO₂, wind speed, humidity, and other parameters is part of the system. [11] This work presents FFireNet, a deep learning approach that leverages the MobileNetV2 model's pre-trained convolutional basis. To solve the issue of recognizing forest fires, more completely connected layers are included.

This research proposes to transform the cameras deployed in the city into a visual sensor network based on the YOLOv5 model for fire detection. This proposal comes to increase the utility of cameras and enhance their use in the city, as they are not limited to surveillance and security only. When a fire is detected, an immediate alert signal is sent to the fire control center. WebRTC technology was used as a communication channel between the monitoring point and the fire control center. WebRTC technology can send an image and coordinates of the fire site or display a live broadcast of the fire site. This effort will pave the way for the development of DVR and NVR devices to be able to detect fires and send alerts. The safety of cities is improved thanks to this method at the lowest cost, as the city's already existing infrastructure, such as cameras and networks, is used without requiring additional costs for installing traditional fire detection systems. Using this method, a faster response to fires can be achieved, and the time needed to deal with them can be reduced. The efficiency of fire brigades can also be improved, and they can be better directed to fire sites.

II. DVR and NVR

The DVR (Digital Video Recorder) and NVR (Network Video Recorder) are both devices used for video surveillance and recording. A DVR is a device that records video footage from analog cameras

[12]. It typically has multiple video inputs to connect analog cameras, and it compresses and stores the video data on a hard drive. DVRs are commonly used in older surveillance systems. On the other hand, an NVR is a device that records video footage from IP (Internet Protocol) cameras [13]. IP cameras capture digital video and send it over a network to the NVR, which then stores the video data on a hard drive. NVRs are commonly used in modern surveillance systems. Both DVRs and NVRs allow users to view live video feeds and playback recorded footage. However, the main difference lies in the type of cameras they support and the way they handle video data.

III. Visual sensor network (VSN)

A visual sensor network (VSN) is a system consisting of numerous strategically placed visual sensors that capture and analyze visual data from the surrounding environment. These sensors encompass a variety of devices, such as cameras, thermal imaging devices, depth sensors, and other vision-based devices. Visual sensor networks have garnered considerable interest and are extensively employed in diverse applications owing to their capacity to offer abundant visual data for analysis and decision-making purposes. Visual sensor networks have a wide range of applications that extend across multiple areas. VSNs are employed in the domain of surveillance and security to oversee public spaces, structures, and vital infrastructure [14]. They provide immediate identification of irregularities, monitoring of objects or persons, and maintenance of public safety. Visual sensor networks can be utilized in the field of traffic management to efficiently capture and analyze traffic patterns, monitor congestion levels, and optimize transportation systems [15]. Visual sensor networks provide a potent method for capturing and interpreting visual data from their surroundings. Due to their capacity to incorporate several sensors and offer a holistic perspective of scenes or occurrences, VSNs have become invaluable instruments in diverse applications, spanning from surveillance and traffic control to environmental monitoring and healthcare. The future is predicted to bring more improvements to visual sensor networks through achievements in sensor technologies and data processing techniques, resulting in enhanced capabilities and expanded applications [16].

IV. Image processing by using python

Image processing is one significant field where Python is utilized frequently. Python's powerful libraries and packages, such as PIL (Python Imaging Library) and OpenCV (Open Computer Vision Library), allow developers to tackle a wide range of image-related tasks with efficiency. Image processing includes object detection, image segmentation, image enhancement, image filtering, and other critical operations. There are several functions and methods available in Python to effectively do these tasks. For instance, the OpenCV library offers several image processing features. Developers can leverage tools like edge detection, resizing, color space conversion, and thresholding to customize photographs to their specifications. Another well-liked choice for Python image processing tasks is PIL. Among PIL's numerous capabilities is the ability to edit photos by cropping, rotating, resizing, and applying filters. Additionally, this library allows developers to work with a range of image file types, such as JPEG, PNG, BMP, and others. Furthermore, because of its versatility and ease of use, Python is a wonderful choice for beginners who want to learn more about image processing. Its extensive documentation and sizable development community facilitate the understanding and use of image

processing techniques. Python's strong library and intuitive interface let developers tackle complex image processing tasks with ease [17].

V. Algorithm

Fig. 1 shows the proposed algorithm for converting surveillance cameras into a visual sensor network for fire detection.

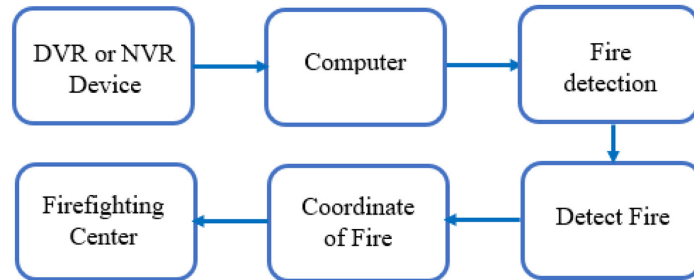


Fig. 1. Proposed algorithm for converting surveillance cameras into a visual sensor network for fire detection

Most surveillance screens typically display a set of video clips coming from cameras installed in monitored areas. Each video clip is labeled to indicate the camera transmitting it. Fig. 2 illustrates an example of a surveillance screen in a building.

Initially, the coordinates of the areas being monitored by the camera, as well as the viewing angle and distance, must be determined and stored on the computer running the fire detection software. A DVR or NVR device is connected to the computer to transmit the surveillance video. The computer

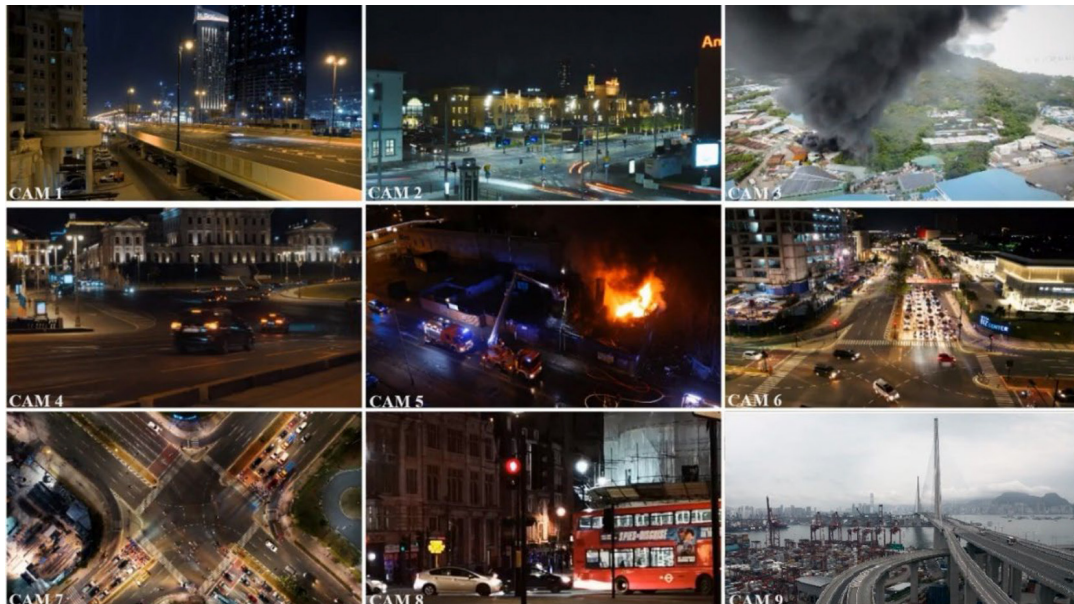


Fig. 2. Is an example of a surveillance screen in a building



Fig. 3. Depicts the communication network connecting the monitoring stations to the fire control center

hosting the fire detection software should have high specifications for video analysis and real-time fire detection. The YOLOv5 software was used for fire detection due to its speed, accuracy, and ease of use. The first method allows for direct input of the video into the fire detection software. The second method involves capturing screen images from the surveillance screen at specified time intervals, such as every 10 seconds, and analyzing them. This method is useful when the computer specifications are not high.

A communication network is created between the monitoring points and the fire control center using WebRTC technology. This network exchanges data and notifications between monitoring points and the fire control center, allowing rapid and effective intervention in fighting fires. Fig. 3 depicts a communication network between monitoring stations and the fire control center.

Alarms from fire monitoring stations will be transmitted to the fire control center via WebRTC technology. The image of the fire taken from the monitoring screen, together with the location coordinates, are sent right away to the fire control center so they can take the appropriate action when a fire breaks out inside the monitoring center's field of view. Using WebRTC technology, the firefighting center may also view a live broadcast of the fire location.

VI. Experimental results

To achieve our goals for this project, we utilized a wide range of applications and technology. YOLOv5 and the Google Colaboratory were two of these. One way to mimic a monitoring platform is with a web page written in JavaScript. We carried out three repetitions of the suggested procedure to guarantee the accuracy of our system evaluation. Additionally, we tested the trained model using input data that included a collection of photos and video clips with fire and smoke to confirm its efficacy.

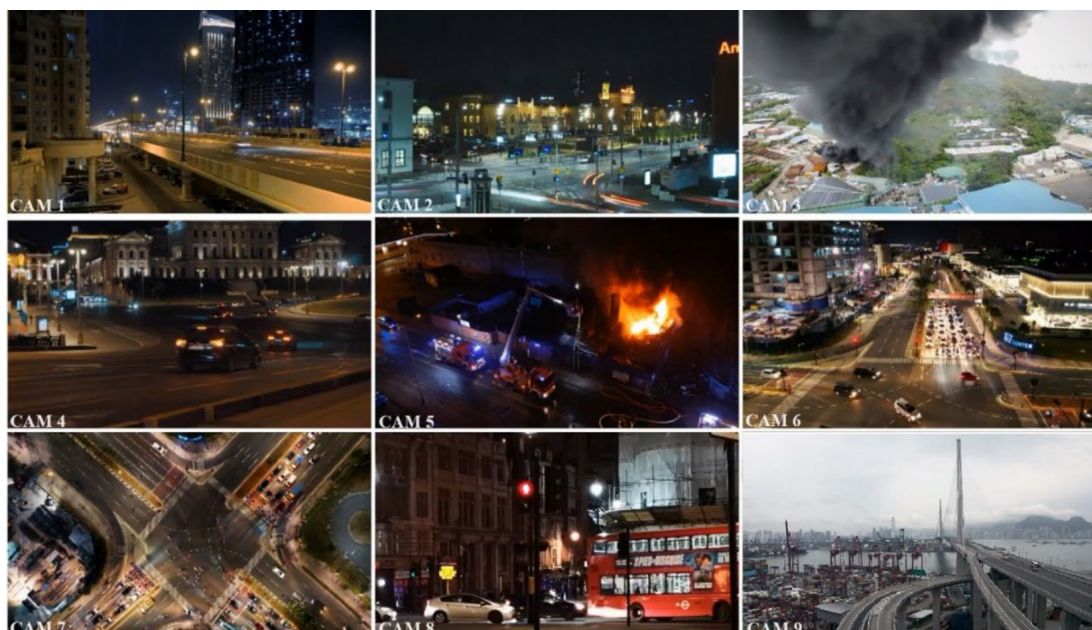


Fig. 4. Image of the input video to the fire detection system

The first experiment involved simulating a video as a live input to the fire detection program. The video contains a group of nine video clips, one of which shows a fire and the other smoke. Fig. 4 illustrates the input video image of the fire detection system.

The results of the experiment show the identification of the fire and smoke areas in the video. The images containing the fire and smoke are cropped to be sent along with the coordinates of the location to the fire control center. Fig. 5 and 6 illustrate the output of the fire detection program.

The time taken to analyze 10 seconds was 90 seconds, and this time is very long. To reduce processing time, an image was taken every 10 seconds of the monitoring screen. The image was processed, and fire and smoke were successfully detected in the image. The time taken to analyze the image was 3 seconds, and this time is considered acceptable compared to the video processing time. The experiment was repeated to detect fires and smoke in videos and photos using Google Colab with a GPU processor. Fires and smoke were detected in real-time videos and images. Table 1 shows the processing time using the PC and Google Colaboratory.

The YOLOv5 program has been modified to be able to send an alarm to the firefighting center when a fire occurs. The fire monitoring system was simulated via a web page based on WebRTC technology. Through the monitoring page, observers can know the location of the fire on the map and a live video of the fire location. An example of the fire monitoring system is depicted in Fig. 7.

VII. Conclusion

Using deep learning technology to transform the city's surveillance cameras into a visual sensor network is a practical and unique approach. This method allows videos to be automatically and correctly analyzed and significant information extracted. Furthermore, significant cost savings are realized because existing CCTV infrastructure is used rather than establishing a new sensor network.

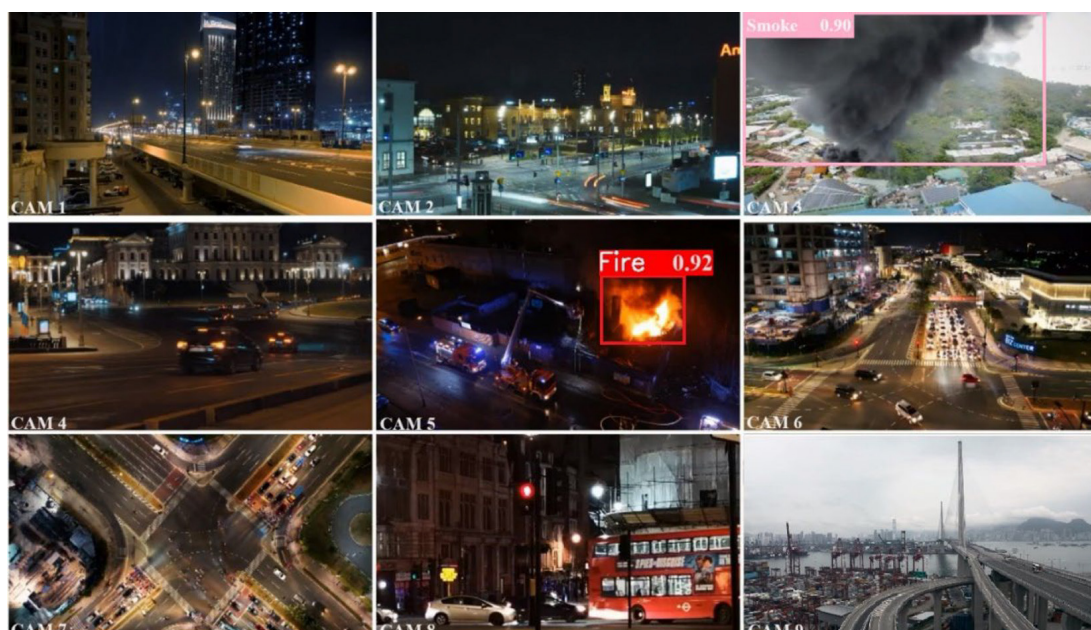


Fig. 5. The output of the fire detection program

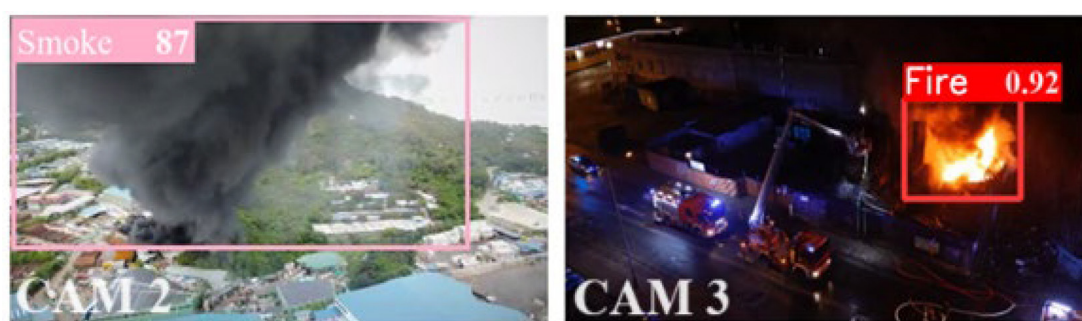


Fig. 6. Pictures that will be sent to the firefighting center

Table 1. The processing time using the PC and Google Colab

Input Type	Processing Time by Using the Pc	Processing Time by Using the Google Colaboratory
Video	90 second	Real Time
Image	3 second	Real Time

This method improves the city's ability to harness monitoring data and increase citizen safety and convenience. The use of YOLOv5 technology in this context marks a significant advancement in the field of efficiently and effectively transforming security cameras into visual sensor networks.

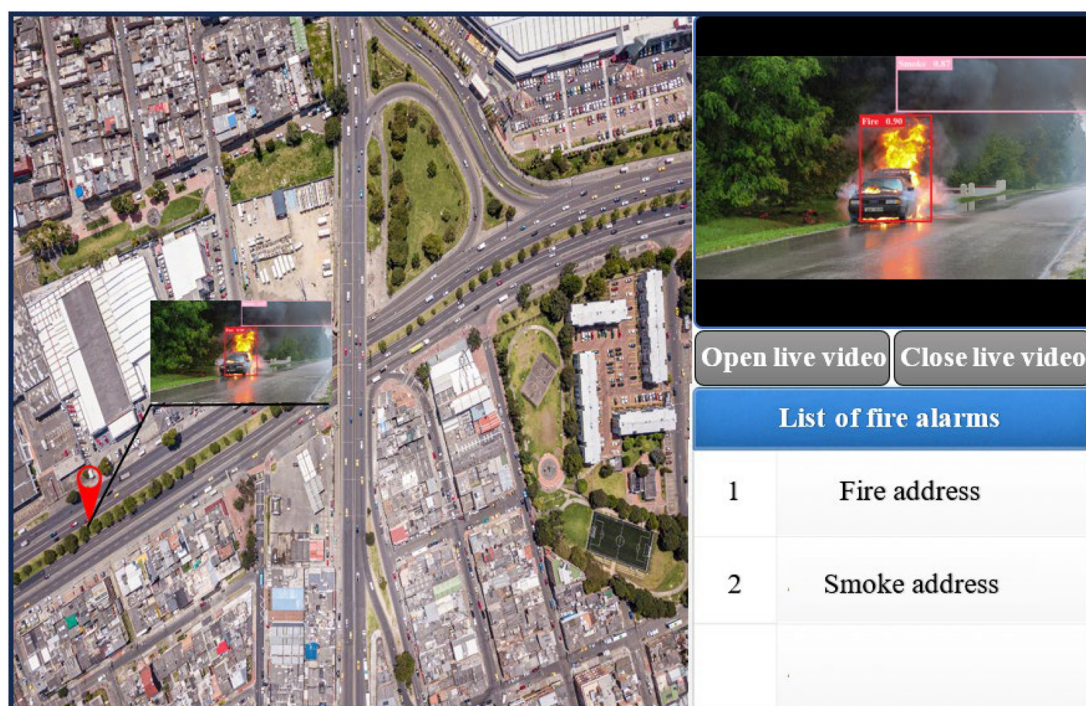


Fig. 7. Fire monitoring system

References

- [1] Tanase M.A., Aponte C., Mermoz S., Bouvet A., Le Toan T., Heurich M. Detection of windthrows and insect outbreaks by L-band SAR: A case study in the Bavarian Forest National Park. *Remote Sens. Environ.* 2018, 209, 700–711
- [2] Zhao Z.-Q. P, Zheng S.-t. Xu et al. Object detection with deep learning: A review, *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 2019, 30(11), 3212–3232
- [3] Liu L., Ouyang W., Wang X. et al. Deep learning for generic object detection: A survey, *International Journal of Computer Vision*, 2020, 128 (2), 261–318
- [4] Pradhan B., Suliman M. D.H.B., Awang M. A.B. Forest fire susceptibility and risk mapping using remote sensing and geographical information systems (GIS). *Disaster Prev. Manag. Int. J.* 2007, 16.
- [5] Luo W. Research on fire detection based on Yolov5, 2022 3rd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE) [Preprint]. 2022 doi:10.1109/icbaie56435.2022.9985857.
- [6] Toulouse T., Rossi L., Campana A., Celik T., Akhloufi M. Computer vision for wildre research: An evolving image dataset for processing and analysis, *Fire Safety Journal*, 2017, 92, 188–194
- [7] Dheyab O.A. and S. S. AL-Obaidi. BER COMPARISON OF OFDM FOR DIFFERENT ORDER TYPES OF PSK AND QAM WITH AND WITHOUT USING LDPC. *Современные проблемы радиоэлектроники*. 2022.
- [8] Sungeetha Dr.A. and Sharma R Dr.R. Real Time Monitoring and fire detection using internet of things and cloud based drones, *Journal of Soft Computing Paradigm*, 2020, 2(3), 168–174. doi:10.36548/jscp.2020.3.004.

- [9] Sharma A., Singh P.K. & Kumar Y. An integrated fire detection system using IOT and image processing technique for Smart Cities. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 61, 102332. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102332>
- [10] S. Sendra L., García J., Lloret I. Bosch and R. Vega-Rodríguez, LoRaWAN network for fire monitoring in rural environments, 2020, *Electronics*, 9(3), 1–29
- [11] Khan S. and Khan A. FFireNet: Deep Learning based forest fire classification and detection in smart cities, *Symmetry*, 2022, 14(10), 2155. doi:10.3390/sym14102155
- [12] Chundi, Venkat et al. Intelligent Video Surveillance Systems. 2021 International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST). IEEE, 2021
- [13] Lee Jeonghun and Kwang-il Hwang. RAVIP: Real-Time AI Vision Platform for Heterogeneous Multi-Channel Video Stream. *Journal of Information Processing Systems* 2021, 17.2
- [14] Wang Z., Wang F. Wireless Visual Sensor Networks: Applications, Challenges, and Recent Advances. In Proceedings of the 2019 SoutheastCon, Huntsville, AL, USA, 11–14 April 2019. 1–8
- [15] Shah V. R., Maru S. V., Jhaveri R. H. An obstacle detection scheme for vehicles in an intelligent transportation system. *Int. J. Comput. Netw. Inf. Secur.* 2016, 8, 23–28
- [16] Jesus Thiago C. et al. A survey on monitoring quality assessment for wireless visual sensor networks. *Future Internet* 14.7 (2022): 213
- [17] Chityala, Ravishankar and Sridevi Pudipeddi. Image processing and acquisition using Python. CRC Press, 2020