

ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Антипов Р.Р., Биалов Т.Р., Лаврухина Д.А. Формирование электропроводной среды на основе модифицированного сверхкритического диоксида углерода для электроплазменной обработки аддитивных изделий.....</i>	3
<i>Ильинков А.В., Стародумов А.В., Такмовцев В.В., Щукин А.В., Киселев А.А. О численном моделировании самоорганизации крупномасштабных вихревых структур в однополостной диффузорной выемке.....</i>	9
<i>Радаев А.В., Сабирзянов А.Н., Васенева Н.А. Исследование процесса вытеснения жидких углеводородов диоксидом углерода из однородной пористой среды.....</i>	15

МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Гавариев Р.В., Гавариева К.Н. Повышение ресурса технологической оснастки заготовительных производств применением многослойных PVD-покрытий.....</i>	21
<i>Гавариева К.Н., Гавариев Р.В. Оценка практической эффективности и методология построения цифровых двойников в механообрабатывающем производстве на примере ПАО «КамАЗ».....</i>	30
<i>Галимов Э.Р., Галимова Н.Я., Шарафутдинова Э.Э., Кузьмина И.А., Галимов Р.И. Влияние шлама сточных вод на вязкостные свойства расплавов поливинилхлорида</i>	37
<i>Дерябин И.П., Токарев А.С. Исследование адекватности разработанной математической модели расчета увода оси отверстия при рассверливании сверлом со сменными многогранными пластинами</i>	41
<i>Етифанов В.В. Применение банков и баз данных о технологиях, деталях, оборудовании в технологической подготовке производства.....</i>	48
<i>Мубаракишин Б.Р., Тонконог В.Г. Автономная газораспределительная станция.....</i>	54
<i>Шарипов Р.А., Егорова Е.И., Лунев А.Н. Формирование маршрутной карты технологического процесса в автоматическом режиме с помощью нейронных сетей посредством считывания необходимых данных с чертежа детали</i>	60
<i>Шубина А.С., Слабунова А.Д. Исследование возможности дальнейшей эксплуатации зубчатых передач по критерию контактной выносливости</i>	67

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

<i>Калашиников Д.С. Система измерений вибрационных сигналов для контроля шпиндельных узлов станков с числовым программным управлением</i>	71
<i>Козлов В.К., Минегалиев И.М. Способ и устройство измерения влагосодержания бумажно-масляной изоляции трансформатора.....</i>	81
<i>Мажайцев Е.А., Семенова Е.Г., Чикрин Д.Е., Русина А.А. Двухкритериальная оптимизация статистического контроля для оценки и повышения эффективности технологического оборудования.....</i>	89
<i>Панарин В.М., Маслова А.А., Коваленко А.Н. Разработка и адаптация предиктивных математических моделей для оценки устойчивости сооружений, основанных на комплексном анализе данных мониторинга.....</i>	98
<i>Солдаткин В.М., Солдаткин В.В., Ефремова Е.С., Кузнецов А.А., Сахабутдинов А.Ж., Аглиуллин Т.А. Система воздушных сигналов с неподвижным невыступающим приемником набегающего потока и волоконно-оптическими каналами восприятия и преобразования первичной информации.....</i>	106
<i>Цветков А.Н. Теоретические основы построения информационно-измерительного комплекса для испытания электроприводов нефтедобывающих скважин</i>	116
<i>Шакирзянов М.А., Голенищев-Кутузов А.В. Анализ формы и динамики ультрафиолетового излучения частичных разрядов при локальном дефекте высоковольтного изолятора.....</i>	127

CONTENTS

PHYSICAL SCIENCE

<i>Antipov R.R., Bilalov T.R., and Lavrakhina D.A.</i> Formation of an electrically conductive medium based on modified supercritical carbon dioxide for electroplasma treatment of additive manufactured products	3
<i>Il'inkov A.V., Starodumov A.V., Takmovtsev V.V., Shchukin A.V., and Kiselev A.A.</i> On numerical simulation of self-organizing large-scale vortical structures in a single-cavity diffuser-type dimple.....	9
<i>Radaev A.V., Sabirzyanov A.N., and Vaseneva N.A.</i> Study of process of displacement of liquid hydrocarbons by carbon dioxide from homogeneous porous medium	15

MECHANICAL ENGINEERING

<i>Gavariyev R.V. and Gavariyeva K.N.</i> Improving the service life of tooling for forming processes through the application of multilayer PVD coatings	21
<i>Gavariyeva K.N. and Gavariyev R.V.</i> Practical efficiency evaluation and methodology for building digital twins in machining production by the example of KamAZ PJSC	30
<i>Galimov E.R., Galimova N.Ya., Sharafutdinova E.E., Kuzmina I.A., and Galimov R.I.</i> Influence of wastewater sludge on the viscosity properties of polyvinyl chloride melts	37
<i>Deryabin I.P. and Tokarev A.S.</i> Investigation of the adequacy of the developed mathematical model for calculating the deflection of the hole axis during drilling with a drill from the replaceable polyhedral plates	41
<i>Epifanov V.V.</i> The use of banks and databases on technologies, parts, and equipment in the technological pre-production	48
<i>Mubarakshin B.R. and Tonkonog V.G.</i> Autonomous gas distribution station	54
<i>Sharipov R.A., Egorova E.I., and Lunev A.N.</i> Automatic process flowchart creation using neural networks by reading the required data from a part drawing.....	60
<i>Shubina A.S. and Slabunova A.D.</i> Research of the possibility of further operation of gears by the criterion of contact endurance	67

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT MAKING AND COMMUNICATIONS

<i>Kalashnikov D.S.</i> Ostic system for CNC machine tool spindle units	71
<i>Kozlov V.K. and Minegaliev I.M.</i> Method and device for measuring the moisture content of paper-oil insulation in transformers	81
<i>Mazhaitsev E.A., Semenova E.G., Chikrin D.E., and Rusina A.A.</i> Bicriteria optimization of statistical process control for evaluating and improving the efficiency of technological equipment	89
<i>Panarin V.M., Maslova A.A., and Kovalenko A.N.</i> Development and adaptation of predictive mathematical models for assessing the stability of structures based on a comprehensive analysis of monitoring data	98
<i>Soldatkin V.M., Soldatkin V.V., Efremova E.S., Kuznetsov A.A., Sakhabutdinov A.Zh., and Agliullin T.A.</i> Air signal system with a fixed non-protruding receiver of the incidental flow and fiber-optic channels for perception and conversion of primary information.....	106
<i>Tsvetkov A.N.</i> Theoretical basis for constructing an information and measurement complex for testing electric drives of oil-producing wells.....	116
<i>Shakirzyanov M.A. and Golenishchev-Kutuzov A.V.</i> Analysis of the shape and dynamics of ultraviolet radiation from partial discharges in a local defect of a high-voltage insulator.....	127

ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ДЛЯ ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ АДДИТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Р.Р. Антипов, Т.Р. Билалов, Д.А. Лаврухина

Исследованы возможности создания электропроводной среды на основе сверхкритического диоксида углерода для электроплазменной обработки аддитивных изделий. Цель исследования заключается в повышении электропроводности флюида за счет растворения ионообменных смол с применением полярных соразтворителей. Установлено, что добавление 15 мас. % диметилсульфоксида при 338 К и 30 МПа позволяет достичь концентрации смол на уровне 0,44–0,49 мас. долей, что обеспечивает удельную электропроводность среды на уровне $(1,82 - 1,98)10^{-3}$ См/см. На основе полученных результатов впервые экспериментально реализован устойчивый тлеющий плазменный разряд в модифицированной среде при напряжении 780 В, что открывает возможности для бесконтактной финишной обработки сложных деталей.

Ключевые слова: сверхкритический диоксид углерода, ионообменные смолы, растворимость, энтропийный метод, теория подобия, диметилсульфоксид, электропроводность, плазменный разряд.

Современное машиностроение, авиационная и нефтехимическая промышленность характеризуются наличием ряда системных ограничений при применении аддитивных технологий [1], к числу которых относятся высокая исходная шероховатость поверхности (R_a до 35 мкм), а также невозможность использования традиционных методов механической финишной обработки внутренних полостей и решетчатых структур. Применение существующих методов химического и электрохимического полирования [2, 3] требует использования агрессивных электролитов (кислот, щелочей, солей тяжелых металлов), что противоречит принципам «зеленой химии» и ужесточающимся экологическим стандартам [4]. Для сверхкритического диоксида углерода [5] характерно нулевое поверхностное натяжение, низкая вязкость и высокая проникающая способность. В то же время сверхкритический диоксид углерода является диэлектриком с электропроводностью менее 10^{-6} См/см, что исключает прямое инициирование плазменного разряда. Целью работы является научное обоснование и экспериментальная реализация методов повышения электропроводности сверхкритического диоксида углерода за счет растворения ионообменных смол в присутствии полярных соразтворителей для создания экологически безопасной и энергоэффективной рабочей среды электроплазменной обработки.

Для решения поставленных задач разработана и апробирована оригинальная циркуляционная установка высокого давления (до 40 МПа) (рис. 1) с прецизионным контролем параметров (погрешность измерения температуры – $\pm 0,1$ °С, давления – $\pm 0,025$ МПа). В состав установки входит баллон с диоксидом углерода 1; холодильник-конденсатор 2; насос высокого давления 3; предварительный нагреватель 4; реакторы высокого давления 5, 6; сепаратор 7.

Установка реализует динамический и статический режимы исследования растворимости [6]. В состав комплекса интегрирована система генерации электроплазменных разрядов с напряжением 800 В постоянного тока, оснащенная сглаживающими конденсаторами емкостью 1000 мкФ для обеспечения устойчивого горения плазмы (рис. 2).

Экспериментальная база включает более 200 измерений растворимости трех типов ионообменных смол (Dowex HCR-S/S, NWR AQUA, Waterlux B30) в чистом и модифицированном сверхкритическом диоксиде углерода при температурах 318–338 К и давлениях 10–30 МПа. Неопределенность измерений оценена по ГОСТ 34100-2017 [7, 8], не превышает 9,78 %.

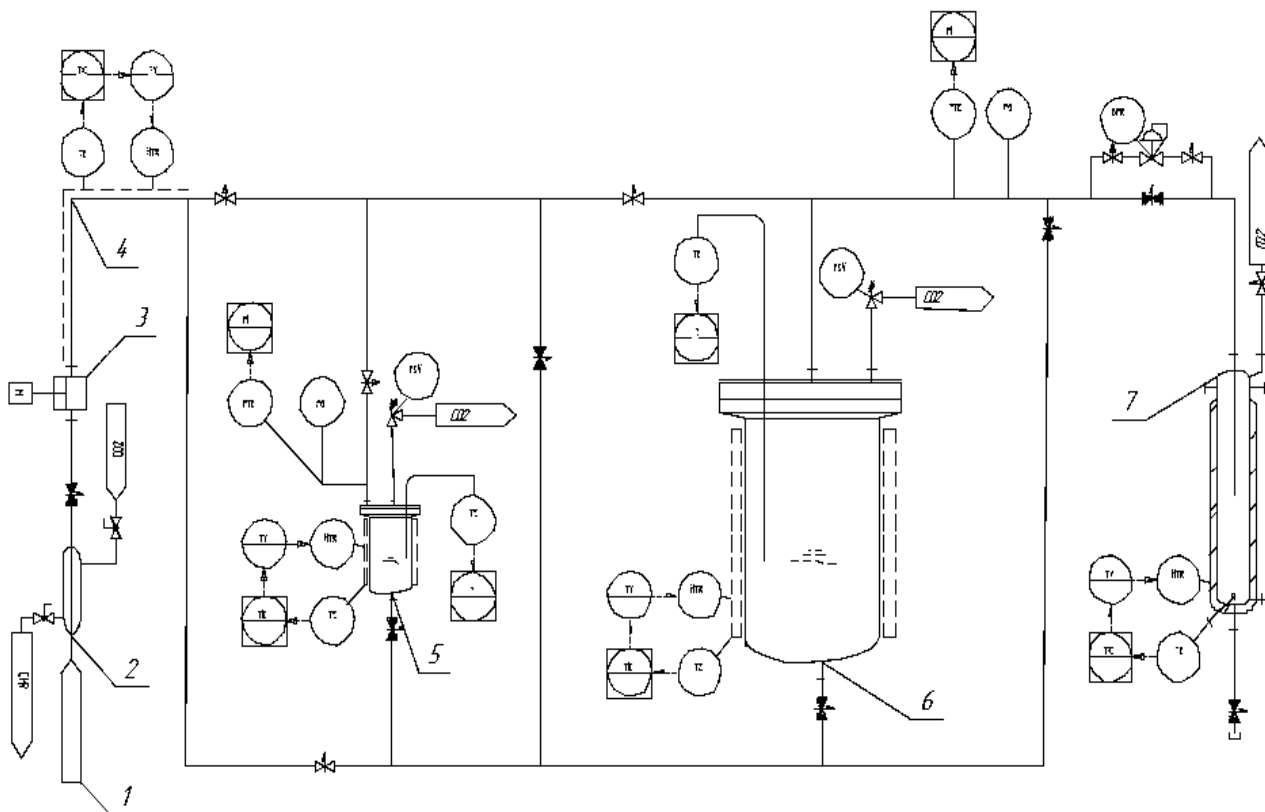


Рис. 1

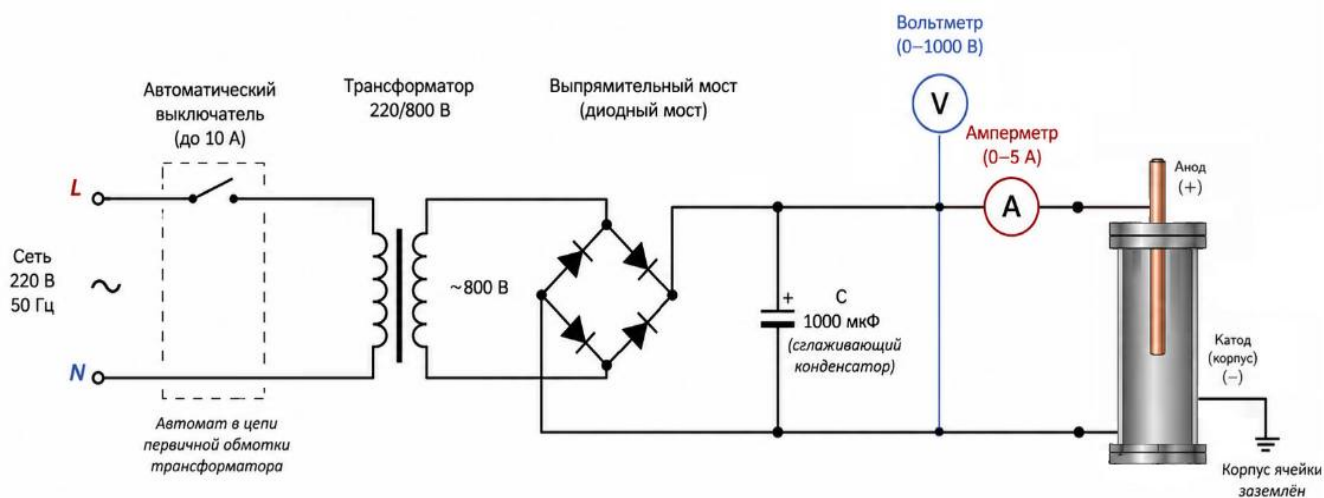


Рис. 2

Впервые проведено комплексное исследование растворимости ионогенных материалов в неполярной сверхкритической среде [9]. Установлено, что в чистом сверхкритическом диоксиде углерода растворимость смол не превышает 0,1 мас. долей, что недостаточно для формирования электроплазменного разряда [10, 11]. Ключевым фактором повышения растворимости признано введение полярных соразтворителей (хлороформ, ацетон, диметилсульфоксид) [12]. Сравнительный анализ показал максимальную эффективность диметилсульфоксида благодаря высокой диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 46,7$), высокому дипольному моменту ($\mu = 3,96$ D) и способности к диссоциации ионных пар [13, 14]. Определены оптимальные термодинамические условия: температура – 338 K, давление – 30 МПа, концентрация диметилсульфоксида – 15 мас. %. При данных параметрах достигнута максимальная растворимость смол (Dowex – 0,49 мас. долей; NWR AQUA – 0,45 мас. долей; Waterlux B30 – 0,44 мас. долей). Выявлены корреляции между химической природой функциональных групп смолы и характером зависимости

растворимости от давления и температуры: плотные матрицы демонстрируют пороговое набухание, макропористые – немонотонные флуктуации, связанные с последовательной активацией пор.

Для обобщения экспериментальных данных применен энтропийный метод теории подобия [15], не требующий знания критических параметров сложных полимерных систем. Полученная универсальная зависимость (полином пятой степени) описывает массив из 81 экспериментальной точки с точностью более 98 % (AARD менее 5 %), что подтверждает ее пригодность для прогнозирования растворимости в неизученных диапазонах параметров [16].

Экспериментально подтверждена возможность формирования электропроводящей среды на основе модифицированного сверхкритического диоксида углерода. Удельная электропроводность достигла значений $(1,82-1,98) \cdot 10^{-3}$ См/см, что более чем в 100 раз превышает показатели чистого флюида и сопоставимо со слабыми водными электролитами. Расчетные значения сопротивления, полученные на основе полной обменной емкости смол и концентрации ионогенных групп, хорошо согласуются с экспериментальными данными (отклонение 2,8–5,7 %).

Впервые реализован устойчивый электрический пробой и стационарный плазменный разряд в среде сверхкритического диоксида углерода при напряжении 780 В. На рис. 3 показана вольт-амперная характеристика пробоя сверхкритической среды «сверхкритический диоксид углерода + диметилсульфоксид (15 мас. %) + Dowex при $T = 338$ К, $P = 20$ МПа.

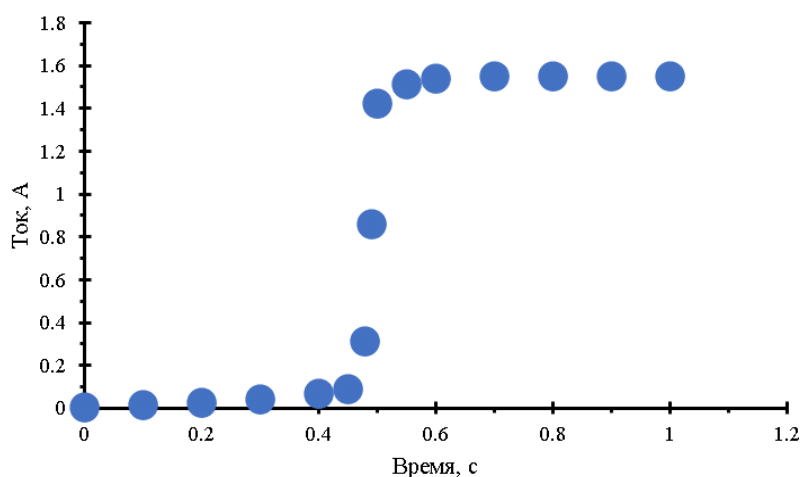


Рис. 3

Установлены параметры разряда: ток – 1,42-1,55 А, мощность – 1108–1207 Вт (рис. 4), плотность тока – 1,27–1,38 А/см², удельная энергия инициирования – 18–22 Дж/см³.

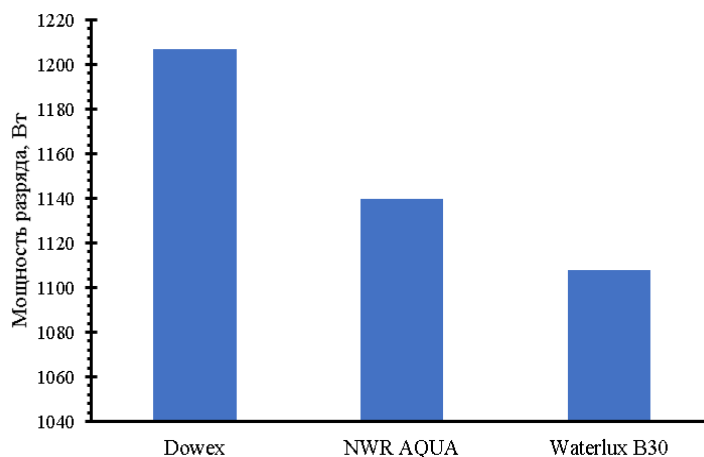


Рис. 4

Режим разряда идентифицирован как тлеющий, что исключает перегрев и эрозию обрабатываемой поверхности. О режиме разряда свидетельствует лавинообразный скачок тока при 800 В, характерный для флюидного пробоя [17], а не для омического нагрева [18]. Выделяющееся джоулево тепло вызывает локальное псевдокипение сверхкритического диоксида углерода с формированием газообразного канала [19], в котором поддерживается горение. Процесс сопровождается резким акустическим треском микрогидравлических ударов [20], нетипичным для электрохимического выделения газа [21]. Визуально наблюдаемое обугливание смолы в приэлектродной зоне (рис. 5) свидетельствует о локальном нагреве до нескольких тысяч градусов [22], что подтверждает реализацию плазменного пробоя. Показано, что снижение давления до 10 МПа или концентрации диметилсульфоксида до 10 мас. % приводит к возрастанию сопротивления среды и препятствует стабильному горению плазмы.



Рис. 5

Разработанный технологический подход создает научно-техническую основу для замены традиционных кислотных и щелочных электролитов в процессах электроплазменной полировки и модификации металлических поверхностей. Нулевое поверхностное натяжение сверхкритической среды обеспечивает равномерную обработку сложных аддитивных изделий, включая внутренние каналы и пористые структуры, недоступные для механического инструмента. Внедрение технологии позволит предприятиям машиностроительного, авиационного и нефтехимического комплекса снизить использование токсичных веществ, уменьшить объем химических отходов, повысить ресурс деталей за счет упрочнения поверхностного слоя и сократить энергозатраты. Методика полностью соответствует требованиям ISO 14001 и стратегии научно-технологического развития Российской Федерации до 2035 г.

В представленной работе решается актуальная научно-техническая задача создания экологически безопасных и энергоэффективных электропроводящих сред на основе сверхкритического диоксида углерода для электроплазменной обработки металлов. Полученные данные по термодинамике растворения ионообменных смол, разработанные экспериментальные установки и методики, а также впервые реализованный устойчивый плазменный разряд в модифицированном сверхкритическом диоксиде углерода формируют готовую технологическую базу для промышленного масштабирования. Рекомендуемым направлением внедрения является адаптация разработанного реакторного оборудования на предприятиях, специализирующихся на финишной обработке аддитивно изготовленных деталей, с последующим проведением опытно-промышленных испытаний и интеграцией в существующие технологические линии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 223 с.
2. Cornelsen M., Deutsch C., Seitz H. Electrolytic Plasma Polishing of Pipe Inner Surfaces // Metals. 2017. Vol. 8. № 1. Article № 12.
3. Куликов И.С., Ващенко С.В., Каменев А.Я. Электролитно-плазменная обработка материалов. Минск: Беларус. навука, 2010. 232 с.

4. Beckman E.J. Supercritical and Near-Critical CO₂ in Green Chemical Synthesis and Processing // The Journal of Supercritical Fluids. 2004. Vol. 28. № 2-3. P. 121–191.
5. Clifford T. Fundamentals of Supercritical Fluids. Oxford: Clarendon Press, 1999. 210 p.
6. Яруллин Л.Ю. и др. Экспериментальная установка для измерения растворимости веществ в сверхкритическом CO₂ динамическим методом // Приборы и техника эксперимента. 2024. № 1. С. 184–191.
7. ГОСТ 34100.1–2017. Неопределенность измерения. Часть 1. Москва, Стандартинформ, 2018. 28 с.
8. ГОСТ 34100.3–2017. Неопределенность измерения. Часть 3. Москва, Стандартинформ, 2018. 112 с.
9. Rad H.B., Sabet J.K., Varaminian F. Study of Solubility in Supercritical Fluids: Thermodynamic Concepts and Measurement Methods: A Review // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2019. Vol. 36. № 4. P. 1367–1392.
10. Knez Ž., Cör D., Knez Hrnčič M. Solubility of Solids in Sub- and Supercritical Fluids: A Review 2010–2017 // Journal of Chemical & Engineering Data. 2018. Vol. 63. № 4. P. 860–884.
11. Smith A.K. et al. Dewatering Spent Ion-Exchange Resins with Supercritical CO₂ // Separation Science and Engineering. 2024. Vol. 42. № 2. P. 115–127.
12. Dobbs J.M., Wong J.M., Johnston K.P. Nonpolar Co-Solvents for Solubility Enhancement in Supercritical Fluid Carbon Dioxide // Journal of Chemical & Engineering Data. 1986. Vol. 31. № 3. P. 303–308.
13. Zhang X. et al. Why Do Co-Solvents Enhance the Solubility of Solutes in Supercritical Fluids? // Chemistry A European Journal. 2002. Vol. 8. P. 5107–5111.
14. Andreatta A.E., Bottini S.B., Brignole E.A. Phase Equilibria of Dimethyl Sulfoxide (DMSO) + Carbon Dioxide Mixtures // The Journal of Supercritical Fluids. 2007. Vol. 42. № 1. P. 60–68.
15. Усманов А.Г. Об одном дополнительном условии подобию молекулярных процессов // Теплопередача и тепловое моделирование. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 298–304.
16. Билалов Т.Р., Гумеров Ф.М. Расчет растворимости ароматических углеводородов в сверхкритических средах на основе энтропийного метода теории подобию // Теоретические основы химических технологий. 2019. № 4. С. 387–401.
17. Kiyani T. et al. Negative DC Prebreakdown Phenomena and Breakdown-Voltage Characteristics of Pressurized Carbon Dioxide Up to Supercritical Conditions // IEEE Transactions on Plasma Science. 2007. Vol. 35. № 3. P. 656–662.
18. Bard A.J., Faulkner L.R. Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications. N.Y: John Wiley & Sons, 2001. 833 p.
19. Banuti D.T. Crossing the Widom-Line Supercritical Pseudo-Boiling // The Journal of Supercritical Fluids. 2015. Vol. 98. P. 12–16.
20. Liao Y. et al. Acoustic Emission Characteristics of Micro-Discharges in Initial Pulsed PEO Process on 60% SiCp/Al Composite // Ultrasonics. 2024. Vol. 138. Article № 107213.
21. Jones H.M., Kunhardt E.E. The Influence of Pressure and Conductivity on the Pulsed Breakdown of Water // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1994. Vol. 1. № 6. P. 1016–1025.
22. Steudel A. et al. Simultaneous Thermal Analysis of Cationic, Nonionic and Anionic Polyacrylamide // Heliyon. 2019. Vol. 5. № 12. Article № e02973.

Поступила в редколлегию 20.06.25

FORMATION OF AN ELECTRICALLY CONDUCTIVE MEDIUM BASED ON MODIFIED SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE FOR ELECTROPLASMA TREATMENT OF ADDITIVE MANUFACTURED PRODUCTS

R.R. Antipov, T.R. Bilalov, and D.A. Lavrukhina

The work is devoted to the study of the possibility of creating a conductive medium based on supercritical carbon dioxide for electroplasma processing of additively manufactured parts. The aim of the study is to increase the electrical conductivity of the fluid by dissolving ion-exchange resins using polar co-solvents. It has been established that the addition of 15 wt.% dimethyl sulfoxide at 338 K and 30 MPa allows achieving resin concentrations of 0.44–0.49 weight fractions, which provides an electrical conductivity of $(1.82\text{--}1.98) \cdot 10^{-3}$ S/cm. Based on the obtained results, a stable glow plasma discharge in the modified medium has been experimentally realized for the first time at a voltage of 780 V, opening up possibilities for non-contact finishing of complex parts.

Keywords: supercritical carbon dioxide, ion exchange resins, solubility, entropy method, similarity theory, dimethyl sulfoxide, electrical conductivity, plasma discharge.

Антипов Руслан Романович – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: gomezradrigo@gmail.com

Билалов Тимур Ренатович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: t.bilalov@yandex.ru

Лаврухина Даяна Александровна – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: dayanakalibar05@gmail.com

О ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ САМООРГАНИЗАЦИИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ОДНОПОЛОСТНОЙ ДИФFUЗОРНОЙ ВЫЕМКЕ

А.В. Ильинков, А.В. Стародумов, В.В. Такмовцев,
А.В. Щукин, А.А. Киселев

Представлены результаты численного моделирования течения в ANSYS CFX. Сопоставление с экспериментальными данными подтвердило достоверность расчетов. Установлено существование двух режимов самоорганизации крупномасштабных вихревых структур в диффузорной выемке, определяемых углом ее установки: при $\beta < 30^\circ$ реализуется режим чередующегося переключения эпицентров вихрей, при $\beta = 30 \div 60^\circ$ – режим одиночного эпицентра с высокой интенсивностью вихреобразования.

Ключевые слова: однополостная диффузорная выемка, механизм самоорганизации вихревых структур, угол установки выемки в обтекающем ее турбулентном потоке.

При расчете и проектировании систем воздушного охлаждения газотурбинных двигателей ставится цель повышения их энергоэффективности и ресурса. Одним из важных направлений развития таких систем является сравнительный анализ возможностей разработки более экономичных и совершенных вариантов охлаждения горячих деталей двигателей и энергоустановок за счет управления самоорганизующимися крупномасштабными вихревыми структурами варьированием геометрическими и режимными параметрами интенсификатора и его расположения относительно направления основного потока.

Широко используемым вариантом обеспечения высокого уровня теплоотдачи в охлаждаемых воздухом каналах сопловых дефлекторных турбинных лопаток ГТД и ГТУ является щелевой охлаждающий канал с пристенными интенсификаторами теплообмена. Положительные результаты с высокой энергоэффективностью получены, например, на поверхностях щелевого канала с однополостными диффузорными выемками [1–3], выполненными на участках спинки и корытца профильной части турбинной лопатки со стороны внутреннего конвективного охлаждения.

Уровень эффективности конвективного теплообмена в полости этого интенсификатора во многом предопределяется интенсивностью самоорганизующихся крупномасштабных вихревых структур [1–3]. В связи с этим необходимо уделять внимание способам повышения устойчивости и интенсивности вихревого течения в придонной области выемки, в данном случае – в выемке диффузорной формы, форма которой запатентована [4].

В статье приведены результаты численных исследований в программном комплексе ANSYS CFX, который позволяет выполнять теплогидравлические расчеты и проектировать системы охлаждения с программированным конвективным теплообменом на внутренней поверхности охлаждаемой лопатки турбины. Расчеты течений в полусферических и диффузорных выемках выполнялись в диапазоне значений чисел Рейнольдса $Re = (1,1 \div 5,8)10^4$. Обтекающий выемки поток является турбулентным, степень турбулентности $Tu \approx 10\%$. Диапазон изменения угла установки диффузорной выемки в обтекающем ее потоке $\beta = 0 \div 60^\circ$. Моделировались одиночные выемки. Относительная погрешность результатов расчета гидродинамических параметров в выемке и в следе за ней находилась в диапазоне 8...12 %.

Далее проводится сопоставление полученных результатов расчетов механизма самоорганизации крупномасштабных вихревых структур в полости однополостной диффузорной выемки с аналогичными процессами в полусферической выемке отрывного типа. В связи с этим рассмотрим процесс поочередного выброса вихрей из полусферической выемки отрывного типа в основной поток.

Как известно [1–3], процесс самоорганизации крупномасштабных вихревых структур в полости полусферической выемки отрывного типа (рис. 1, а) имеет дискретный характер. Он характеризуется чередующимися процессами функционирования эпицентров этих вихрей в левой и правой половинках

полости выемки с выбросом их в следную область выемки под углом около 45° относительно продольной плоскости симметрии (рис. 1, б).

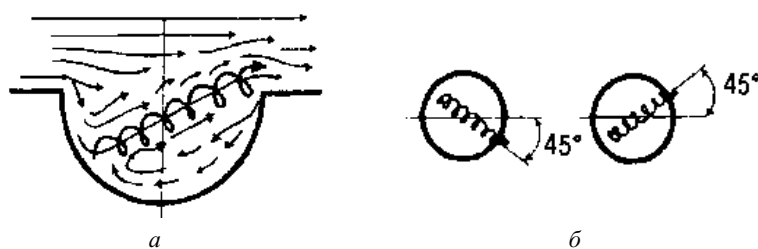


Рис. 1

Этот чередующийся процесс выброса вихрей из полости полусферической выемки отрывного типа предопределен возникающей чередующейся неустойчивостью пристенного течения в передней (в области входной кромки) части полости полусферической выемки отрывного типа. При этом коэффициент давления на поверхности полости полусферической выемки отрывного типа в области эпицентров вихревых структур составляет всего $C_p \approx (-0,05)$. Вследствие очень низких значений коэффициента давления в полости полусферической выемки отрывного типа выявлена низкая интенсивность процессов массообмена и теплопереноса в пристенном течении, обусловленных формированием указанных вихрей [5].

На рис. 2 показаны результаты численных расчетов самоорганизующихся крупномасштабных вихревых структур при обтекании полусферической выемки отрывного типа турбулентным потоком. Зафиксированы два положения эпицентра вихря – в верхней (рис. 2, а) и нижней (рис. 2, б) половинах полусферической выемки отрывного типа.

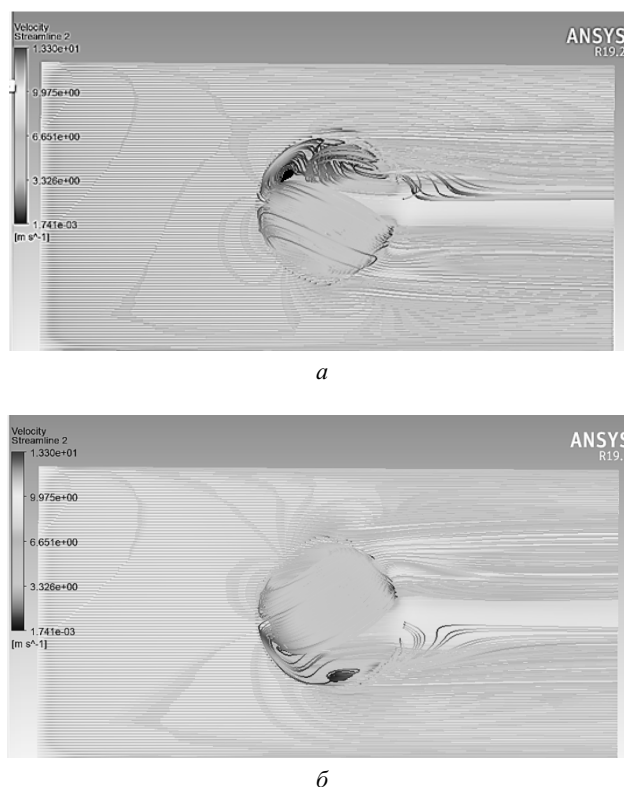


Рис. 2

Для повышения интенсивности теплоотдачи самоорганизующимися крупномасштабными вихревыми структурами в работе [4] была предложена схема однополостной диффузорной выемки, которая отличается от полусферической выемки отрывного типа удлинением полости выемки в продольном направлении (рис. 3).

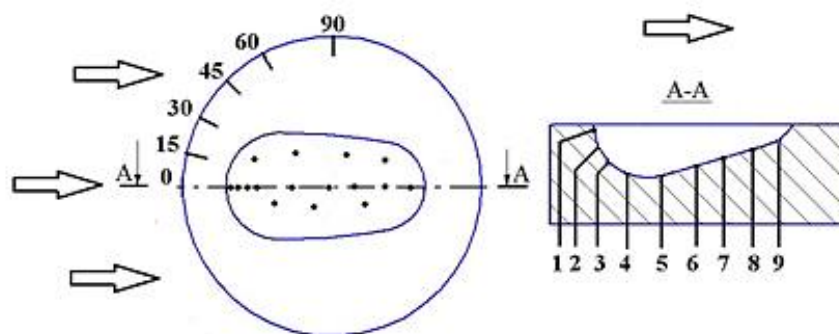


Рис. 3

Физические эксперименты [4] показали, что удлинение полости выемки, имеющей диффузную форму в плане и профильной проекции по направлению возвратного течения, снижает устойчивость возвратного течения и создает условия для самоорганизации мощных вихревых структур, способствующих интенсификации теплоотдачи на поверхности полости выемки. При этом чередующиеся процессы функционирования эпицентров вихрей в верхней и нижней половинах полости выемки не осуществляются.

Согласно результатам экспериментов [6] средняя теплоотдача в однополостной диффузной выемке примерно в 1,8 раза выше, чем в полусферической выемке отрывного типа, при прочих равных условиях. В связи с этим необходимо было выявить для модели однополостной диффузной выемки гидродинамические особенности обтекания полости такого типа. Объектом исследования являлась модель однополостной диффузной выемки, представленная на рис. 3 [6].

Анализ результатов измерений статического давления вдоль продольной плоскости симметрии однополостной диффузной выемки показал (рис. 4) [6], что при продольном расположении этой выемки ($\beta = 0^\circ$) численное значение коэффициента давления C_p незначительно, поскольку значение $C_p = -0,02$. При углах установки однополостной диффузной выемки $\beta = 30, 45, 60^\circ$ этот коэффициент имеет интенсивный режим разрежения: $C_p = -0,48; -0,52; -0,46$. В этом случае наблюдается интенсивный массообмен в придонной области однополостных диффузных выемок, обеспечивающий высокую теплоотдачу в этих выемках по сравнению с полусферической выемкой отрывного типа.

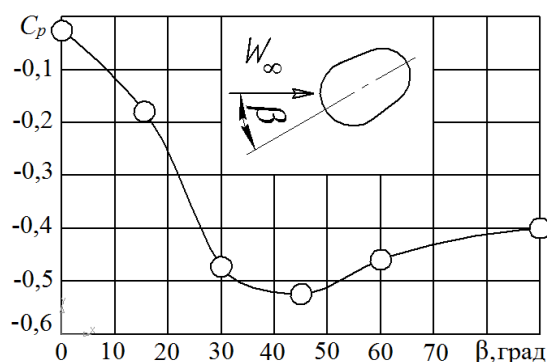
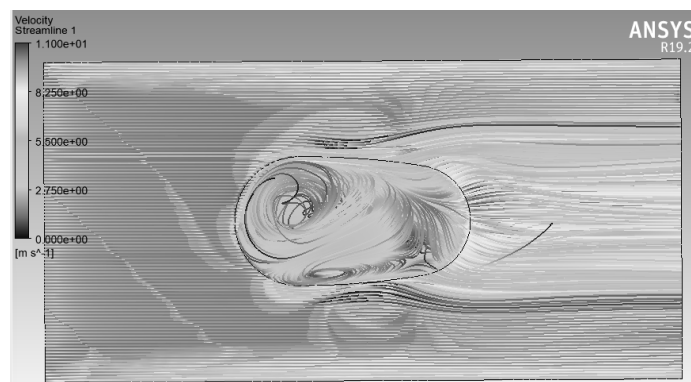


Рис. 4

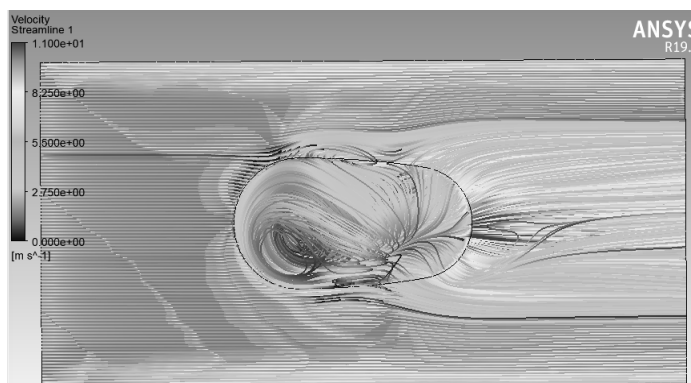
На рис. 5 показаны результаты численных расчетов самоорганизации крупномасштабных вихревых структур при продольном расположении выемки в потоке ($\beta = 0^\circ$). Зафиксированы два положения эпицентра вихря – в верхней (рис. 5, а) и нижней (рис. 5, б) половинах однополостной диффузной выемки относительно ее продольной плоскости симметрии.

Как следует из сопоставления результатов расчетов (см. рис. 5) и экспериментальной визуализации течений сажевыми каплями (рис. 6), механизм самоорганизации крупномасштабных вихревых структур при продольном расположении однополостной диффузной выемки ($\beta = 0^\circ$) в обоих случаях в

полной мере совпадает. Таким образом, кинетическая энергия в областях эпицентров вихревых структур при продольном расположении однополостной диффузорной выемки невелика и характеризуется низким значением коэффициента давления на придонной поверхности $C_p \approx (-0,02)$. Сравнительный анализ показывает, что этот малоинтенсивный вихрь имеет механизм самоорганизации, соответствующий механизму сферической отрывной выемки [6]. Данный механизм базируется на чередующемся переключении эпицентров самоорганизации вихрей с одной половины выемки (рис. 6, а) на другую (рис. 6, б). Низкий уровень разрежения характеризует низкую теплоотдачу на придонной поверхности однополостной диффузорной выемки.

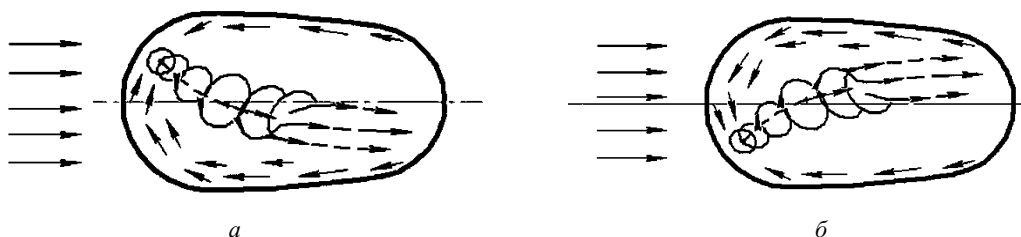


а



б

Рис. 5



а

б

Рис. 6

Рассмотрим вариант расположения выемки в потоке под углом $\beta = 45^\circ$, когда в экспериментах [6] наблюдаются высокие значения коэффициентов теплоотдачи на поверхности однополостной диффузорной выемки. В этом случае результаты визуализации течений в плане (рис. 7, а) и в продольном ее сечении, полученные с помощью сажемасляных капель, демонстрируют наличие мощной самоорганизующейся вихревой структуры, характерной для всего диапазона значений $\beta = 30 \div 60^\circ$.

В целом наблюдается хорошее соответствие картины линий тока расчетным результатам (рис. 8) при одинаковых режимных условиях.

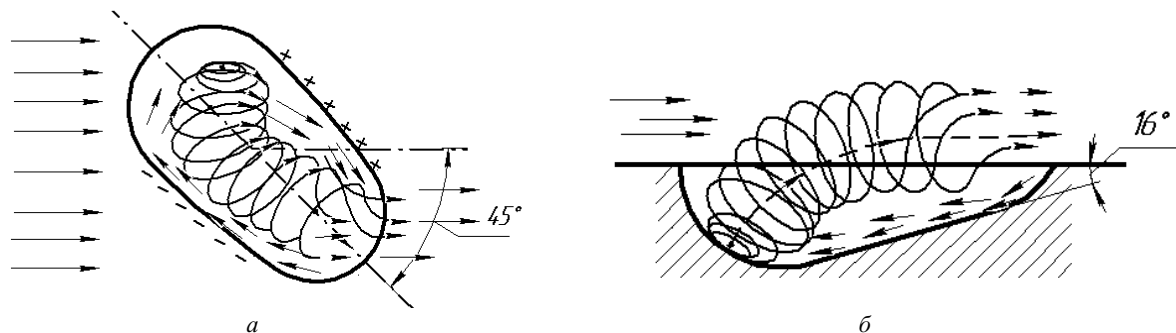


Рис. 7

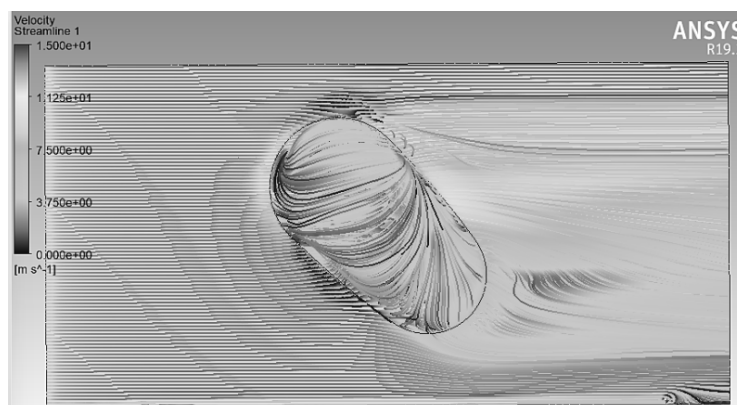


Рис. 8

Как следует из рис. 4, 8, сравнительно широкий диапазон интенсивного режима функционирования мощных вихревых структур в однополостной диффузорной выемке ($\beta = \pm 15^\circ$) не требует жесткого соблюдения допуска на угол ее установки в потоке, обеспечивая устойчивое поддержание высокого уровня теплоотдачи в полости. Вместе с тем с точки зрения снижения трудоемкости изготовления интенсификаторов наиболее целесообразно назначать угол установки $\beta = 60^\circ$. В данном случае при установке однополостной диффузорной выемки под этим углом относительное значение ширины следа за выемкой по сравнению с $\beta = 30^\circ$ возрастает в 1,7 раза. Отсюда следует, что при установке однополостной диффузорной выемки под углом 60° при том же высоком уровне теплоотдачи в выемках требуемое количество выемок в ряду сокращается в 1,7 раза по сравнению с $\beta = 30^\circ$.

Результаты расчетов, выполненных с использованием программного комплекса ANSYS CFX, свидетельствуют о возможности применения данного программного средства для проекторочных расчетов матриц высокоэнергетически эффективных однополостных диффузорных выемок. Полученные расчетные картины линий тока в возвратных течениях в полусферической и однополостной диффузорной выемках сопоставлены с опубликованными результатами экспериментальных исследований механизма самоорганизации крупномасштабных вихревых структур в их полостях. Полученные расчетные результаты подтверждены опытными данными о картинах течения и расположении эпицентров самоорганизующихся крупномасштабных вихревых структур двух типов – в полусферической и однополостной диффузорной выемках, обтекаемых турбулентным потоком. Были сопоставлены и экспериментально подтверждены полученные расчетом диапазоны значений углов установки однополостной диффузорной выемки с интенсивным массообменом на основе генерации мощных самоорганизующихся крупномасштабных вихревых структур. Диапазон значений угла установки однополостной диффузорной выемки с высокой теплоотдачей составляет $\pm 15^\circ$, что позволяет увеличить допуски на угол установки однополостной диффузорной выемки в обтекаемом ее потоке без снижения уровня теплоотдачи. Сравнительными расчетами подтверждено также, что при установке однополостной диффузорной выемки под углом $\beta = 60^\circ$ относительное значение ширины следа за выемкой по сравнению с $\beta = 30^\circ$ увеличивается в 1,7 раза. Резкое

снижение интенсивности вихревых структур при $\beta < 30^\circ$ и положительном эффекте угла установки $\beta = 60^\circ$ позволяет уменьшить количество однополостных диффузорных выемок в ряду примерно в 1,7 раза при сохранении высокой интенсивности самоорганизующихся крупномасштабных вихревых структур. Продемонстрированная возможность практического применения программного комплекса ANSYS CFX в численных исследованиях механизмов самоорганизации крупномасштабных вихревых структур в однополостной диффузорной выемке показала перспективы использования этого программного комплекса при решении других аналогичных задач с самоорганизацией крупномасштабных вихревых структур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кикнадзе Г.И. и др. Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках вязких сплошных сред и интенсификация теплообмена, сопровождающая это явление. М.: МЭИ, 2005. 84 с.
2. Иванов В.Л., Манушин Э.А. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 534 с.
3. Исаев С.А. и др. Интенсификация теплообмена овальными лунками // Тез. докл. и сообщений 15-го Минского междунар. форума по тепло- и массообмену, г. Минск, Беларусь, 23–26 мая 2016. Минск: Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. Т. 1. С. 102–105.
4. Теплообменная поверхность: пат. 2675733 Рос. Федерация, № 2018107160; заявл. 26.02.2018; опубл. 24.12.2018, Бюл. № 36.
5. Терехов В.И. Теплообмен в дозвуковых отрывных потоках. Новосибирск: НГТУ, 2016. 247 с.
6. Щукин А.В. и др. Теплофизика рабочих процессов в охлаждаемых лопатках газовых турбин. Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2020. 392 с.

Поступила в редколлегию 2.06.25

ON NUMERICAL SIMULATION OF SELF-ORGANIZING LARGE-SCALE VORTICAL STRUCTURES IN A SINGLE-CAVITY DIFFUSER-TYPE DIMPLE

A.V. Il'inkov, A.V. Starodumov, V.V. Takmovtsev, A.V. Shchukin, and A.A. Kiselev

Numerical simulation was carried out using ANSYS-CFX software. Comparison against experimental data confirmed the validity of simulation. It was demonstrated that there exist two types of self-organization of large-scale vortical structures in a diffuser-type dimple depending on the dimple installation angle: switching of vortex epicenters is observed at $\beta < 30^\circ$, while a single epicenter with high intensity of vortex generation exists at $\beta = 30^\circ$ – 60° .

Keywords: single-cavity diffuser-type dimple, mechanism of self-organization of vortical structures, dimple installation angle in turbulent flow.

Ильинков Андрей Владиславович – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: ailinkov@mail.ru

Стародумов Андрей Владимирович – начальник расчетно-исследовательского управления (ОКБ им. Люльки ПАО «УДК-УМПО», Москва)
E-mail: andrey-star.work@yandex.ru

Такмовцев Владимир Викторович – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: vvt379@rambler.ru

Щукин Андрей Викторович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: a.v.shchukin@rambler.ru

Киселев Александр Алексеевич – магистрант (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: aakiselev1603@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫТЕСНЕНИЯ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ ДИОКСИДОМ УГЛЕРОДА ИЗ ОДНОРОДНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

А.В. Радаев, А.Н. Сабирзянов, Н.А. Васенева

Модернизирован экспериментальный стенд для исследования процессов массообмена в пористой среде посредством введения узла насыщения пористой среды углеводородом. Проведены экспериментальные исследования по вытеснению жидкого углеводорода диоксидом углерода при различных давлениях при проницаемости пористой среды 0,18 и 0,038 мкм² на изотерме 353 К. Показано, что снижение абсолютной проницаемости пористой среды приводит к снижению доли вытесняемого углеводорода на 8–12 % на всех исследованных изотермах. Проведен расчет неопределенности измерения количества вытесняемого углеводорода диоксидом углерода. Установлено, что неопределенность измерения доли вытесняемого углеводорода не превышает 5,78 %.

Ключевые слова: процесс массообмена, пористая среда, система насыщения, нефтенасыщенность, доля вытесняемого углеводорода.

Процесс массопереноса в пористой среде рассмотрен в работах [1–4], в частности, исследуются процессы фильтрации сжимаемой и несжимаемой жидкости, газированной жидкости. Вследствие того что пористая среда характеризуется высокой удельной поверхностью, а скорости вытеснения крайне низкие, можно предположить, что процесс фильтрации приближается к равновесному, а система «углеводород – сверхкритический флюид» в пористой среде находится в состоянии термодинамического равновесия.

Для определения насыщенности пористой среды углеводородом при моделировании двухкомпонентной фильтрации в пористой среде вводится понятие насыщенности доли объема пор, занятой конкретной фазой. Насыщенность обоими флюидами при известных значениях начальной насыщенности пористой среды углеводородом и диоксидом углерода будет определяться уравнениями материального баланса. Таким образом, основной задачей при проведении исследований является получение экспериментальных данных по доле вытесняемого углеводорода и уравнений материального баланса по углеводороду и сверхкритическому углеводороду.

Процессы массообмена в пористой среде исследуются на экспериментальной установке [5, 6], позволяющей проводить исследования процесса фильтрации в широком интервале температур и давлений, в том числе в жидкой и сверхкритической области для диоксида углерода.

Основной узел экспериментальной установки – экспериментальная ячейка, наполняемая пористой средой. Методика проведения эксперимента основана на использовании уравнений материального баланса. Уравнение материального баланса по диоксиду углерода выглядит следующим образом:

$$m_1 - m_2 = m_3 + m_4, \quad (1)$$

где m_1 , m_2 – масса баллона с диоксидом углерода до и после опыта; m_2 , m_3 – масса диоксида углерода в пористой среде и приемном баллоне.

Уравнение материального баланса по углеводороду записывается в следующем виде:

$$M_1 = M_2 + M_3, \quad (2)$$

где M_1 – исходная масса углеводорода; M_2 – масса углеводорода в пористой среде; M_3 – масса углеводорода в сосуде для сбора углеводорода.

Это позволяет определить остаточную насыщенность пористой среды углеводородом по следующему уравнению:

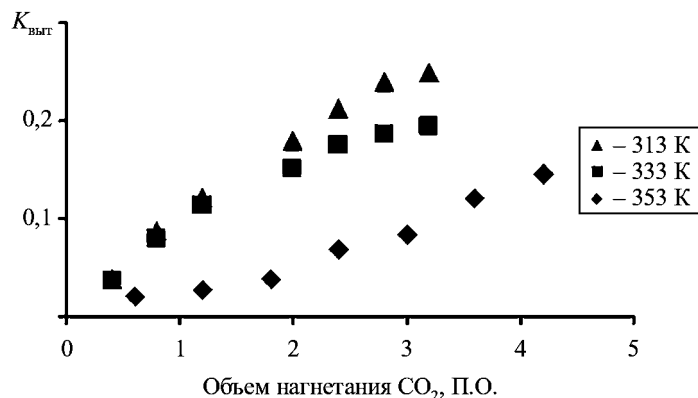
$$S_{\text{ост}} = 1 - M_2/M_1, \quad (3)$$

Доля вытесняемого из пористой среды углеводорода коэффициент – вытеснения нефти $K_{\text{выт}}$ – определяется по следующему уравнению:

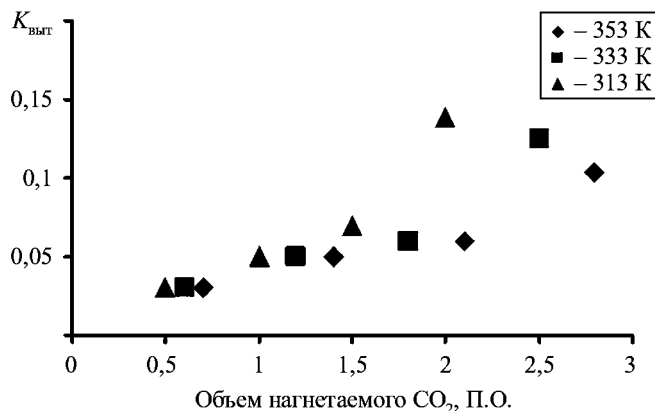
$$K_{\text{выт}} = 1 - S_{\text{ост}} \quad (4)$$

На экспериментальной установке проведены исследования по вытеснению индустриального масла сверхкритическим диоксидом углерода из однородной пористой среды на изотермах 313, 333, 353 К. Приведем результаты исследований.

Приведем зависимости доли вытесняемого индустриального масла вязкостью 52,2 мПа·с от объема нагнетания диоксида углерода на изобарах 9, 10, 12 МПа соответственно в пористой среде с проницаемостью $k = 0,18 \text{ мкм}^2$ (рис. 1–3, а) и $k = 0,038 \text{ мкм}^2$ (рис. 1–3, б).

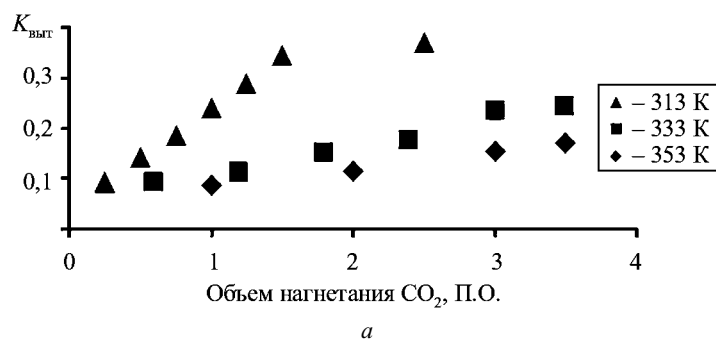


а



б

Рис. 1



а

Рис. 2 (Начало)

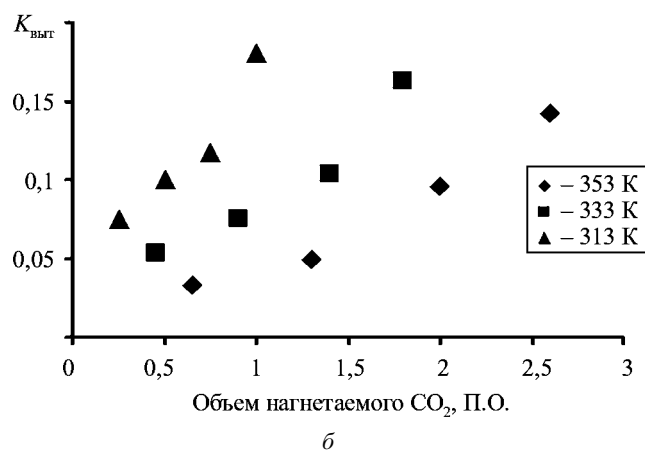


Рис. 2 (Окончание)

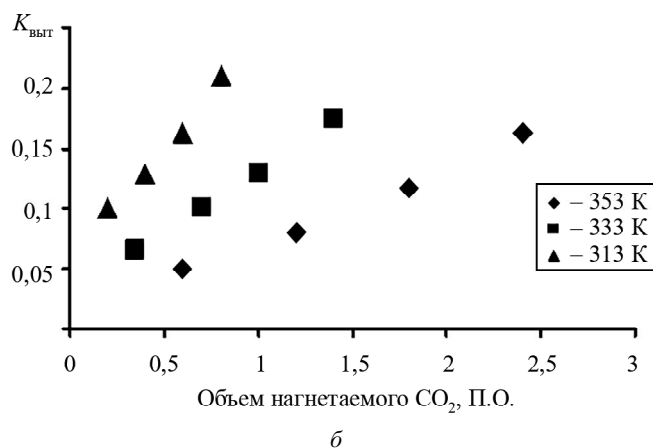
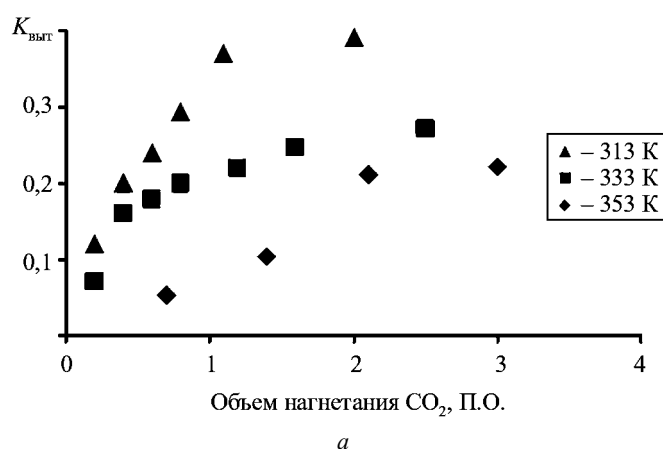


Рис. 3

Как показали результаты исследований, увеличение давления приводит к увеличению доли вытесняемого углеводорода. Так, доля вытесняемого из пористой среды индустриального масла на изотерме 353 К при давлении 12 МПа превышает долю вытесняемого индустриального масла при давлении 9 МПа примерно на 15 %. Аналогичные результаты получены в экспериментах с пористой средой, абсолютная проницаемость которой была ниже первоначального значения примерно в пять раз (0,018 мкм²). Следует отметить, что экспериментальная кривая для температуры 313 К и давления 7,5 МПа отсутствует. Это обусловлено тем, что при указанных термобарических условиях в экспериментах с использованием индустриального масла степень вытеснения углеводорода была практически нулевой.

Эксперимент был завершен через 18 ч после его начала в связи с практически полным прекращением поступления углеводорода в приемную емкость. За указанный период было вытеснено не более 80 мл трансформаторного масла, что соответствует коэффициенту вытеснения углеводорода около 0,03.

Увеличение давления выше критического значения сопровождается существенным ростом плотности диоксида углерода и, как следствие, снижением его кинематической вязкости. Одновременно с этим изменяется форма газовых пузырьков: они приобретают вытянутую конфигурацию, что способствует их проникновению в суженные участки порового пространства и вытеснению углеводорода из ранее недоступных для газа областей. По мнению автора, именно этим объясняется появление прорывов газа после превышения давлением нагнетания критического значения. Отличительной особенностью рассматриваемого процесса является вытеснение высоковязкого углеводорода в присутствии менисков, что обусловлено ограниченной взаимной растворимостью индустриального масла и диоксида углерода.

Доля вытесненного из пористой среды углеводорода является расчетным параметром, а измерение косвенным. Расчет неопределенности измерения величины β осуществляется в соответствии с ГОСТ 34100.3 [7].

Доля вытесненного углеводорода β может быть представлена в виде отношения объема вытесненного углеводорода V_1 к исходному объему углеводорода V_2 :

$$\beta = \frac{V_1}{V_2}. \quad (5)$$

Абсолютная неопределенность измерения β определяется выражением

$$\Delta\beta = \sqrt{\left(\frac{\partial\beta}{\partial V_1} \Delta V_1\right)^2 + \left(\frac{\partial\beta}{\partial V_2} \Delta V_2\right)^2} = \frac{V_1}{V_2} \sqrt{\frac{\Delta V_1^2}{V_1^2} + \frac{\Delta V_2^2}{V_2^2}}. \quad (6)$$

Схема узла насыщения пористой среды углеводородом приведена на рис. 4. Здесь: 1 – экспериментальная ячейка; 2 – бак питательный с углеводородом; 3 – бак питательный с углеводородом; 4 – приемная емкость углеводорода; 5 – промежуточный сосуд; 6 – насос высокого давления; 7 – насос вакуумный; 8 – расходомер для углеводорода; 9 – расходомер для углеводорода; 10, 11 – манометры; 12 – термостат; 13–16 вентили запорные.

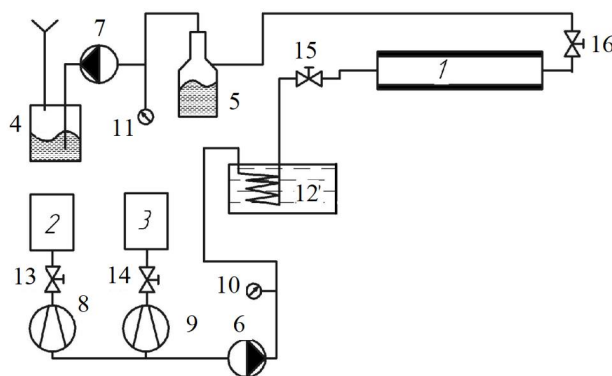


Рис. 4

При определении величины абсолютной погрешности учтем, что количество углеводорода, насыщающего экспериментальную ячейку, определяется не непосредственно, а измерением объемов углеводорода V_{c1} и V_{c2} в сосудах 2, 3 и в приемной емкости углеводорода V_4 .

Это означает, что каждый член в уравнении определяется с абсолютной погрешностью ΔV_{c1} , ΔV_{c2} , ΔV_4 , а абсолютные погрешности складываются.

В итоге при $\Delta V_{c1} = \Delta V_{c2} = 10$ мл и $\Delta V_4 = 10$ мл получаем $\Delta V_2 = 30$ мл.

Абсолютная погрешность измерения количества углеводорода определяется по следующему уравнению:

$$\Delta V_2 = \Delta V_{c1} + \Delta V_{c2} + \Delta V_4 = 30 \text{ мл.}$$

Статистическая обработка результатов измерения осуществляется следующим образом. Вначале определяется среднее значение результатов измерения для V_1 и V_2 , затем опытное среднеквадратическое отклонение и случайная погрешность результата измерения. Методика определения приведенных параметров аналогична методике при расчете растворимости диоксида углерода в углеводороде. Относительная неопределенность определения величины $K_{\text{выт}}$:

$$\delta = (\Delta K_{\text{выт}} / K_{\text{выт}}) 100 \%;$$
$$\delta K_{\text{выт}} = 0,0578 \% \text{ или } \delta K_{\text{выт}} = 5,78 \%. \quad (7)$$

Таким образом, модернизирован экспериментальный стенд для проведения исследования процесса вытеснения углеводородом жидкими и сверхкритическими вытесняющими агентами. Проведены экспериментальные исследования процесса вытеснения индустриального масла из однородной пористой среды с различной абсолютной проницаемостью диоксидом углерода. Показано, что при температуре 353 К вытесняется незначительное количество углеводорода, а при давлении 7,5 МПа на изотерме 353 К выхода углеводорода из пористой среды практически не наблюдается. Установлено, что снижение проницаемости пористой среды с 0,18 до 0,038 мкм² приводит к значительному снижению доли вытесняемого из пористой среды углеводорода. Проведен расчет неопределенности измерения доли вытесняемого углеводорода.

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коленкина Е.И. и др. М.: Изд-во ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, 2019. 73 с.
2. Лян М. Физическое моделирование вытеснения нефти газом (растворителем) с использованием керновых моделей пласта и slim tube: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 25 с.
3. Зубов В.Р. Математическое моделирование многофазной фильтрации с неравновесными фазовыми переходами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 110 с.
4. Баллинт В. Применение углекислого газа в добыче нефти. М.: Недра, 1977. 240 с.
5. Радаев А.В., Сабирзянов А.Н. Исследование смешивающегося режима вытеснения нефти с использованием сверхкритических флюидных систем из низкопроницаемых пластов терригенного типа // Теоретические основы химической технологии. 2022. № 6. С. 729–734.
6. Радаев А.В., Мухамадиев А.А., Сабирзянов А.Н. Экспериментальная установка для физического моделирования процесса вытеснения нефти из однородных коллекторов различной проницаемости с использованием оторочек сверхкритического углекислого газа и воды // Инженерная физика. 2020. № 12. С. 8–12.
7. ГОСТ 34100.3 Неопределенность измерения. Ч. 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. М.: Стандартинформ, 2017. 105 с.

Поступила в редколлегию 12.03.26

STUDY OF PROCESS OF DISPLACEMENT OF LIQUID HYDROCARBONS BY CARBON DIOXIDE FROM HOMOGENEOUS POROUS MEDIUM

A.V. Radaev, A.N. Sabirzyanov, and N.A. Vaseneva

The work modernized an experimental stand for studying mass exchange processes in a porous medium by introducing a unit for saturating the porous medium with hydrocarbon. Experimental studies have been carried out to displace a liquid hydrocarbon with carbon

dioxide at various pressures with a porous medium permeability of 0.18 and 0.038 μm^2 on the 353 K isotherm. It is shown that on the 353 K isotherm with a decrease in the absolute permeability of the porous medium, the proportion of displaced hydrocarbon using carbon dioxide decreases. Uncertainty of carbon dioxide displacement hydrocarbon measurement was calculated. The calculation showed that the uncertainty of measuring the share of displaced hydrocarbon does not exceed 5,78%.

Keywords: mass transfer process, porous medium, saturation system, oil saturation, fraction of displaced hydrocarbon.

Радаев Андрей Викторович – канд. техн. наук (ГАОУ ВО АГТУ «Высшая школа нефти», Альметьевск)

E-mail: a.radaev@agni-rt.ru

Сабирзянов Айдар Назимович – д-р техн. наук (КНИТУ, Казань)

E-mail: sabirzyanov_2026@mail.ru

Васенева Надежда Анатольевна – ст. преподаватель (ГАОУ ВО АГТУ «Высшая школа нефти», Альметьевск)

E-mail: vaseneva@agni-rt.ru

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОСЛОЙНЫХ PVD-ПОКРЫТИЙ

Р.В. Гавариев, К.Н. Гавариева

Обоснована эффективность применения многослойных PVD-покрытий для повышения ресурса формообразующего инструмента. На основе анализа физико-механических свойств покрытий на основе нитридов и карбонитридов титана, молибдена и их комбинаций предложена трехслойная архитектура «мягкий – твердый – мягкий» с композицией $TiCN - (Ti, Mo)N - MoN$. Результаты моделирования подтверждают снижение контактных температур и эквивалентных напряжений на рабочей поверхности оснастки, что позволяет рассматривать предложенное покрытие как универсальное решение для широкого спектра заготовительных технологий.

Ключевые слова: PVD-покрытия, технологическая оснастка, литье под давлением, штамповка, холодная высадка, трещиностойкость, многослойные покрытия, нитрид титана, нитрид молибдена, карбонитрид титана, компьютерное моделирование.

Современное заготовительное производство в машиностроении базируется на процессах обработки металлов давлением (штамповка, холодная высадка, прессование) и литья под давлением. Общей чертой этих технологий является использование дорогостоящей технологической оснастки, работоспособность которой определяет как себестоимость продукции, так и стабильность геометрических параметров деталей. Инструментальные стали, традиционно применяемые для изготовления оснастки, подвергаются комплексному разрушающему воздействию – циклическим теплосменам в горячей штамповке и литье, высоким контактными давлениями, абразивному и адгезионному износу, а также термоусталостным явлениям, приводящим к образованию сетки разгарных трещин [1–3].

Одним из наиболее эффективных путей повышения стойкости оснастки является нанесение износостойких покрытий методами физического осаждения из паровой фазы (PVD). Покрытия на основе нитридов и карбонитридов переходных металлов позволяют существенно изменить характер взаимодействия поверхности инструмента с деформируемым или заливаемым материалом. Благодаря высокой твердости, химической инертности и возможности создания в покрытии благоприятных сжимающих остаточных напряжений удастся замедлить зарождение и рост трещин, снизить коэффициент трения и теплопередачу от расплава к инструменту [4–6].

Анализ литературы показывает, что в большинстве работ исследуется либо конкретный процесс, либо общие трибологические характеристики покрытий без учета специфики термомеханического нагружения оснастки [7, 8]. В то же время такие процессы, как горячая объемная штамповка и литье под давлением, имеют сходные механизмы разрушения формообразующих поверхностей – термоциклирование с амплитудой до нескольких сотен градусов и воздействие растягивающих напряжений в моменты съема детали. Холодная высадка и листовая штамповка характеризуются экстремальными контактными давлениями, требующими высокой адгезионной прочности покрытия и его сопротивления сдвиговым деформациям. Это позволяет предположить, что принципы конструирования покрытий, разработанные для одного вида производства, могут быть с соответствующими коррективами распространены на другие.

Настоящая работа ставит целью обобщить результаты исследований, полученные для условий литья под давлением цинковых сплавов, и на их основе сформулировать общие подходы к выбору состава и архитектуры многослойных PVD-покрытий, предназначенных для повышения ресурса технологической оснастки широкой номенклатуры заготовительных производств.

Для выработки общих принципов конструирования защитных покрытий, применимых в различных заготовительных процессах, был проведен анализ условий нагружения технологической оснастки литья под давлением, горячей и холодной штамповки, холодной высадки и прессования, позволивший выделить доминирующие факторы разрушения (циклические теплосмены, высокие контактные давления, сдвиговые деформации, абразивное воздействие). Несмотря на различие интенсивности этих факторов, общей закономерностью является наличие термомеханической усталости поверхности, что дает основание применить единую методологию исследования, включающую анализ кинетики трещинообразования в покрытии и подложке, оценку физико-механических свойств покрытий и компьютерное моделирование теплового и напряженного состояния формообразующих элементов [9].

Ввиду малой толщины покрытий, измеряемой единицами микронметров, непосредственное определение характеристик трещиностойкости стандартными методами механики разрушения затруднительно, поэтому оценка проводилась расчетом с использованием соотношений физики твердого тела и теории трещин Гриффитса – Ирвина [10, 11]. Согласно этой теории критическое условие распространения трещины определяется балансом упругой энергии, высвобождаемой при ее росте, и поверхностной энергии разрушения. Ключевыми параметрами, определяющими способность покрытия сопротивляться росту трещин, приняты критический коэффициент интенсивности напряжений и предел текучести покрытия σ_T :

$$K_{IC} = \sqrt{2E\gamma}; \quad (1)$$

$$\sigma_T \approx \frac{HV}{3}, \quad (2)$$

где γ – поверхностная энергия разрушения; E – модуль Юнга; σ_T – предел текучести покрытия, оцениваемый по микротвердости HV, исходя из известной для керамических и металлоподобных материалов. Также важным параметром является величина перемещения берегов трещины и распределение напряжений перед ее вершиной, рассчитанные на основе упругой модели с учетом анизотропии свойств, характерной для покрытий, полученных методом катодно-ионной бомбардировки.

Для расчетов использовались экспериментально определенные значения модуля Юнга и микротвердости покрытий различных составов. В качестве материалов подложки использовались конструкционная легированная сталь 40X (ГОСТ 4543-2016) и инструментальная штамповая сталь 4X5МФС (ГОСТ 5950-2000). Их химический состав приведен в таблице.

Марка стали	C	Cr	Mo	V	Si	Mn	Fe
40X	0,36–0,44	0,8–1,1	-	-	0,17–0,37	0,5–0,8	Основа
4X5МФС	0,32–0,4	4,5–5,5	1,2–1,5	0,3–0,5	0,9–1,2	0,2–0,5	

Объекты исследования – покрытия, применение которых перспективно в различных условиях эксплуатации: одноэлементные нитриды TiN и MoN как базовые износостойкие покрытия с умеренной твердостью и пластичностью, карбонитриды TiCN и MoCN с повышенной твердостью за счет внедрения атомов углерода, что актуально для условий абразивного износа, а также многоэлементный нитрид (Ti,Mo)N, сочетающий высокую твердость с повышенным уровнем сжимающих остаточных напряжений и отличающийся большей пластичностью по сравнению с карбонитридами. Нанесение покрытий осуществлялось методом катодно-ионной бомбардировки, обеспечивающим высокую адгезию и возможность формирования слоистых структур.

Для оценки влияния покрытий на температурные поля и напряженно-деформированное состояние формообразующих элементов использовался метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе ANSYS Workbench. Сетка конечных элементов строилась сгущением в зоне контактной поверхности (минимальный размер элемента в зоне покрытия – 1 мкм). Граничные условия теплового анализа задавались на основе нестационарного теплового потока от расплава. В качестве базовой модели использовалась формообразующая вставка для литья под давлением цинкового сплава ЦАМ 4-1, при этом полученные закономерности распространялись на типовые элементы штамповой оснастки варьиро-

ванием граничных условий [12]. Моделирование выполнялось в два этапа, на первом имитировалась оснастка с азотированным поверхностным слоем, соответствующая традиционной технологии упрочнения, а на втором – оснастка с многослойным PVD-покрытием. Контролируемыми параметрами являлись максимальные значения температуры на рабочей поверхности и эквивалентные напряжения по Мизесу в моменты заливки расплава или приложения рабочей нагрузки, при этом толщина покрытия задавалась в пределах 6...10 мкм, что соответствует типичным значениям для промышленного применения. Такой комплексный подход, сочетающий аналитические расчеты, экспериментальные данные по свойствам покрытий и численное моделирование, позволил сформулировать критерии выбора архитектуры покрытия, применимые для широкого круга заготовительных процессов.

Исследование механизмов разрушения формообразующих поверхностей в процессах литья под давлением, горячей штамповки и холодной высадки показало, что, несмотря на различие физической природы нагружения, доминирующим фактором, лимитирующим ресурс оснастки, является образование и рост трещин усталостного характера. В литье под давлением цинковых сплавов трещины разгара формируются уже в течение первых тысяч циклов вследствие циклического теплового удара при заливке расплава и последующего охлаждения, причем наиболее интенсивно этот процесс протекает на острых кромках и галтельных переходах, где концентрируются растягивающие напряжения. В горячей штамповке аналогичная картина дополняется сдвиговыми деформациями при течении металла в ручьях, а в холодной высадке и листовой штамповке преобладают контактные давления, приводящие к адгезионно-усталостному износу. Общей закономерностью является то, что защитное покрытие должно не только экранировать поверхность от непосредственного контакта с деформируемым материалом или расплавом, но и активно препятствовать распространению трещин, зарождающихся как в самом покрытии, так и в материале подложки.

Анализ литературных данных и собственных экспериментальных результатов позволил сформулировать ключевые требования к покрытиям, работающим в таких условиях. Покрытие должно обеспечивать снижение температуры в зоне контакта, что непосредственно уменьшает термические напряжения и амплитуду их циклических колебаний. Наряду с этим в покрытии необходим высокий уровень остаточных сжимающих напряжений, способных компенсировать действие растягивающих нагрузок от рабочего процесса и тем самым замедлять рост трещин.

Важнейшую роль играет также адгезионная прочность связи с подложкой, поскольку отслаивание покрытия нивелирует все его защитные функции. Достижение совокупности указанных требований в рамках одного материала сопряжено с ограничениями: повышение твердости и прочности закономерно сопровождается возрастанием хрупкости и снижением пластичности.

Для количественной оценки пригодности различных материалов в качестве элементов защитного покрытия были исследованы составы на основе нитридов и карбонитридов титана и молибдена, а также их комбинации. Выбор титана в качестве основного компонента обусловлен его кристаллохимическим строением, благоприятным для образования прочных соединений с азотом и углеродом, а также высокой адгезией к инструментальным сталям. Молибден, характеризующийся большей податливостью, представляет интерес для создания менее напряженных промежуточных слоев.

Измерения модуля Юнга и микротвердости покрытий, нанесенных методом катодно-ионной бомбардировки на образцы из сталей 40X и 4X5МФС, показали, что марка стали-подложки и толщина покрытия в диапазоне 3...8 мкм не оказывают статистически значимого влияния на упругие характеристики. Так, для покрытия TiN модуль Юнга составил 343–345 ГПа независимо от материала вставки, а изменение толщины на 2 мкм дало менее 0,05 % вариации. Это свидетельствует о том, что формируемая методом катодно-ионной бомбардировки структура покрытия является самодостаточной, и ее свойства определяются преимущественно составом и условиями осаждения, а не влиянием подложки. Напротив, химический состав покрытия изменяет модуль Юнга весьма существенно. Наибольшие значения зафиксированы для многоэлементного нитрида (Ti,Mo)N (до 376 ГПа), несколько ниже у карбонитридов TiCN и MoCN (362–368 ГПа), минимальные значения наблюдаются у простых нитридов TiN и MoN (337–343 ГПа).

Аналогичная тенденция прослеживается и для микротвердости: наиболее твердым является покрытие (Ti,Mo)N с показателем 37,6 ГПа, тогда как твердость TiN и MoN не превышает 21,4 ГПа.

Сопоставление модуля Юнга и микротвердости выявило их корреляцию, что согласуется с общими представлениями физики твердого тела, однако в случае карбонитридов наблюдается некоторое отклонение: при достаточно высокой твердости их модуль Юнга несколько ниже, чем у (Ti,Mo)N. Это может быть объяснено наличием углерода, который, повышая сопротивление пластической деформации, одновременно снижает жесткость кристаллической решетки за счет образования более ковалентных связей. С практической точки зрения это означает, что карбонитриды, будучи более твердыми, являются и более хрупкими, что важно учитывать при выборе материалов для работы в условиях ударных или знакопеременных нагрузок.

Для прогнозирования поведения покрытий при наличии трещин были выполнены расчеты поверхностной энергии разрушения, предела текучести и коэффициента интенсивности напряжений. Предел текучести, оцененный по формуле (2), закономерно выше у более твердых покрытий и достигает 12,5 ГПа для (Ti,Mo)N против 7,1 ГПа для TiN. Поверхностная энергия, характеризующая энергоемкость разрушения, также максимальна у многоэлементного нитрида (6,24 Дж/м²), что на 40 % превышает соответствующий показатель для TiN. Критический коэффициент интенсивности напряжений, рассчитанный по соотношению (1), подчиняется той же закономерности, причем разброс между минимальным и максимальным значениями составляет полуторакратную величину.

Анализ распределения напряжений перед вершиной трещины и величины перемещения ее берегов показал, что интенсивность роста трещины определяется не только абсолютными значениями прочностных характеристик, но и соотношением модуля Юнга и поверхностной энергии. В рамках линейной механики разрушения для случая плоской деформации нормальные напряжения σ_{yy} на продолжении трещины описываются выражением

$$\sigma_{yy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}}, \quad (3)$$

где K_1 – коэффициент интенсивности напряжений для трещины первого типа; r – расстояние от вершины трещины. Для покрытий с более выраженной пластичностью (в частности, TiN и MoN) характерно снижение величины раскрытия трещины при одинаковой нагрузке. Вместе с тем энергетические затраты на разрушение таких материалов оказываются существенно ниже по сравнению с менее пластичными аналогами. В отличие от указанных составов, покрытие (Ti,Mo)N характеризуется повышенной жесткостью и высокой энергоемкостью, что обуславливает значительное замедление распространения трещины.

Таким образом, ни одно из исследованных однослойных покрытий не является идеальным. TiN и MoN обеспечивают приемлемую пластичность и адгезию, но недостаточно тверды для длительного сопротивления абразивному износу, тогда как (Ti,Mo)N и карбонитриды, демонстрируя выдающиеся прочностные показатели, склонны к хрупкому разрушению и имеют пониженную адгезию. Это обстоятельство предопределяет необходимость перехода к многослойным композициям, в которых каждый слой выполняет свою функцию.

Теоретический анализ распространения трещин в слоистых средах показывает, что эффективным способом торможения трещины является создание на ее пути границ раздела с резким изменением механических свойств. При переходе трещины из твердого слоя в мягкий на границе возникают значительные сдвиговые напряжения. Величина этих напряжений может быть оценена из условия совместности деформаций на границе раздела:

$$\tau_{\max} \approx \frac{E_1 - E_2}{E_1 + E_2} \sigma_{\text{appl}}, \quad (4)$$

где E_1 , E_2 – модули Юнга соседних слоев; σ_{appl} – приложенное напряжение.

При отношении $E_1/E_2 > 2$ сдвиговые напряжения способны на порядок превышать величину напряжений, возникающих перед вершиной трещины. Это приводит к отклонению траектории распространения трещины либо расслоению, сопровождающемуся дополнительными энергетическими затратами. При переходе трещины из более мягкого слоя в более твердый доминируют растягивающие напряжения, вызывающие тенденцию к разделению слоев материала, что также повышает сопротивление дальнейшему распространению трещины. Наиболее благоприятным с точки зрения минимизации как сдвиговых, так и растягивающих напряжений на границах является чередование слоев по схеме «мягкий – твердый – мягкий».

Применительно к условиям заготовительных производств, где одновременно действуют тепловые и силовые факторы, такая архитектура позволяет решить несколько задач одновременно. Нижний слой, контактирующий с инструментальной сталью, должен характеризоваться максимальной адгезией и пластичностью, чтобы компенсировать разницу термического расширения материалов и предотвратить отслаивание при циклических теплосменах. Промежуточный слой воспринимает основную механическую нагрузку, сопротивляясь росту трещин и внедрению абразивных частиц. Верхний слой, непосредственно взаимодействующий с обрабатываемым материалом или расплавом, призван снижать трение, температуру контакта и препятствовать диффузионному или коррозионному воздействию.

Схема такой трехслойной композиции приведена на рис. 1. Здесь: 1 – верхний слой (MoN), обеспечивающий снижение трения и теплопередачи; 2 – промежуточный слой ((Ti,Mo)N), создающий высокие сжимающие напряжения и препятствующий росту трещин; 3 – нижний слой (TiCN), обеспечивающий адгезию к стальной подложке.



Рис. 1

С учетом сформулированных принципов и полученных данных о свойствах однослойных покрытий был предложен состав трехслойной композиции, оптимизированный для условий термомеханического нагружения. В качестве нижнего адгезионного слоя выбран TiCN, который при достаточно высокой твердости сохраняет приемлемую пластичность и образует прочную диффузионную связь со сталью. Его модуль Юнга близок к модулю стали, что снижает концентрацию напряжений на границе раздела. В качестве промежуточного слоя, обеспечивающего повышение трещиностойкости покрытия, используется многоэлементный нитрид (Ti,Mo)N, характеризующийся оптимальным сочетанием высокой твердости, модуля упругости и поверхностной энергии.

Высокий уровень остаточных сжимающих напряжений в этом слое создает благоприятное поле, противодействующее раскрытию трещин, а его повышенная по сравнению с карбонитридами пластичность снижает риск хрупкого разрушения. Верхним слоем выбран нитрид молибдена MoN, который уступает TiN по твердости, но превосходит его по химической инертности к расплавам цветных металлов и характеризуется более низким коэффициентом трения, что критически важно в процессах холодной высадки и штамповки.

Предложенная структура TiCN – (Ti,Mo)N – MoN не противоречит модели «мягкий – твердый – мягкий», поскольку нижний и верхний слои действительно имеют меньшую твердость по сравнению с промежуточным. Важно отметить, что толщина каждого слоя может варьироваться в зависимости от конкретного процесса: для оснастки, работающей в условиях интенсивного абразивного износа, целесообразно увеличивать долю твердого промежуточного слоя, тогда как при доминировании термоциклирования следует усиливать верхний теплозащитный слой.

Для количественной оценки трещиностойкости различных составов покрытий были выполнены расчеты перемещения берегов трещины в направлении, перпендикулярном ее росту, с использованием упругой модели и экспериментально определенных значений модуля Юнга.

На рис. 2 представлены графики перемещения для пяти исследованных покрытий: 1 – TiN; 2 – MoN; 3 – TiCN; 4 – MoCN; 5 – (Ti,Mo)N).

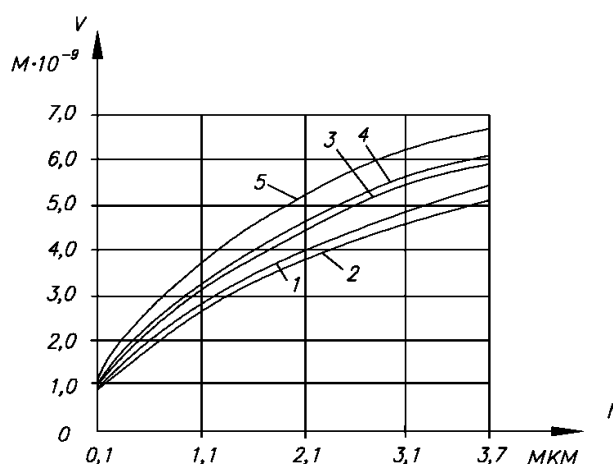


Рис. 2

Анализ полученных зависимостей показывает, что наименьшее раскрытие трещины при одинаковом уровне нагружения характерно для покрытия (Ti,Mo)N (рис. 2, кривая 5), тогда как максимальное – для одноэлементных нитридов TiN, MoN. Это свидетельствует о том, что многоэлементный нитрид титана и молибдена характеризуется повышенной сопротивляемостью росту трещин, что согласуется с его высокими значениями поверхностной энергии и критического коэффициента интенсивности напряжений. Промежуточное положение занимают TiCN и MoCN. Несмотря на высокую твердость, их способность препятствовать распространению трещин ниже по сравнению с покрытием (Ti,Mo)N, что обусловлено более высокой хрупкостью.

Дополнительно проведенное конечно-элементное моделирование процесса литья под давлением цинкового сплава ЦАМ 4-1 в оснастку с традиционным азотированным слоем и предлагаемым многослойным PVD-покрытием подтвердило эффективность разработанной композиции. В базовом варианте максимальные эквивалентные напряжения на формообразующей поверхности достигали 450 МПа для стали 40Х и 430 МПа для стали 4Х5МФС, а температура поверхности в момент заливки расплава поднималась до 320–340 °С. Применение покрытия TiCN – (Ti,Mo)N – MoN толщиной 6 мкм позволило снизить пиковые напряжения на 10–12 % и температуру контакта на 8–10 °С. Важно, что разница между сталями 40Х и 4Х5МФС в варианте с покрытием практически нивелировалась, что указывает на доминирующую роль покрытия в формировании теплового и напряженного состояния поверхности независимо от материала подложки.

Таким образом, предложенная трехслойная композиция TiCN – (Ti,Mo)N – MoN сочетает высокие показатели трещиностойкости, подтвержденные расчетами раскрытия трещины, со снижением контактных напряжений и температур в реальных условиях эксплуатации, что позволяет рассматривать ее как универсальное решение для повышения ресурса формообразующей оснастки в широком спектре заготовительных технологий.

Для верификации разработанных теоретических положений и результатов конечно-элементного моделирования были проведены натурные сравнительные испытания экспериментальной оснастки в условиях действующего литейного производства ООО «Сатурн» (Набережные Челны).

Испытания выполнялись на восьмиместной пресс-форме литья под давлением цинкового сплава ЦАМ 4-1. Конструкция экспериментального блока позволяла одновременно устанавливать формообразую-

щие вставки из стали 4Х5МФС с различными вариантами защитных PVD-слоев (базовые однослойные TiN, MoN, карбонитридные TiCN и разработанную трехслойную композицию TiCN – (Ti,Mo)N – MoN). Это обеспечило строго идентичные термомеханические, гидродинамические и временные условия нагружения для всех исследуемых составов в рамках единого технологического цикла.

Наработка экспериментального блока на момент проведения промежуточного контроля составила 6000–7000 циклов заливки расплава.

Визуальный и макроструктурный анализ состояния рабочих поверхностей показал следующее.

На вставках с базовым однослойным покрытием TiN (характерный золотистый цвет, формообразующее гнездо № 4 на рис. 3) при наработке ближе к 7000 циклов зафиксированы локальные зоны изменения оптических свойств, свидетельствующие об интенсивном высокотемпературном окислении и начале адгезионного налипания цветного сплава на радиусных переходах.

На образцах с карбонитридными слоями (формообразующее гнездо № 2 на рис. 3) обнаружены единичные микросколы на острых кромках оформляющих элементов, вызванные хрупкостью материала при циклических ударных нагрузках.

Максимальную триботехническую стабильность и сплошность продемонстрировала вставка с предложенной трехслойной архитектурой TiCN – (Ti,Mo)N – MoN (формообразующие гнезда № 1, 3 на рис. 3). На ее рабочей поверхности во всем исследованном диапазоне наработки (до 7000 циклов) полностью отсутствуют следы макроскопического трещинообразования (сетки разгара) и схватывания с заливаемым материалом, что экспериментально подтверждает теоретические выводы об ограничении раскрытия трещин за счет релаксации напряжений на внутренних границах раздела сред.



Рис. 3

В результате анализа условий эксплуатации технологической оснастки заготовительных производств установлено, что, несмотря на различие доминирующих факторов, общим механизмом разрушения является усталостное трещинообразование, что позволяет применять единые подходы к конструированию защитных покрытий. Сформулированы ключевые требования к таким покрытиям: снижение температуры контакта, создание высоких остаточных сжимающих напряжений, обеспечение адгезионной прочности и замедление роста трещин как в самом покрытии, так и в материале подложки.

Экспериментально определены физико-механические характеристики однослойных PVD-покрытий на основе нитридов и карбонитридов титана и молибдена. Показано, что марка стали-подложки и толщина покрытия в диапазоне 3...8 мкм не оказывают значимого влияния на модуль Юнга и микротвердость, тогда как химический состав является определяющим фактором. Наибольшие значения модуля Юнга и микротвердости зафиксированы для многоэлементного нитрида (Ti,Mo)N, что коррелирует с его повышенной поверхностной энергией разрушения и критическим коэффициентом интенсивности напряжений.

На основе теории распространения трещин в слоистых средах обоснована архитектура трехслойного покрытия по схеме «мягкий – твердый – мягкий», обеспечивающая эффективное торможение

трещин за счет возникновения сдвиговых и растягивающих напряжений на границах раздела слоев. Предложена и оптимизирована композиция $\text{TiCN} - (\text{Ti}, \text{Mo})\text{N} - \text{MoN}$, в которой нижний слой TiCN отвечает за адгезию и пластичность, промежуточный слой $(\text{Ti}, \text{Mo})\text{N}$ выступает основным барьером для роста трещин благодаря высоким прочностным характеристикам и уровню сжимающих напряжений, а верхний слой MoN обеспечивает снижение трения и химическую инертность к контактирующим материалам.

Компьютерное моделирование показало, что покрытие $(\text{Ti}, \text{Mo})\text{N}$ характеризуется наименьшим раскрытием трещины среди исследованных составов, что подтверждает его высокую трещиностойкость. Дополнительное конечно-элементное моделирование для условий литья под давлением подтвердило, что применение трехслойной композиции $\text{TiCN} - (\text{Ti}, \text{Mo})\text{N} - \text{MoN}$ позволяет снизить эквивалентные напряжения на 10–12 % и температуру контакта на 8–10 °С по сравнению с традиционным азотированием.

Опытно-промышленными испытаниями экспериментального блока многоместной пресс-формы в условиях действующего производства ООО «Сатурн» полностью подтверждена высокая эффективность разработанного защитного PVD-покрытия. Установлено, что в интервале эксплуатационной наработки в количестве 6000–7000 циклов литья цинкового сплава ЦАМ 4-1 на рабочей поверхности предложенной трехслойной композиции отсутствуют следы макроскопического трещинообразования (сетки разгара) и адгезионного налипания расплава. В то же время на вставках с базовым однослойным покрытием TiN зафиксированы выраженные локальные зоны износа и высокотемпературного окисления на радиусных переходах.

Полученные закономерности носят общий характер и могут быть распространены на процессы горячей штамповки, холодной высадки и прессования, что открывает перспективы создания универсальных покрытий для широкой номенклатуры заготовительного инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гавариев Р.В. и др. Лазерное упрочнение штампов в условиях крупного машиностроительного предприятия // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2021. № 2. С. 26–30.
2. Матюнин В.М. и др. Определение и сравнение микротвердости упрочняющих покрытий // Технология металлов. 2018. № 11. С. 30–32.
3. Tabakov V.P., Chikhranov A.V. Selecting the Composition of Wear-Resistant Coatings // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38. № 2. С. 105–109.
4. Казанцев В.В., Васильев А.С. Исследование методов и средств создания многопараметрических стандартных образцов состава и свойств покрытий // Стандартные образцы. 2014. № 1. С. 42–46.
5. Воронин Н.А. Методика оценки адгезионной прочности тонких напряженных покрытий // Вестник машиностроения. 2025. № 8. С. 644–649.
6. Пачурин Г.В. и др. Влияние вида и режима покрытия на механические свойства сталей // Черные металлы. 2019. № 6. С. 64–69.
7. Александров Д.А. Исследование износостойких покрытий на основе многокомпонентных нитридов титана // Труды ВИАМ. 2020. № 4–5 (88). С. 62–69.
8. Гавариев Р.В. и др. Повышение эксплуатационной стойкости металлических форм литья под давлением // Черные металлы. 2023. № 6. С. 10–16.
9. Суминов И.В., Хамид Чуад Х.Д. Износостойкость титановых сплавов: влияние поверхностных покрытий и методы анализа // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2024. № 4. С. 58–62.
10. Moskvitin G.V. et al. Estimation of the Cohesive Strength of Coatings Made of Powder Materials // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1281. Article № 012056.
11. Sakenova R.E. et al. The Study of Multilayer Coatings Based on $\text{MoN}(\text{MoZr})\text{ZrN}$ and $(\text{TiMo})\text{N}/(\text{TiMo})$, $(\text{CrZr})\text{N}/(\text{CrZr})$ Obtained by the Method of Vacuum-Arc Deposition // Вестник Карагандинского университета. 2019. № 2 (94). С. 14–21.
12. Гавариев Р.В., Савин И.А., Панкратов Д.Л. К вопросу определения свойств износостойких покрытий металлических форм // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2019. № 3. С. 81–84.

Поступила в редколлегию 23.03.26

IMPROVING THE SERVICE LIFE OF TOOLING FOR FORMING PROCESSES THROUGH THE APPLICATION OF MULTILAYER PVD COATINGS

R.V. Gavariev and K.N. Gavarieva

This study substantiates the effectiveness of multilayer PVD coatings for increasing the service life of forming tools. Based on an analysis of the physical and mechanical properties of coatings based on nitrides and carbonitrides of Ti, Mo, and their combinations, a three-layer "soft-hard-soft" architecture with the composition $\text{TiCN} - (\text{Ti,Mo})\text{N} - \text{MoN}$ is proposed. The simulation results confirm a reduction in contact temperatures and equivalent stresses on the working surface of the tooling, which makes it possible to consider the proposed coating as a universal solution for a wide range of forming technologies.

Keywords: PVD coatings, tooling, die casting, forging, cold heading, crack resistance, multilayer coatings, titanium nitride, molybdenum nitride, titanium carbonitride, computer simulation.

Гавариев Ренат Вильсорович – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: gavarievrv@mail.ru

Гавариева Ксения Николаевна – канд. техн. наук (Набережночелнинский филиал КФУ, Набережные Челны)

E-mail: gavarievakn@mail.ru

ОЦЕНКА ПРАКТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩЕМ ПРОИЗВОДСТВЕ НА ПРИМЕРЕ ПАО «КАМАЗ»

К.Н. Гавариева, Р.В. Гавариев

Рассматриваются теоретические основы и практические аспекты создания цифровых двойников в машиностроении, а также оценивается их практическая эффективность на примере высокотехнологичного предприятия ПАО «КамАЗ». Особое внимание уделено разграничению понятий цифровой модели, цифровой тени и цифрового двойника, а также переходу от пассивного мониторинга к активному управлению производственными процессами.

Ключевые слова: цифровой двойник, цифровой прототип, цифровой двойник процесса, цифровая модель, цифровая тень, цифровой двойник с обратной связью.

На современном этапе концепция Индустрии 4.0 получила широкое практическое применение: промышленные предприятия активно внедряют технологии цифровизации оборудования, разрабатывают цифровые двойники и используют методы искусственного интеллекта для управления производственными процессами [1, 2]. Вместе с тем внедрение цифровых двойников в российском машиностроении сопровождается рядом системных противоречий. С одной стороны, развитие технологий интернета вещей, промышленной сенсорики и искусственного интеллекта уже позволяет создавать динамические виртуальные представления оборудования и технологических процессов с точностью, достаточной для мониторинга, диагностики и прогнозирования отказов. С другой стороны, значительная часть реализованных решений по-прежнему ограничивается функциями наблюдения и визуализации данных, т. е. фактически представляет собой цифровую тень, а не полноценный цифровой двойник с обратной связью. Данное противоречие во многом связано с отсутствием единого понимания самого термина «цифровой двойник» в прикладном машиностроении. Под этим понятием на практике объединяются статические CAD-модели и системы мониторинга состояния оборудования, а также полноценные прогностические комплексы с элементами управления. Отсутствие четких критериев классификации затрудняет выбор архитектуры, адекватной конкретной производственной задаче, и снижает возможность объективной оценки экономической эффективности внедрения [3].

В связи с этим в настоящей статье рассматриваются три ключевых аспекта. Во-первых, уточняется понятие цифрового двойника применительно к машиностроению и проводится разграничение между цифровой моделью, цифровой тенью и полноценным цифровым двойником; во-вторых, анализируются типовые архитектурные решения, их компоненты и принципы организации обмена данными; в-третьих, оценивается практическая эффективность внедрения цифровых двойников на основе российских и зарубежных кейсов, включая опыт ПАО «КамАЗ» (Набережные Челны). Такой подход позволяет систематизировать накопленный опыт и сформулировать практические ориентиры для предприятий, находящихся на разных этапах цифровой трансформации.

Научная новизна статьи заключается в уточнении классификации уровней зрелости цифровых двойников применительно к механообрабатывающему производству, а также в описании архитектуры гибридной модели (физика + нейросетевая коррекция) с ориентацией на реальные ограничения промышленного оборудования. В отличие от большинства работ, акцент сделан не на абстрактной концепции, а на переходе от «цифровой тени» к управляющему двойнику в условиях серийного машиностроения.

Длительное время термин «цифровой двойник» использовался преимущественно в академической среде и не имел устоявшегося определения. В настоящее время сформировался общий подход, согласно которому цифровой двойник представляет собой динамическое виртуальное представление физического

объекта или процесса, обеспечивающее обмен данными в режиме, близком к реальному времени, и позволяющее не только наблюдать за состоянием оригинала, но и прогнозировать его поведение, а в ряде случаев – воздействовать на него через систему управления [4, 5].

На практике в машиностроении под цифровым двойником нередко понимают решения разной степени зрелости. В связи с этим целесообразно выделить три уровня интеграции физического и цифрового объектов: 1) цифровая модель; 2) цифровая тень; 3) цифровой двойник.

Цифровая модель представляет собой статическое отображение геометрии, характеристик и свойств объекта, например CAD-файл или расчетную модель. Обмен данными между физическим и цифровым объектом в данном случае осуществляется вручную или эпизодически, обратная связь от модели к объекту отсутствует.

Цифровая тень характеризуется автоматическим поступлением данных с физического объекта в виртуальную среду. Однако управляющее воздействие от модели к объекту либо отсутствует, либо реализуется через человека: оператор принимает решение на основе полученной информации. Именно этот класс решений в настоящее время наиболее распространен в российском машиностроении.

Полноценный цифровой двойник представляет собой интегрированную систему с двунаправленным обменом данными. В этом случае виртуальная модель не только отражает состояние физического объекта в реальном времени, но и на основе расчетов формирует корректирующие воздействия, которые передаются в систему управления. Именно этот уровень обеспечивает переход от пассивного мониторинга к активному управлению производственным процессом [6].

Переход между указанными уровнями имеет эволюционный характер и определяется не только техническими возможностями сенсорики, но и архитектурой системы принятия решений, требованиями к точности и допустимой задержкой в контуре управления.

Применительно к обрабатывающим производствам и технологическому оборудованию цифровой двойник имеет ряд особенностей, отличающих его от аналогичных решений в строительстве, энергетике или транспорте [7, 8].

1. Высокая размерность пространства состояний.

Станок с ЧПУ характеризуется множеством каналов данных (координаты осей, токи двигателей, вибрации, температура, усилия резания, акустическая эмиссия и другие параметры), что требует применения методов снижения размерности и выделения информативных признаков.

2. Жесткие требования к латентности.

В контуре управления с обратной связью задержка свыше нескольких миллисекунд делает невозможным использование цифрового двойника для активной компенсации быстрых процессов.

3. Нестационарность и износ.

В процессе эксплуатации динамические характеристики оборудования меняются, что требует постоянной адаптации моделей.

4. Многообразие объектов моделирования.

Цифровой двойник может создаваться для отдельного станка, производственной линии, цеха или конкретного технологического процесса, и на каждом уровне меняются требования к архитектуре и временным характеристикам [3].

В настоящей статье под цифровым двойником в машиностроении понимается система, реализующая как минимум уровень цифровой тени с элементами прогностической функции, а в перспективе обеспечивающая двунаправленное управление на основе гибридных моделей, объединяющих физическое знание и машинное обучение.

Разработка цифрового двойника технологического процесса требует перехода от компонентного описания оборудования к системному моделированию взаимодействия инструмента, заготовки, приспособления и среды. Методологически создание цифрового двойника технологического процесса базируется на синтезе трех научных подходов – системной инженерии, онтологического инжиниринга и теории идентификации систем (рис. 1).

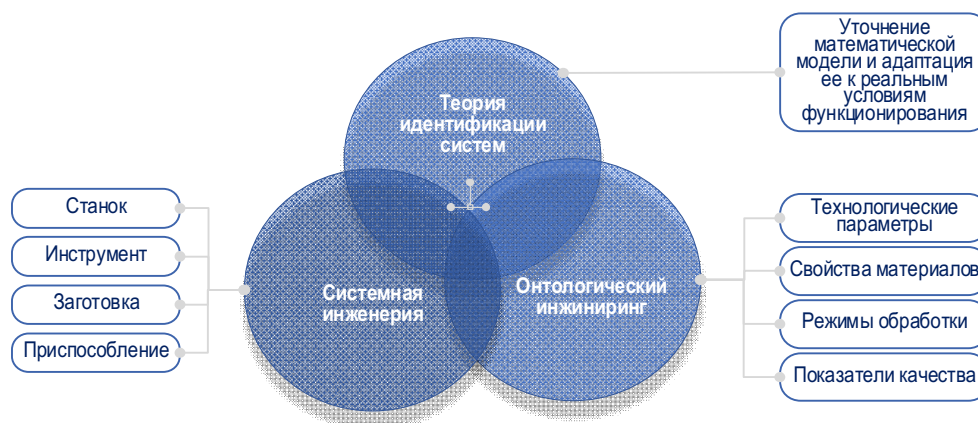


Рис. 1

Системная инженерия позволяет определить границы модели и состав ее элементов. Онтологический инжиниринг обеспечивает структурирование знаний о предметной области и формализацию связей между технологическими параметрами, свойствами материалов и показателями качества. Теория идентификации систем используется для построения математического описания на основе экспериментальных данных и его последующей адаптации к реальным условиям функционирования.

Интеграция этих подходов позволяет преодолеть основную проблему цифровых двойников в машиностроении – разрыв между физически точными, но вычислительно тяжелыми моделями и быстрыми, но недостаточно точными эмпирическими моделями. Практическим компромиссом становятся гибридные модели, в которых физические уравнения баланса сил, тепла и деформаций дополняются нейросетевыми алгоритмами, учитывающими неидеальности реального технологического процесса (износ инструмента, неоднородность материала и т. д.) [5, 9].

Цифровой двойник технологического процесса механической обработки детали имеет многоуровневую структуру, где все уровни тесно взаимосвязаны (таблица).

Этап	Содержание	Результат
Определение цели и требований	Выбор критического оборудования, формулировка KPI (снижение брака, рост ОЕЕ, прогнозирование отказов)	Техническое задание на цифровой двойник
Онтологический анализ процесса	Декомпозиция операций, выделение сущностей (станок, инструмент, заготовка, среда), параметров и связей	Информационная модель процесса
Выбор архитектуры и протоколов	Определение уровня зрелости (тень/двойник с обратной связью)	Архитектурная схема
Разработка гибридной модели	Синтез физических уравнений, редукция порядка (ROM)	Рабочая модель процесса
Интеграция и калибровка	Подключение к ЧПУ/датчикам, синхронизация временных рядов, настройка на исторических данных	Откалиброванный экземпляр
Валидация и итерационное развитие	Сравнение прогнозов с реальностью (тестовая деталь), оценка точности, переход от тени к управлению	Аттестованный цифровой двойник

Методология представлена в виде итеративного подхода, т. е. возврат на предыдущие этапы (например, перекалибровка модели при смене партии материала) является нормой, а не отклонением.

Гибридные модели, сочетающие физические уравнения с методами машинного обучения, играют ключевую роль в рамках цифрового двойника, что помогает учитывать и базовые закономерности обработки, и сложные факторы (износ инструмента, неравномерный припуск, неоднородность материала, тепловые деформации). При этом физическая составляющая модели отражает базовые зависимости сил, температур и деформаций, тогда как нейросетевой компонент осуществляет корректировку расхождений между расчетными и фактическими данными.

В условиях серийного и мелкосерийного производства, где параметры процесса изменяются от детали к детали, подобный подход становится особенно актуальным.

Цифровой двойник технологического процесса механической обработки характеризуется существенной практической ценностью и имеет следующие преимущества:

- повышение точности обработки за счет прецизионной корректировки технологических отклонений в режиме реального времени;
- обеспечение прогнозного контроля износа инструмента для предупреждения возможных аварийных ситуаций;
- сокращение сроков технологической подготовки производства за счет виртуальной отладки режимов обработки;
- снижение затрат на проведение испытаний и минимизация числа пробных запусков оборудования [1, 6].

В результате предприятие получает цифровую систему, реализующую замкнутый контур управления (непрерывный мониторинг параметров, предиктивный анализ, автоматическая оптимизация процессов).

Архитектура цифрового двойника реализуется как многоуровневая киберфизическая система с обратной связью (рис. 2).



Рис. 2

Несмотря на значительный потенциал, внедрение цифровых двойников в механической обработке ограничено высокой стоимостью датчиков и вычислительной инфраструктуры, необходимостью интеграции с существующими системами ЧПУ и MES, дефицитом качественных данных для обучения моделей, сложностью верификации и валидации результатов, а также обеспечением устойчивой работы модели в условиях изменяющихся производственных условий. В связи с этим на практике наиболее эффективен поэтапный подход к внедрению – от цифровой тени к предиктивному двойнику и далее к замкнутому контуру управления. Применение такого перехода наиболее целесообразно в тех случаях, когда стоимость внезапного простоя или брака критически высока.

Реализацию данного подхода в российских условиях демонстрирует высокотехнологичная компания ПАО «КамАЗ», которая в процессе цифровой трансформации последовательно внедряет системы мониторинга и предиктивной аналитики для технологического оборудования. В результате использование цифровых копий обрабатывающих центров и интеграция данных о состоянии оборудования в единую систему управления производством позволяют повысить прозрачность технологических процессов, сократить время реакции на возникающие отклонения, минимизировать риски финансовых потерь из-за простоев и брака. Однако необходимо отметить, что на данном этапе внедрение цифровой трансформации на ПАО «КамАЗ» соответствует уровню цифровой тени с возможностью прогнозирования, т. е. управляющие воздействия передаются оператору в виде рекомендаций без прямой передачи в систему ЧПУ. Тем не менее подобный пример представляет наибольший интерес для российских предприятий,

поскольку наглядно демонстрирует реалистичный, экономически оправданный первый шаг к цифровому двойнику.

Одним из ключевых элементов цифровизации ПАО «КамАЗ» является специализированное программное обеспечение от группы компаний «Р-ПРО». Интеграция данных решений позволяет перейти от разрозненного мониторинга к созданию полноценной среды цифрового инжиниринга на базе концепции рационального производства. В рамках механической обработки и сборки на заводах ПАО «КамАЗ» программные инструменты «Р-ПРО» (в частности, в связке с технологиями Visual Components) решают задачи офлайн-программирования роботизированных ячеек и сложного технологического оборудования. Это дает возможность формирования цифрового двойника не только отдельного процесса резания, но и всей производственной ячейки (рис. 3).

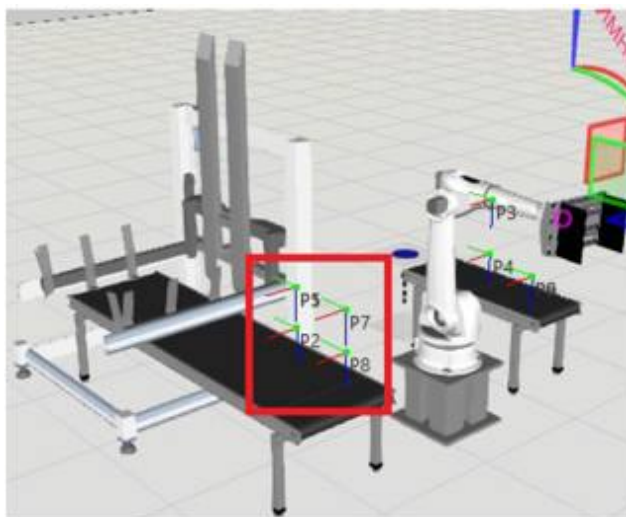


Рис. 3

В соответствии с данными, опубликованными в открытых источниках, внедрение систем мониторинга, оснащенных прогностическими модулями, дает ряд преимуществ – минимизацию внеплановых простоев технологического оборудования, оптимизацию затрат на ремонт оборудования за счет обслуживания по фактическому состоянию и повышение его коэффициента использования. Устойчивый эффект достигается комплексом мероприятий, которые включают адаптацию производственных регламентов, обучение персонала и интеграцию цифрового двойника с MES- и ERP-системой [4, 7].

Согласно открытым отчетам ПАО «КамАЗ» и информации, озвученной представителями компании на отраслевых конференциях (ЦИПР, «Индустрия 4.0»), внедрение систем прогнозной аналитики на обрабатывающем оборудовании позволило снизить внеплановые простои на 15–25 %, сократить затраты на ремонтное обслуживание на 10–20 % за счет обслуживания по фактическому состоянию, увеличить показатель ОЕЕ (общей эффективности оборудования) на 5–12 % в пилотных проектах [10].

Достигнутые результаты относятся к первому этапу цифровизации и не являются окончательными.

Еще одним примером внедрения цифровых двойников в автомобилестроении является обработка крупногабаритных и дорогостоящих деталей в авиационном двигателестроении. Применение цифрового двойника позволяет компенсировать погрешности, обусловленные упругими деформациями в системе «станок – приспособление – инструмент – деталь», что способствует снижению вероятности возникновения брака на финишных операциях.

На основе проведенного исследования получены следующие научные и практические результаты.

Уточнена классификация уровней зрелости цифровых двойников применительно к механообрабатывающему производству серийного типа. Четкое разграничение понятий «цифровая модель», «цифровая тень» и «управляющий цифровой двойник» позволило сформировать критерии для поэтапного перехода предприятий от пассивного мониторинга к контурам активного управления.

Предложена многоуровневая архитектура гибридной модели технологического процесса механической обработки, сочетающая фундаментальные физические уравнения баланса сил и деформаций с алгоритмами нейросетевой коррекции расхождений. Это позволило компенсировать вычислительную тяжесть классических моделей и адаптировать систему к нестационарным факторам (износ инструмента, неоднородность материала) в режиме реального времени.

Разработана шестиэтапная методология построения цифрового двойника процесса обработки деталей на станках с ЧПУ – от формулирования целевых КРП и онтологического анализа до итерационной валидации и калибровки модели на исторических данных.

Проведена комплексная оценка практической эффективности внедрения предиктивных систем на базе цифровой тени на примере механообрабатывающего оборудования ПАО «КамАЗ». Верификация данных показала, что предложенный поэтапный подход обеспечивает снижение внеплановых простоев оборудования на 15–25 %, сокращение ремонтных затрат на 10–20 % и прирост показателя ОЕЕ на 5–12 %

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звягин Л.С. Интеллектуальные информационно-измерительные системы на основе цифровых двойников для предиктивного обслуживания промышленного оборудования // *Computational Nanotechnology*. 2025. № 4. С. 51–60.
2. Смирнова Е.Д. Оценка влияния внедрения технологии цифровых двойников на процессы эксплуатации на объектах инженерной инфраструктуры: Сб. науч. тр. 14-го Конгресса молодых ученых, г. Санкт-Петербург, 7–11 апр. 2025. СПб.: Университет ИТМО, 2025. С. 142–144.
3. Гавариева К.Н. и др. Проектирование системы управления процессом энергосберегающей прецизионной штамповки зубчатых конических колес на основе многоагентных систем // *Энергосбережение. Наука и образование: Сб. докл. междунар. конф., г. Набережные Челны, 28 нояб. 2017. Набережные Челны: Издательско-полиграфический центр Набережночелнинского института К(П)ФУ, 2017. С. 549–553.*
4. Ярмухамедова Я.М. Влияние цифровизации и искусственного интеллекта на экономику нефтегазовой отрасли // *Молодой ученый*. 2025. № 27 (578). С. 91–94.
5. Швецов А.Н., Кудрявцев А.А. Предиктивная аналитика и искусственный интеллект на промышленном оборудовании // *Информационные технологии в проектировании и производстве*. 2024. № 2. С. 28–35.
6. Батов Д.В. Цифровые двойники в управлении производственными системами // *Вестник МГТУ «СТАНКИН»*. 2023. № 1. С. 45–52.
7. Кузнецова Е.С., Щеглов Д.К. Адаптивная система управления запасами предприятия на основе цифровых двойников и предиктивной аналитики // *Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова*. 2025. № 84. С. 56–63.
8. Каишковский В.В. и др. Применение цифрового двойника предприятия для оценки производственных показателей транспортной организации // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2024. № 4 (84). С. 80–90.
9. Wang J. et al. Deep Learning for Smart Manufacturing: Methods and Applications // *Journal of Manufacturing Systems*. 2022. Vol. 63. P. 346–366.
10. Макарова И.В. и др. Инновационные подходы обучения инженеров по сервису автомобилей с использованием иммерсивных технологий // *Профессорский журнал. Сер. Технические науки*. 2025. № 3 (10). С. 15–27.

Поступила в редколлегию 18.06.26

PRACTICAL EFFICIENCY EVALUATION AND METHODOLOGY FOR BUILDING DIGITAL TWINS IN MACHINING PRODUCTION BY THE EXAMPLE OF KAMAZ PJSC

K.N. Gavarieva and R.V. Gavariev

The article discusses the theoretical foundations and practical aspects of creating digital twins in mechanical engineering, and evaluates their practical effectiveness using the example of the high-tech enterprise KamAZ PJSC. Special attention is paid to distinguishing between

the concepts of a digital model, a digital shadow, and a digital twin, as well as to the transition from passive monitoring to active management of production processes.

Keywords: digital twin, digital prototype, digital process twin, digital model, digital shadow, and digital twin with feedback.

Гавариева Ксения Николаевна – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: gavarievakn@mail.ru

Гавариев Ренат Вильсорович – канд. техн. наук (Набережночелнинский филиал КФУ, Набережные Челны)

E-mail: gavarievr@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ШЛАМА СТОЧНЫХ ВОД НА ВЯЗКОСТНЫЕ СВОЙСТВА РАСПЛАВОВ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА

Э.Р. Галимов, Н.Я. Галимова, Э.Э. Шарафутдинова,
И.А. Кузьмина, Р.И. Галимов

С использованием метода капиллярной вискозиметрии проведено исследование влияния дисперсного наполнителя в виде шлама сточных вод на изменение вязкостных свойств расплавов жестких поливинилхлоридных композиций. Выявлено аномальное изменение эффективной вязкости композиций в области малых содержаний модифицирующей добавки. Показано, что обнаруженный эффект активного влияния наполнителя на изменение вязкостных свойств расплавов исследуемых композиций обусловлен гетерогенностью надмолекулярной структуры базового полимера, характером распределения в ней дисперсных частиц наполнителя и изменением подвижности структурных образований полимерной матрицы. Установлено влияние количества и дисперсности наполнителя, температуры и режимов деформирования на особенности изменения вязкостных свойств расплавов наполненных композиций.

Ключевые слова: поливинилхлорид, модификация, наполнитель, шлам сточных вод, дисперсность, надмолекулярная структура, эффективная вязкость, температура, напряжение сдвига, скорость сдвига.

Среди термопластичных полимеров поливинилхлорид (ПВХ) занимает одно из ведущих мест по объемам производства и масштабам практического применения. Это обусловлено его высокой способностью к физико-химической модификации за счет введения в состав полимерных композиций различных функциональных добавок – наполнителей, стабилизаторов, пластификаторов и других компонентов, – позволяющих обеспечивать требуемый уровень технологических и эксплуатационных характеристик материалов и изделий на его основе [1–3]. В связи с этим при разработке ПВХ-композиций важной задачей является поиск эффективных модифицирующих добавок преимущественно в виде возобновляемых промышленных отходов, имеющих большой сырьевой ресурс, низкую стоимость и доступность. Этим требованиям удовлетворяют многотоннажные побочные продукты, образующиеся на предприятиях лесопромышленного комплекса в виде лигнинсодержащих и других соединений [4]. В частности, в производстве целлюлозы сульфатным способом на различных этапах очистки сточных вод (варке, промывке, отбелке, сушке целлюлозы) образуется побочный продукт в виде шлама сточных вод, который затем подвергается механическому обезвоживанию. Полученный продукт имеет сложный групповой и химический состав и может использоваться в качестве наполнителя в полимерных композиционных материалах, в том числе и на основе ПВХ.

Для проведения исследований в работе использовали суспензионный поливинилхлорид марки СИ-64 (ТУ2212-012-46696320-2008). В качестве стабилизатора ПВХ-композиций применяли трехосновный сульфат свинца $2\text{PbO} \cdot \text{PbSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (ТУ 2492-004-10269039-05), содержание которого составляло пять массовых частей на 100 массовых частей полимера. Дисперсным наполнителем был выбран шлам сточных вод, который в соответствии с ГОСТ Р 56847-2015 является отходом в производстве целлюлозы и представляет собой порошкообразный продукт плотностью 1380 кг/м^3 . Состав шлама сточных вод, %: лигнин сульфатный 35–60; минеральные вещества 1–25; целлюлозное волокно 5–15; остальное – смолы, жиры и другие вещества. Функциональный состав, %: метоксильные группы 12–13; карбонильные группы 6,5–8,0; карбоксильные группы 2,5–5,0. Элементный состав, %: углерод 62–68; водород 5,6–6,7; кислород 22–31; сера 1,5–3,0. Содержание наполнителя в композициях составляло 5, 10, 20, 30 массовых частей на 100 массовых частей ПВХ. Для исследования влияния дисперсности наполнителя на изменение вязкостных свойств проводили его фракционирование с использованием ситового анализа (ГОСТ 8032-56). В результате получали фракции шлама сточных вод со следующими размерами частиц: менее 50, 50–63, 63–100, 100–160, 160–200 мкм. Компоненты, входящие в состав ПВХ-композиций, предварительно перемешивали в лабораторном смесителе при различных соотношениях. Образцы для проведения исследо-

ваний изготавливали в виде пленок толщиной 0,5–1,0 мм методом термопластикации смесей на лабораторных вальцах при температуре валков 150–160 °С в течение 5–7 мин в зависимости от состава исследуемых композиций.

Вязкостные свойства расплавов ПВХ-композиций определяли на капиллярном вискозиметре. Навеску пленок измельчали и закладывали в термостатируемую рабочую камеру вискозиметра и выдерживали в течение 2–3 мин под давлением 3–4 МПа при фиксированной температуре испытания до перехода материала в вязкотекучее состояние. В процессе испытания проводили измерения скорости истечения расплавов при различных нагрузках через капилляр длиной 10 мм и диаметром 0,8 мм. По скорости истечения расплавов композиций различного состава определяли объемный расход и рассчитывали величину скорости сдвига $\dot{\gamma}$, а по нагрузке испытания определяли напряжения сдвига τ . Вязкость расплавов композиций определяли как коэффициент пропорциональности между напряжением и скоростью сдвига в интервале температур (170...190 °С) и строили ее концентрационные зависимости в двойных логарифмических координатах при различных температурах и режимах деформирования [5].

Для интерпретации результатов исследований вязкостных свойств модифицированных композиций использовали представление о морфологической гетерогенности матричного полимера [6, 7], согласно которой микрогетерогенная структура аморфного ПВХ рассматривается как совокупность глобулярных образований различных размеров, связанных проходными цепями. При введении дисперсных наполнителей в ПВХ-композиции происходит их равномерное распределение в микрогетерогенной структуре полимера, что приводит к изменению подвижности макромолекул и структурных образований в граничном (межфазном) слое [6]. Характер и интервалы изменения величины эффективной вязкости ПВХ-композиций от содержания наполнителя ($\lg \tau = 5,5; 5,7$ Па) показан на рис. 1.

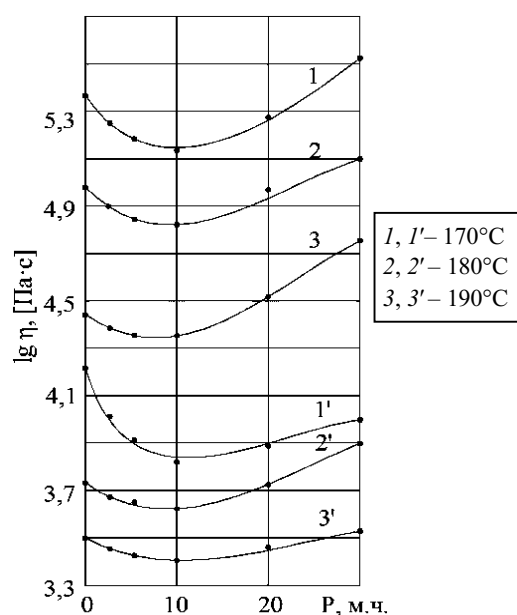


Рис. 1

Как видно (см. рис. 1), изменение величины вязкости носит экстремальный характер, причем интервал изменения зависит от температуры и режима деформирования (напряжения сдвига). Введение небольшого количества дисперсного наполнителя (до 10 массовых частей) приводит к аномальному понижению величины вязкости, а при дальнейшем увеличении содержания наполнителя (до 30 массовых частей) наблюдается монотонное увеличение этой характеристики во всем охваченном экспериментом диапазоне температур и режимов деформирования. С повышением температуры от 170 до 190 °С эффект снижения вязкости постепенно уменьшается. Следует отметить, что по мере увеличения напряжения сдвига при температуре 160 °С (рис. 1, кривые 1, 1') наблюдается увеличение эффекта резкого снижения величины η , а при повышенных температурах наблюдается противоположная картина, т. е. увеличение

сдвигового деформирования приводит к меньшему снижению η в области небольших содержаний наполнителя. Из представленных данных также видно, что при повышении величины сдвигового деформирования в области содержания шлама сточных вод выше 10 массовых частей наблюдается меньшее увеличение величины η во всем охваченном диапазоне изменения величины τ . Наблюдаемый эффект аномального изменения вязкости расплавов можно объяснить современными представлениями о гетерогенной глобулярной структуре ПВХ [6]. Согласно этим представлениям при введении небольшого количества наполнителя в гетерогенную структуру полимера происходит его равномерное распределение по всему объему полимера. При распределении наполнителя в межструктурных областях полимера происходит частичный разрыв связей между структурными образованиями, что приводит к увеличению их взаимного перемещения в направлении сдвигового деформирования. Основываясь на данных предположениях, можно объяснить возрастание эффективной вязкости расплавов ПВХ-композиций в области больших содержаний наполнителя. Различный характер изменения вязкости композиций в области малых содержаний шлама сточных вод при низких и повышенных температурах по мере увеличения интенсивности деформирования объясняется, по-видимому, тем, что при более низких температурах (170 °С) в расплаве сохраняются сильно развитые гетерогенные структурные образования, характеризующиеся невысокой подвижностью. Увеличение интенсивности сдвигового деформирования обуславливает возрастание подвижности единиц течения в направлении деформирования расплава вследствие разрыва проходных цепей, связывающих структурные образования полимера. С повышением температуры до 190 °С возрастает подвижность структурных фрагментов полимера, происходит разрыв связей между ними, в связи с чем уменьшается эффект снижения вязкости расплавов композиций.

Одним из важнейших параметров дисперсных наполнителей, определяющих их влияние на изменение вязкостных свойств расплавов полимеров, а также эффективность их модифицирующего действия, является дисперсность [7].

Зависимость вязкостных свойств расплавов ПВХ-композиций от дисперсности шлама сточных вод ($\lg \tau = 5,5$ Па) представлена на рис. 2.

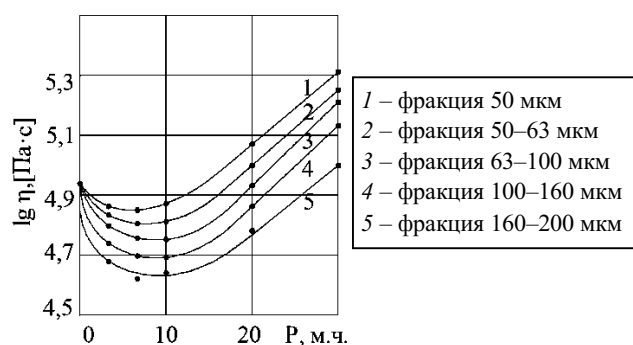


Рис. 2

Как видно (см. рис. 2), с увеличением размера частиц наполнителя наблюдается усиление эффекта снижения вязкости, причем минимальное значение вязкости достигается при больших содержаниях наполнителя.

Дальнейшее увеличение концентрации ведет к постепенному возрастанию величины η композиций, причем к менее резкому при введении наполнителя с большим размером частиц. Наблюдаемое увеличение эффекта аномального снижения вязкости расплавов с увеличением размера частиц и смещение концентрационного положения минимума вправо объясняется тем, что более крупные частицы наполнителя образуют менее прочную коагуляционную структуру и при больших его концентрациях. При введении дисперсного наполнителя с меньшим размером частиц минимум достигается при более малых содержаниях шлама сточных вод, так как возможно образование прочной коагуляционной структуры при меньших количествах наполнителя.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что характер и интервалы изменения вязкостных свойств расплавов ПВХ-композиций при различных степенях наполнения определяются температурой, режимами деформирования, дисперсностью наполнителя, склонностью частиц к образованию пространственных структур, уровнем межфазного взаимодействия на границе раздела полимер – наполнитель, приводящего к изменению подвижности структурных образований полимера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Огрель Л.Д.* Российский рынок ПВХ: состояние и перспективы развития // Полимерные материалы. 2026. № 2 (321). С. 38–41.
2. Руководство по разработке композиций на основе ПВХ / Под ред. Ф. Гроссмана. СПб.: Научные основы и технологии, 2009. 608 с.
3. *Шиллер М.* Добавки к ПВХ. Состав, свойства, применение. СПб.: Профессия, 2010. 1144 с.
4. *Нененин Ю.Н.* Технология целлюлозы. М.: Лесная промышленность, 1990. Т. 2. 600 с.
5. *Виноградов Г.В., Прозоровская Н.В.* Исследование расплавов полимеров на капиллярном вискозиметре постоянных давлений // Пластические массы. 1964. № 5. С. 50–57.
6. *Гузев В.В.* Структура и свойства наполненного поливинилхлорида. СПб.: Научные основы и технологии, 2012. 284 с.
7. *Галимов Э.Р.* Композиционные материалы на основе поливинилхлорида. Казань: Казан. гос. техн. ун-т, 1995. 184 с.

Поступила в редколлегию 1.06.26

INFLUENCE OF WASTEWATER SLUDGE ON THE VISCOSITY PROPERTIES OF POLYVINYL CHLORIDE MELTS

**E.R. Galimov, N.Ya. Galimova, E.E. Sharafutdinova,
I.A. Kuzmina, and R.I. Galimov**

Using the capillary viscometry method, the effect of a dispersed filler in the form of wastewater sludge on the viscosity properties of rigid polyvinyl chloride compositions was studied. An abnormal change in the effective viscosity of the compositions was detected in the region of low content of the modifying additive. It has been shown that the observed effect of the filler's active influence on the change in the viscous properties of the studied compositions is due to the heterogeneity of the base polymer's supramolecular structure, the distribution of filler particles, and the change in the mobility of the polymer matrix's structural formations. The influence of the filler quantity and dispersion, temperature, and deformation modes on the changes in the viscous properties of filled compositions has been established.

Keywords: polyvinyl chloride, modification, filler, wastewater sludge, dispersion, supramolecular structure, effective viscosity, temperature, shear stress, shear rate.

Галимов Энгель Рафикович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: kstu-material@mail.ru

Галимова Назирия Яхиевна – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: kstu-material@mail.ru

Шарафутдинова Эльмира Энгелевна – канд. психол. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: elechkaneo@yandex.ru

Кузьмина Ирина Александровна – канд. физ.-мат. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: iranina@mail.ru

Галимов Рафаэль Ильдарович – студент (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: rafaelchampion@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ АДЕКВАТНОСТИ РАЗРАБОТАННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА УВОДА ОСИ ОТВЕРСТИЯ ПРИ РАССВЕРЛИВАНИИ СВЕРЛОМ СО СМЕННЫМИ МНОГОГРАННЫМИ ПЛАСТИНАМИ

И.П. Дерябин, А.С. Токарев

Рассмотрен процесс формообразования отверстий сборным сверлом со сменными многогранными пластинами. Получена математическая модель расчета увода оси отверстия при обработке сверлом со сменными многогранными пластинами. Для проверки адекватности разработанной математической модели проведены экспериментальные исследования на различных материалах при одинаковых режимах резания. Экспериментальные исследования проводились по рекомендуемым режимам резания из справочника технолога и с использованием разработанной математической модели.

Ключевые слова: сверло, сверло со сменными многогранными пластинами, неперебиваемые пластины, увод оси отверстия, обработка отверстий, рассверливание.

В настоящее время все более широко используется инструмент со сменными многогранными пластинами [1–3]. Данный инструмент позволяет производить обработку отверстий с большей экономической эффективностью и меньшей трудоемкостью ввиду быстрой замены затупившейся пластины, в отличие от заточки или переточки монолитных сверл [4–8]. Кроме того, на одной и той же державке могут быть закреплены различные сменные пластины, что обеспечивает возможность использования одного и того же инструмента для обработки различных типов деталей, а также выполнения обработки различных элементов. Такой режущий инструмент позволяет повысить автоматизацию производства и снизить время технологической подготовки, что немаловажно в современных машиностроительных, приборостроительных и других производствах [4].

При использовании сборных лезвийных инструментов необходимо учитывать осевое смещение вершин режущих кромок пластин относительно друг друга, что подтверждено результатами исследования [9]. Осевое смещение пластин приводит к неравномерному распределению сил резания между режущими кромками, вследствие чего возрастает результирующая сила резания. Это, в свою очередь, способствует увеличению смещения оси отверстия при его обработке.

При применении сборного инструмента могут быть получены результаты, значительно отличающиеся от результатов применения монолитного инструмента [9, 10]. Для моделирования процесса формообразования при использовании указанного инструмента целесообразно применять методологию, основанную на построении схем срезаемых слоев припуска для каждого режущего лезвия в отдельности [9].

Рассмотрим процесс формообразования отверстий сборным сверлом (рис. 1, а) со сменными многогранными пластинами (рис. 1, б).

На схеме формообразования (см. рис. 1) срезаемых сечений припуска сверлом со сменными многогранными пластинами для каждого лезвия для варианта главных углов в плане 57–61° после предварительного сверления или в пилотном отверстии приведены следующие обозначения: Δ_1 – площадь сечения припуска, срезаемая первым лезвием; Δ_2 – площадь сечения припуска, срезаемая вторым лезвием.

Найдем площадь сечения припуска, срезаемого первым лезвием (рис. 2), представив сечение припуска в виде совокупности простых геометрических фигур:

$$\Delta_1 = S_{ABF} + S_{AFCE}; \quad (1)$$

$$\Delta_1 = \left(\frac{1}{2} (AF \cdot BF) \right) + (DC \cdot AE) = \left(\frac{1}{2} (t \cos \varphi_2) (0,65S) \right) + \left(t ((S + \tau) \sin (180^\circ - \varphi_2)) \right). \quad (2)$$

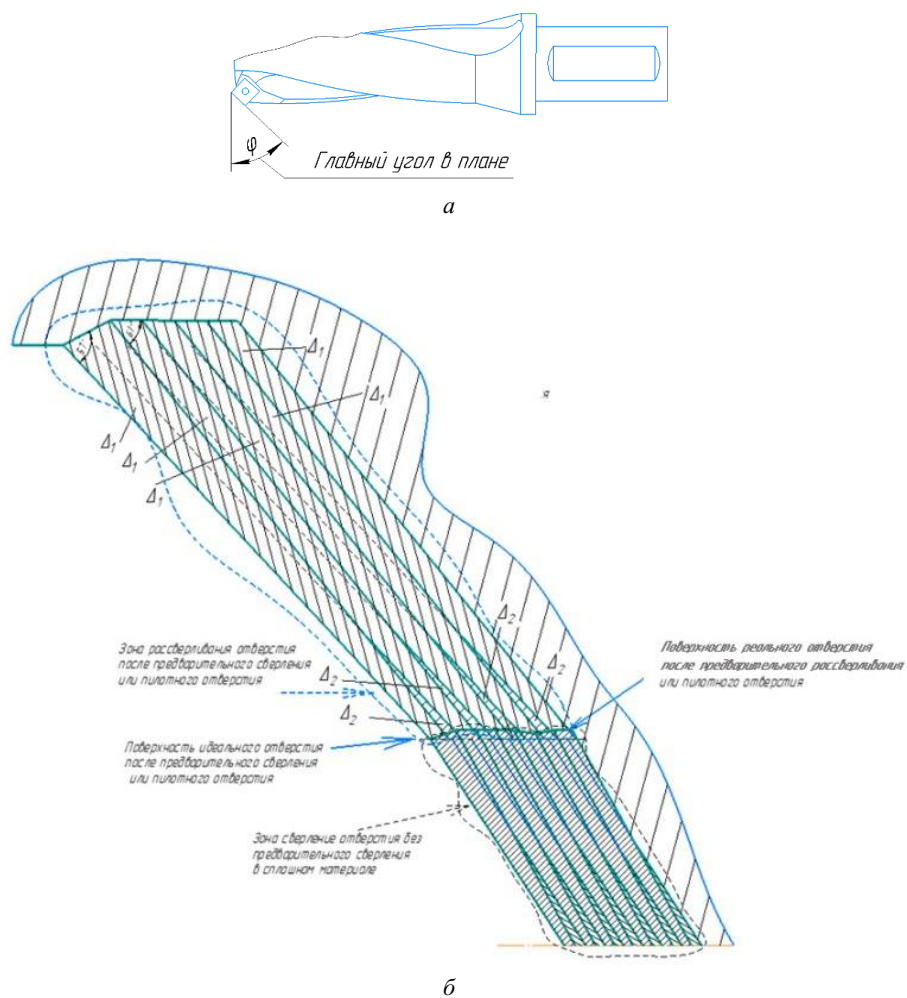


Рис. 1

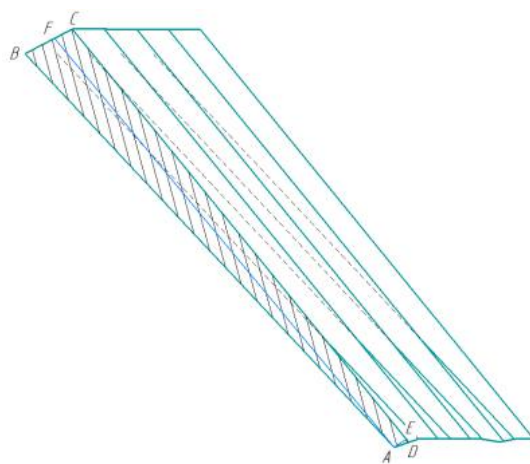


Рис. 2

Найдем площадь сечения припуска, срезаемого вторым лезвием (рис. 3):

$$\Delta_2 = S_{ABD} + S_{ABC}; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= \left(\frac{1}{2} (AB \cdot AD) \right) + \left(\frac{1}{2} (CD \cdot AD) \right) = \\ &= \left(\frac{1}{2} (0,7 \cdot t) (S (\sin 90^\circ)) \right) + \left(\frac{1}{2} (0,03t) ((S - \tau) (\cos 90^\circ)) \right). \end{aligned} \quad (4)$$

На рис. 3 показано разбиение площадей припусков, срезаемых сечением второго лезвия, на простые геометрические фигуры.

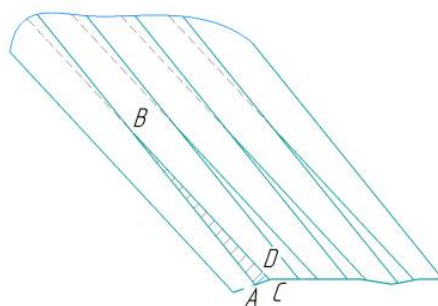


Рис. 3

В результате сводим полученные уравнения в систему:

$$\begin{cases} \Delta_1 = \left(\frac{1}{2} (AF \cdot BF) \right) + (DC \cdot AE) = \left(\frac{1}{2} (t \cos \varphi_2) (0,65S) \right) + \\ + \left(t((S + \tau) \sin(180^\circ - \varphi_2)) \right); \\ \Delta_2 = \left(\frac{1}{2} (AB \cdot AD) \right) + \left(\frac{1}{2} (CD \cdot AD) \right) = \left(\frac{1}{2} (0,7t) (S(\sin 90^\circ)) \right) + \\ + \left(\frac{1}{2} (0,03t) ((S - \tau)(\cos 90^\circ)) \right). \end{cases} \quad (5)$$

Получаем математическую модель расчета увода оси отверстия при обработке сверлом со сменными многогранными пластинами. Используя формулу (5) и полученные коэффициенты для сборного инструмента, получаем формулу для расчета жесткости сборного сверла со сменными многогранными пластинами:

$$j = \frac{3DE}{L^3} K_{\text{ж.сб.инстр}} \cdot \quad (6)$$

В развернутом виде формула расчета увода оси отверстия при обработке сборным сверлом со сменными многогранными пластинами с предварительным засверливанием или пилотным отверстием имеет следующий вид:

$$e = \frac{\left(\frac{1}{2} (t \cos \varphi_2) (0,65S) \right) + \left(t((S + \tau) \sin(180^\circ - \varphi_2)) \right) + \left(\frac{D - D_0}{2} + e_{\text{пн}} \sin(\Psi) \right) + \\ + (C_p K_\varphi K_\gamma K_\lambda) + \left(\frac{1}{2} (0,7t) (S(\sin 90^\circ)) \right) + \left(\frac{1}{2} (0,03t) ((S - \tau)(\cos 90^\circ)) \right) + \\ + \left(\frac{D - D_0}{2} + e_{\text{пн}} \sin(\Psi) \right) (C_p K_\varphi K_\gamma K_\lambda)}{\frac{3DE}{L^3} K_{\text{ж.сб.инстр}}} \cdot \frac{L_{\text{отв}}}{S_0}. \quad (7)$$

Для проверки адекватности разработанной математической модели были проведены экспериментальные исследования.

Эксперимент предусматривает выполнение обработки отверстия без использования разработанной математической модели, предназначенной для расчета увода оси отверстия, с последующим применением данной модели для корректировки режимов резания. Сравнение результатов обработки позволяет оценить эффективность предложенной методики по снижению увода оси отверстия.

Последовательность обработки включала следующие этапы.

1. Сверление отверстия диаметром 6 мм монолитным сверлом из быстрорежущей стали (HSS).

2. Рассверливание отверстия до диаметра 14 мм сверлом со сменными многогранными пластинами iTool SPGT140512-СМ CP2430.

Для проведения эксперимента были выбраны следующие параметры.

Материал заготовок – сталь 40 (10 заготовок диаметром 28 мм) и сталь 12Х18Н10Т (10 заготовок диаметром 28 мм).

Длина каждой заготовки составляла 80 мм. Данное значение было выбрано с учетом условия получения сквозного отверстия глубиной не менее 5D, что соответствует категории глубоких отверстий. Допустимый увод оси отверстия не должен превышать 0,15 мм при обработке стали 40 и 0,11 мм при обработке стали 12Х18Н10Т.

Обработка выполнялась на станке с ЧПУ DMG MORI DMU 50.

Для обработки заготовок были приняты следующие режимы резания.

Сталь 40:

- операция сверления: подача $S = 0,11$ мм/об, скорость резания $V = 40$ м/мин;

- операция рассверливания: подача $S = 0,18$ мм/об, скорость резания $V = 39$ м/мин.

Сталь 12Х18Н10Т:

- операция сверления: подача $S = 0,10$ мм/об, скорость резания $V = 32$ м/мин;

- операция рассверливания: подача $S = 0,12$ мм/об, скорость резания $V = 30$ м/мин.

В заготовках были получены предварительные отверстия диаметром 6 мм, которые затем были рассверлены до 14 мм. По результатам построена диаграмма (рис. 4).

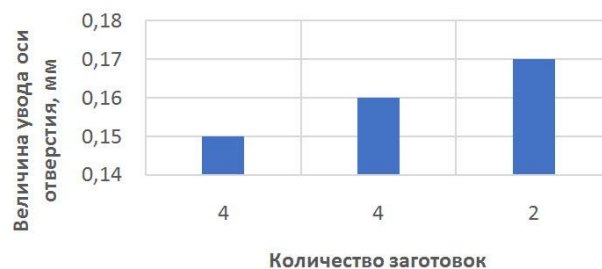


Рис. 4

Для получения данных по уводу оси произведены измерения на координатно-измерительной машине.

Сначала была произведена обработка отверстий с использованием режимов резания по данным из справочника технолога. Результаты измерения увода оси отверстия после рассверливания сверлом диаметром 14 мм в заготовке из материала сталь 40 с использованием режимов резания из справочника технолога представлены в табл. 1.

Таблица 1

Номер заготовки	Измеренный увод оси отверстия, мм	Допустимый увод оси отверстия, мм
1	0,16	0,15
2	0,15	0,15
3	0,15	0,15
4	0,16	0,15
5	0,17	0,15
6	0,16	0,15
7	0,17	0,15
8	0,15	0,15
9	0,15	0,15
10	0,16	0,15

С использованием разработанной математической модели перебором были подобраны оптимальные режимы резания. Данные, которые вводятся в разработанную программу для данного материала и режущего инструмента, следующие: амплитуда осевых колебаний $a = 0,1$ мм; количество осевых колебаний за один оборот детали или инструмента $n = 1$; номинальная подача, установленная на станке $S = 0,18$ мм/об; величина главного угла в плане первого лезвия $\varphi_1 = 45^\circ$; величина главного угла в плане второго лезвия $\varphi_2 = 44^\circ$; глубина резания $t = 4$ мм; погрешность предшествующего перехода $e_{\text{пп}} = 0,1$ мм; диаметр инструмента ($D = 14$ мм; коэффициенты влияния углов режущей части у инструмента $K_\varphi = 0,9$; $K_\lambda = 0,9$; $K_y = 1$; диаметр отверстия в заготовке $D_0 = 6$ мм; длина обрабатываемого отверстия $L_{\text{отв}} = 80$ мм; модуль упругости первого рода $E = 21000$ МПа; величина осевого смещения вершин режущих кромок пластин относительно друг друга $\tau = 0,08$ мм; рабочий вылет сверла $L = 100$ мм; коэффициент жесткости сборного инструмента $K_{\text{ж.сб.инстр}} = 0,65$; коэффициент для материала $C_p = 42$.

Затем была произведена обработка партии заготовок с учетом данных из разработанной математической модели расчета увода оси отверстия (табл. 2), и построена диаграмма (рис. 5).

Таблица 2

Номер заготовки	Измеренный увод оси отверстия, мм	Допустимый увод оси отверстия, мм
1	0,15	0,15
2	0,15	0,15
3	0,14	0,15
4	0,14	0,15
5	0,15	0,15
6	0,15	0,15
7	0,15	0,15
8	0,14	0,15
9	0,15	0,15
10	0,14	0,15

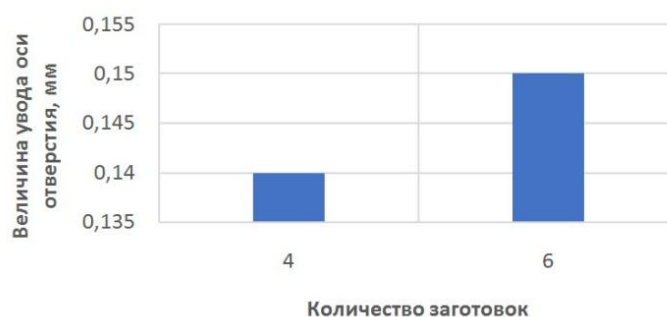


Рис. 5

Согласно результатам проведенных измерений установлено, что применение разработанной математической модели расчета увода оси отверстия при рассверливании отверстий сверлом со сменными многогранными пластинами обеспечивает повышение точности обработки и снижение величины увода оси отверстия за счет корректного выбора режимов резания.

Аналогичным образом была проведена обработка отверстий заготовок из материала 12X18H10T. Результаты измерений заготовок, обработанных по данным из справочника технолога, представлены на рис. 6.

Результаты измерений заготовок, обработанных по рекомендациям разработанной математической модели, представлены на рис. 7.

По полученным экспериментальным данным можно сделать вывод, что увод оси в партии заготовок снизился при применении разработанной математической модели.

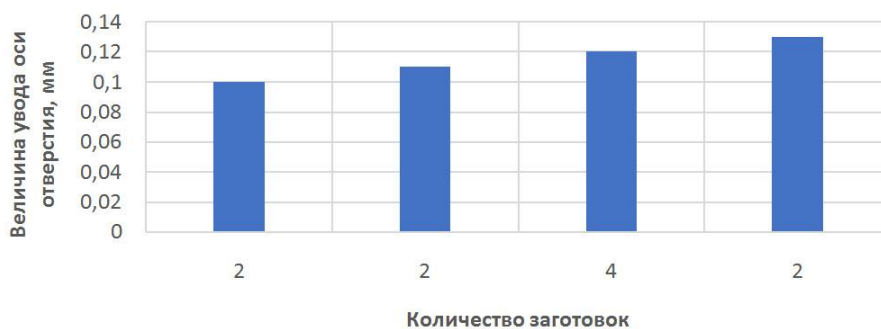


Рис. 6



Рис. 7

Таким образом, за счет применения разработанной математической модели расчета увода оси отверстия при рассверливании отверстий сборным сверлом со сменными многогранными пластинами можно добиться снижения количества бракованных изделий на предприятиях различных отраслей промышленности, уменьшить время, затрачиваемое на подготовку производства, и повысить экономическую эффективность разрабатываемых технологических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов А.В., Карачев А.В. Определение технологической наследственности при обработке отверстий в деталях газотурбинных двигателей // Вестник машиностроения. 2023. № 11. С. 37–42.
2. Зайцев А.В., Колупаев Н.А. Методика расчета отклонений оси инструмента при обработке отверстий малого диаметра // Главный механик. 2022. № 11. С. 24–30.
3. Гречишников В.А., Романов В.Б., Юнусов В.В. Комбинированные инструменты с пластинами, оснащенными СТМ для обработки ступенчатых отверстий // Известия МГТУ «МАМИ». 2024. № 1 (19). С. 88–92.
4. Григорьев С.Н., Маслов А.Р. Обработка резанием в автоматизированном производстве. М.: Машиностроение, 2009. 372 с.
5. Гусейнов Р.В., Рустамов М.Р. Совершенствование обработки отверстий небольшого диаметра // Вестник машиностроения. 2023. № 9. С. 50–52.
6. Игнатов В.В., Никулушкина О.М., Щербаков Е.Н. Пути повышения качества отверстий при сверлении // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. № 9. С. 402–406.
7. Петухов Ю.Е., Колесов Н.В. Численные модели режущего инструмента для обработки сложных поверхностей // Вестник машиностроения. 2024. № 5. С. 42–53.
8. Петухов Ю.Е., Колесов Н.В. Два типа компьютерных моделей режущего инструмента // СТИН. 2023. № 8. С. 23–26.
9. Токарев А.С., Дерябин И.П., Лопатин Б.А. Экспериментальное определение увода оси отверстий при обработке зенкером с МНП // Вестник ЮУрГУ. Сер. Машиностроение. 2022. № 1. С. 55–62.
10. Широков А.В., Шевырев Н.Д. Перспективы использования расточного станка для повышения точности отверстия в крупногабаритных деталях АО «ТЯЖМАШ» // Молодежная наука: вызовы и перспективы: Материалы 4-й Всерос. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых. Самара: Самарский государственный технический университет, филиал в г. Сызрани, 2021. № 1. С. 321–324.

Поступила в редколлегию 6.04.26

INVESTIGATION OF THE ADEQUACY OF THE DEVELOPED MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING THE DEFLECTION OF THE HOLE AXIS DURING DRILLING WITH A DRILL FROM THE REPLACEABLE POLYHEDRAL PLATES

I.P. Deryabin and A.S. Tokarev

The process of forming holes with a prefabricated drill with replaceable polyhedral plates is considered. A mathematical model for calculating the deflection of the hole axis during drilling with a drill from the NSR is obtained. To verify the adequacy of the developed mathematical model, experimental studies were conducted on various materials under the same cutting conditions. Experimental studies were carried out according to the recommended cutting modes from the technologist's handbook and then using the developed mathematical model.

Keywords: drill bit, drill bit with replaceable polyhedral plates, non-sharpened plates, hole axis deflection, hole processing, reaming.

Дерябин Игорь Петрович – д-р техн. наук (ЮУрГУ, Челябинск)
E-mail: derigp@gmail.com

Токарев Артем Сергеевич – канд. техн. наук (ТТИ НИЯУ МИФИ, Трехгорный)
E-mail: tokarev_a_s91@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ БАНКОВ И БАЗ ДАННЫХ О ТЕХНОЛОГИЯХ, ДЕТАЛЯХ, ОБОРУДОВАНИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА

В.В. Епифанов

Выполнен анализ применения автоматизированных банков и баз данных о деталях и технологическом оснащении в процессах технологической подготовки машиностроительного производства. Рассмотрены наиболее распространенные базы данных, используемые для выбора материалов, оборудования, в том числе в системах автоматизированного проектирования технологических процессов. Представлен впервые разработанный в Ульяновском регионе региональный банк данных о деталях, включающий сведения примерно о 200 тыс. деталей основного производства пятнадцати крупных предприятий. Показаны возможности его использования при организации межотраслевых производств, создании предметно-специализированных цехов и участков на основе групповых и типовых технологий, обосновании технических характеристик и структуры нового металло-режущего оборудования, выборе рационального оборудования из существующего типажа, а также при решении других задач технологической подготовки производства.

Ключевые слова: банк данных, база данных, технологическая подготовка производства.

Технологическая подготовка производства (ТПП) предусматривает проектирование эффективных технологических процессов и операций и выбор рационального технологического оснащения, включая технологическое оборудование, оснастку, инструмент. ТПП реализуется в зависимости от типа производства (единичное, серийное, массовое), имеющегося технологического оснащения, конструктивно-технологических характеристик обрабатываемых деталей.

В настоящее время в России накоплен большой опыт разработки автоматизированных систем управления производством (АСУП) и систем автоматизированного проектирования (САПР), позволяющих автоматизировать решение задач ТПП [1]. Этот опыт свидетельствует о том, что центральным звеном разработки АСУП и САПР является информационное обеспечение, включающее организацию, хранение и комплексное использование данных. Информационное обеспечение САПР технологических процессов состоит из баз данных технологических процессов, операций, технологического оборудования, оснастки, инструмента, нормирования операций и др., которые адаптируются к условиям конкретного предприятия. Это привело к созданию развитых средств управления данными, которые являются основой любой информационной системы, построенной на базе использования средств вычислительной техники. Разработки информационных систем для любой сферы применения связаны с созданием автоматизированных банков и баз данных.

Под автоматизированным банком данных (АБД) понимается организационно-техническая система, представляющая собой совокупность баз данных пользователей, технических и программных средств формирования и ведения этих баз и коллектива специалистов, обеспечивающих функционирование системы [2]. Основные задачи АБД заключаются в адекватном информационном отображении предметной области, а также хранении, обновлении и выдачи необходимых данных пользователям. Структурно АБД состоит из базы данных (БД), системы управления базой данных и прикладного программного обеспечения.

БД – это совокупность хранимых в памяти ЭВМ и специальным образом организованных взаимосвязанных данных, отображающих состояние предметной области. База данных также предназначена для обеспечения информационных потребностей определенных пользователей.

Практически на любом предприятии существуют собственные АБД и БД, содержащие методики расчетов, чертежи выпускаемых деталей, типовые технологические процессы и операции, технологическое оборудование, оснастку, инструменты, нормализованные детали, применяемые материалы, заготов-

ки. Например, на предприятиях авиастроительной отрасли достаточно широко при ТПП применяются различные АБД и БД спецификаций, материалов, оборудования, инструмента, деталей, технологических процессов. Они применяются в рамках систем автоматизированного проектирования. На самолетостроительном предприятии «Авиастар СП» (филиал ПАО «Ил») был создан классификатор и АБД деталей, изготавливаемых на заводе. Конструкторско-технологические характеристики детали кодируются, классифицируются и заносятся в документ – ведомость информации о детали.

Указанная информация предназначена для автоматизированного решения следующих задач ТПП: конструкторского поиска деталей-аналогов при проектировании новых изделий; поиска технологических процессов-аналогов для их последующей корректировки при проектировании новых техпроцессов; выбора и расчета количества оборудования, в том числе станков с ЧПУ; формирования укрупненного маршрута обработки групп деталей; укрупненного расчета трудоемкости обработки деталей и др.

В «ОКБ Сухого» для решения задач поддержки жизненного цикла изделия сформированы БД нормативно-справочной информации – материалов, покупных и стандартных изделий и т. п. Базы данных нормативно-справочной информации, изначально создаваемые для поддержки проектно-конструкторских работ, были использованы впоследствии при внедрении системы управления предприятием для решения задач информационной поддержки производственных, закупочных, учетных и других бизнес-процессов.

В Государственном космическом научно-производственном центре им. М.В. Хруничева (Госкорпорация «Роскосмос») создана и развивается типовая отраслевая база данных технологического назначения для автоматизированного формирования комплектов технологической документации по всем видам технологических переделов с использованием программных продуктов фирмы «Интермех». Функции, этапы и задачи ТПП реализуются типовыми подсистемами, каждой из которых необходима база технологических данных БД «Интермех». Установлен следующий состав типовых подсистем автоматизированной системы технологической подготовки производства: классификация и группирование объектов производства, обеспечение технологичности конструкции изделия, проектирование технологических процессов, проектирование средств технологического оснащения и др.

В мире широко распространены АБД по материалам, которые позволяют сократить время на выбор материала для разрабатываемых деталей (узлов, изделий). Первые АБД по материалам появились в США, Японии, ФРГ, Франции на рубеже 1970-х гг. Например, «Банк данных по свойствам сталей VDEh» (Институт материаловедения, ФРГ) представляет собой информационную систему, предназначенную для выбора марок сталей с учетом специфических условий эксплуатации и предоставляющую сведения об свойствах [2]. Банк данных содержит информацию о химическом составе материала, диаграммах состояния, физических свойствах сталей (плотность, модуль упругости, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и др.), механических свойствах (предел упругости при растяжении, сжатии и др.). Компанией Eagle Software Corporation (США) создан наиболее известный в настоящее время банк данных материалов – система «Атлас сталей мира», появившаяся на рынке в 1992 г. [3]. АБД содержит достаточно полную базу данных, в которую включена информация о химическом составе и физико-механических свойствах сталей. В программе реализовано два типа поиска: по известной марке стали и известному химическому составу. К ее недостаткам можно отнести устаревшие сведения о марках сталей, неточности по сталям производства других стран, неудобный поиск ввиду примитивного интерфейса программы. В России функционирует довольно много АБД по материалам. Среди них наиболее распространен банк данных «Winsteel», разработанный фирмой «КванторСфот» с участием государственного научного центра «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения». В системе содержатся сведения о материалах – наименование марки, состав, стандарты, область применения, аналоги, различные примечания [4]. Во Всероссийском научно-исследовательском центре по материалам и веществам есть несколько БД. Один из них – «Новые материалы», где занесены данные обо всех материалах, созданных в СССР и СНГ с 1983 г. БД включает данные о технических характеристиках, физических и потребительских свойствах, назначении, технологии, российских и зарубежных аналогах, разработчиках и изготовителях материала.

Следующим шагом в развитии электронных баз данных является создание различных экспертных систем, которые, основываясь на заложенных алгоритмах и требованиях к деталям, выбирают из АБД наилучшие для данных условий материалы, покрытия и другие виды подготовки поверхностей. В государственном научном центре «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» [3] создана экспертная система, функционирующая на базе АБД и предназначенная для выработки рекомендаций на основе имеющейся у пользователя информации. Недостатком такой экспертной системы является ее диалоговая форма, которая не позволяет решить поставленную задачу комплексно. Все указанные АБД по материалам позволяют выбрать рациональный материал для конкретной детали и учитывать его свойства в технологическом процессе.

Экспертные системы в двигателестроении авиационной техники направлены на автоматизацию процесса проектирования, его ускорение, удешевление и повышение качества. В настоящее время наибольшее распространение получили системы моделирования работы авиационных двигателей GasTurb, ГРАД, DVIGwp, АСТРА и др. [5], позволяющие оценить параметры потока, геометрию проточной части двигателя. На основе этих параметров можно перейти к детальному расчету узлов двигателя (термогазодинамическому, прочностному) и выбору материалов деталей двигателя, что позволяет еще на ранних стадиях проектирования оценивать такие важные интегральные параметры двигателя, как его масса, удельный вес и т. п. Основываясь на параметрах, рассчитанных системой имитационного моделирования работы авиационных ГТД (например, DVIGwp), экспертная система должна предложить пользователю рекомендации по использованию тех или иных материалов, покрытий, способов обработки и подготовки поверхности.

Достаточно обширный АБД, сформированный в Рейнско-Вестфальском техническом университете (Ахен, ФРГ), содержит БД о технологических процессах, оборудовании, инструменте. К нему имеют доступ многие промышленные предприятия и проектные организации.

В экспериментальном научно-исследовательском институте металлорежущих станков создана универсальная БД о деталях и технологии их обработки [6]. Она предназначена для решения комплекса задач по различным проблемам: формирование структуры выпуска металлорежущего оборудования, оптимально обеспечивающей потребности различных отраслей промышленности; прогнозирование и разработка новых технологий металлообработки в условиях различных типов производства; разработка САПР станков и станочных систем на основе унифицированных узлов; создание САПР маршрутной и операционной технологии и подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ и др.

В Ульяновском регионе впервые создан региональный банк данных (РБД) о деталях, включающий сведения примерно о 200 тыс. деталей основного производства пятнадцати крупных предприятий. Он предназначен для организации межотраслевых производств, создания предметно-специализированных цехов и участков на основе групповых и типовых технологий, выбора рациональных технологических процессов, обоснования технических характеристик и структур нового металлорежущего оборудования, выбора рационального металлорежущего оборудования из существующего типажа и других задач ТПП [7].

Основой создания РБД является информационная модель детали, позволяющая описать на информационном языке необходимые конструктивно-технологические и организационно-плановые характеристики детали. Формализацию характеристик деталей осуществляют, как правило, с помощью различных классификационных систем, которые представляют собой систематизированный свод наименований объектов классификации, классификационных группировок и их кодовых обозначений. При классификации характеристики объектов производства формализуются посредством соответствующих классификационных признаков в кодовые числа и (или) буквы, что позволяет перейти на единое обезличенное обозначение всех элементов базы данных (вне зависимости от их функционального назначения), систематизировать сведения о характеристиках деталей отнесением их к той или иной классификационной группировке и сделать информационную модель детали более компактной и удобной для обработки на ЭВМ.

Рассмотрим общую схему конструкторско-технологической классификации детали и представления сведений о ней в информационной модели детали. Каждая деталь D может быть охарактеризована и описана некоторой совокупностью (множеством) признаков:

$$D = \{P_1, \dots, P_i, \dots, P_n\},$$

где P_i – i -й признак детали; n – общее количество признаков.

Каждый из n признаков, в свою очередь, может быть представлен двумя частями: наименованием признака X_i и его числовым значением x_i . При кодировании какого-либо объекта по определенному признаку используют соответствующую ему классификационную систему (таблицу), примерами которой могут служить конструкторские и технологические классификаторы.

При формировании информационной модели детали требуется решить задачу создания оптимального набора классификационных признаков, являющихся наиболее информативными для проектирования технологических процессов. Эта задача относится к классу задач, связанных с оценкой необходимости некоторой совокупности признаков, и фактически сводится к проблеме выделения (отбора) этих признаков, так как всегда целесообразно сокращение их числа. Данную задачу целесообразно решить наложением множества $Y = (y_1, \dots, y_i)$ параметров технологического процесса, оцениваемых при его проектировании (например, тип производства, степень концентрации технологических операций, параметры оборудования, оснастки, инструмента и ряд др.) на множество классификационных признаков $X = (x_1, \dots, x_i)$ детали. Наложение множества Y на множество X математически можно представить с помощью отображения множеств [8].

Пусть имеем многозначное отображение v множества Y параметров технологического процесса во множество X классификационных признаков детали:

$$v: Y \rightarrow X. \quad (1)$$

При отображении v с каждым элементом y_i множества Y параметров технологического процесса сопоставляется один или несколько элементов x_i множества X классификационных признаков детали, которое в той или иной степени влияет на y_i .

Тогда образом $v(y_i)$ каждого параметра технологического процесса $y_i \in Y$ по подмножеству X будет подмножество классификационных признаков, сопоставляемых при отображении v элементу y_i :

$$v(y_i) = \{x_i\} \in X, \quad (2)$$

где $\{x_i\}$ – подмножество классификационных признаков, определяющих y_i (или являющихся наиболее информативными для y_i).

Область значений отображения v , или общий набор классификационных признаков X_1 , определим следующим образом:

$$X_1 = \left\{ \left(\bigcup_{n \in N} v(y_i) \right) \in X \right\} \subseteq X_{\text{кл}}. \quad (3)$$

Критерием сопоставления i -го классификационного признака i -му параметру технологического процесса при отображении v является степень его влияния (значимости) на i -й параметр технологического процесса. Задача выявления наиболее информативных классификационных признаков для конструкторской и технологической подготовки производства решена при создании РБД деталей, изготавливаемых на предприятиях Ульяновской области. В Ульяновском государственном техническом университете разработали информационную модель детали (рисунок) и на ее основе – методику кодирования деталей.

В информационной модели детали обезличенное кодовое обозначение по ГОСТ 2.201-80 формализует конструктивно-геометрические характеристики деталей [9]. Шестизначный конструкторский код детали определяет геометрию детали (тело вращения, корпусные, плоскостные и др.), форму и структуру поверхностей (цилиндрические, конические, гладкие, ступенчатые и др.).

Информационная карта (паспорт) детали										1. Код предприятия																																																	
										2. Регистрационный номер																																																	
3. Наименование детали																				4. Обозначение детали по ГОСТ 2.201-80																																							
5. Исполнение																				6. Обозначение детали по чертежу																																							
Габаритные размеры																				10. Масса, кг																																							
7. L, мм										8. B (Д), мм										9. H(S), мм																																							
11. Точность обработки										12. Шероховатость										13. Годовая программа, тыс. шт.										14. Станкочас										15. Материал																			
16. Вид заготовки										17. Метод основной обработки										18. Термообработка										19. Покрытие										20. Упрочнение										21. Площадь формования, см ²									

Технологические характеристики (габаритные размеры, точность, материал, заготовка и др.) и организационно-плановые характеристики (станкочасовое время обработки, годовая программа выпуска) в информационной модели детали представлены не в кодовом обозначении, а в истинных значениях характеристик с эскиза детали. В результате формируется код детали из 20 знаков. Это позволило уменьшить время кодирования и расширить техническую информативность признака.

Анализ РБД по геометрической форме деталей показал, что наиболее распространены (37,75 %) на предприятиях плоскостные детали и изогнутые из листов (класс 74 по Классификатору ЕСКД), которые наиболее характерны для авиастроительных и автомобильных предприятий. Также широко применяются детали типа тел вращения (36,8 %) (классы 71, 72 по Классификатору ЕСКД). Корпусные детали составляют 7,2 %.

Для формирования и использования РБД разработана автоматизированная система кодирования и классификации деталей машин (АСКК).

Основными задачами АСКК является кодирование деталей по их конструкторско-технологическим признакам, классификация деталей по конструкторско-технологическому подобию, поиск деталей по их конструкторско-технологическому коду для решения задач ТПП, выбор существующих конструкторских документов и технологического процесса их изготовления по коду детали для разработки новой конструкторско-технологической документации по аналоговому принципу, группирование деталей по конструкторско-технологическому подобию для разработки типовых и групповых технологических процессов с использованием ЭВМ, унификация и стандартизация деталей и технологических процессов их изготовления, обоснование технологических структур перспективного технологического оборудования на основе характеристик групп деталей, выбор рационального технологического оборудования из существующего типажа.

В подсистеме кодирования характеристик детали осуществляется кодирование на основе эскиза или чертежа детали. На первом этапе кодируются конструктивно-геометрические характеристики. Кодирование осуществляется постановкой кодов в последовательно выводимые на экран ЭВМ меню.

На втором этапе кодируются технологические и организационно-плановые характеристики детали в истинных значениях посредством ответов на вопросы (например, «Введите минимальную шероховатость поверхности R_a »). Ответ: «2,5»). Полный двадцатизначный код детали заносится в базу данных о деталях АСКК. Код детали дублируется соответствующим эскизом детали из базы данных эскизов.

В подсистеме обобщения характеристик деталей код детали автоматически в соответствии с алгоритмом относится к определенной классификационной группе.

В подсистеме проектирования на основе кодов детали и классификационной группы из БД выбираются аналоги чертежа детали и (или) технологического процесса. Из БД технологического оборудования выбирается рациональная модель станка.

В настоящее время целесообразно создание региональных и межрегиональных БД по технологиям, деталям, оборудованию, которые будут способствовать повышению эффективности ТПП, развитию меж-

отраслевых производств, созданию нового оборудования с технологическими возможностями, соответствующими наиболее широко распространенным группам деталей и условий производства.

Таким образом, создание АБД и БД на основе классификаторов, стандартов деталей, оборудования, оснастки и инструмента позволяет автоматизировать решение задач ТПП с применением АСУП, САПР, экспертных систем и повысить эффективность и производительность работы конструкторов и технологов в производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шинкевич А.И. Организация ресурсосберегающего производства в промышленности России и за рубежом // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2019. № 2. С. 52–58.
2. Кишалов А.Е. и др. Обзор и анализ существующих баз данных и экспертных систем принятия решения по выбору материала основных элементов конструкции // Молодой ученый. 2012. № 11 (46). С. 49–52.
3. Колосков М.М. и др. Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 2001. 672 с.
4. Информационные продукты ООО «МеталДата.Инфо» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.metaldata> (дата обращения: 25.02.26).
5. Ахмедзянов Д.А. Методы и средства имитационного моделирования работы авиационных ГТД с элементами систем управления и контроля // Альманах современной науки и образования. 2008. № 7 (14). С. 7–9.
6. Формирование универсальной базы данных о деталях и технологии их обработки: методические рекомендации. М.: ЭНИМС, 2002. 51 с.
7. Епифанов В.В. и др. О возможности организации межотраслевого производства на основе регионального банка данных о деталях // Стандарты и качество. 1989. № 4. С. 25–29.
8. Александров П.С. Введение в теорию множеств и общую топологию. М.: Наука, 1977. 367 с.
9. Классификатор ЕСКД. Классы 71, 72, 73, 74, 75, 76. Иллюстрированный определитель деталей. М.: Изд-во стандартов, 1988. 401 с.

Поступила в редколлегию 25.03.26

THE USE OF BANKS AND DATABASES ON TECHNOLOGIES, PARTS, AND EQUIPMENT IN THE TECHNOLOGICAL PRE-PRODUCTION

V.V. Epifanov

The article presents the use of automated banks and databases on the details of technological equipment in the technological preparation of machine-building production. Widely used banks and databases for the selection of materials and equipment, including in CAD systems, are considered. A regional data bank on parts has been proposed for the first time in the Ulyanovsk region, which includes parts of the main production of 15 large enterprises, containing about 200 thousand parts. It is intended for the organization of intersectoral productions, the creation of specialized workshops and sites based on group and standard technologies, the justification of the technical characteristics and structures of new metal-cutting equipment, the selection of rational metal-cutting equipment from the existing type and other tasks of the Chamber of Commerce and Industry.

Keywords: data bank, database, technological preparation.

Епифанов Вячеслав Викторович – д-р техн. наук (УлГТУ, Ульяновск)
E-mail: v.epifanov73@mail.ru

АВТОНОМНАЯ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНАЯ СТАНЦИЯ

Б.Р. Мубаракшин, В.Г. Тонконог

Рассмотрены перспективы развития автоматических газораспределительных станций нового поколения с использованием турбодетандерных установок для выработки электроэнергии за счет энергии перепада давления газа на редуцирующих узлах. Проанализированы проблемы эксплуатации традиционных газораспределительных станций, предложена модернизированная технологическая схема газораспределительной станции. Описаны конструктивные особенности, принципы работы турбодетандеров, интеграция с литий-ионными системами бесперебойного питания российского производства, а также применение адаптивных динамических моделей для предиктивной диагностики.

Ключевые слова: автоматическая газораспределительная станция, турбодетандер, автономное энергоснабжение, литий-ионные аккумуляторы, предиктивная диагностика.

Газораспределительные станции (ГРС) – ключевые объекты систем газоснабжения – обеспечивают понижение давления магистрального газа, его очистку, подогрев, коммерческий учет и одоризацию перед подачей потребителю [1, 2]. Традиционно энергетические потоки, связанные с дросселированием газа на редуцирующих устройствах, безвозвратно теряются, что снижает общую энергоэффективность газораспределительных систем [3]. Использование турбодетандерных агрегатов, устанавливаемых параллельно линиям редуцирования, позволяет преобразовывать энергию перепада давления в электрическую, что создает предпосылки для построения автономных автоматических ГРС [4, 5].

Существующие технические и организационные решения по ГРС Единой системы газоснабжения Российской Федерации во многом базируются на подходах, сформированных еще в XX веке, и за прошедший период претерпели лишь точечные изменения [1]. Исследования показывают, что значительная часть проблем эксплуатации ГРС связана с износом оборудования, утечками, нарушением температурно-гидравлических режимов, а также недостаточной автоматизацией и зависимостью от внешних источников электроснабжения [2, 6]. В условиях перехода к безлюдным технологиям и оптимизации жизненного цикла объектов актуальна разработка новых поколений автономных автоматических ГРС блочного и модульного исполнения [1, 5].

Актуальной и востребованной в настоящее время задачей является создание автономной ГРС, обеспечивающей выполнение полного комплекса функций (подготовка, редуцирование, учет и одоризация газа) при одновременной выработке электроэнергии для собственных нужд за счет использования турбодетандерных установок [6, 7]. Целью является снижение эксплуатационных затрат, повышение энергоэффективности и независимости ГРС от внешних электросетей, а также увеличение межремонтных интервалов за счет уменьшения количества избыточной арматуры, сварных и фланцевых соединений, применения оборудования с увеличенным периодом обслуживания, а также внедрения автоматизированных систем управления, контроля и прогнозирования событий [1, 5].

Одна из схем автоматической ГРС описана в патенте [7]. Отраженные в патенте решения направлены на существенное снижение капитальных и эксплуатационных затрат и увеличение межремонтных интервалов.

Схема автоматической ГРС представлена на рис. 1. Здесь: 1 – кран шаровой с дистанционно управляемым приводом; 2 – кран шаровой с ручным управлением; 3 – кран трехходовой с ручным управлением; 4 – фильтр; 5 – теплообменный аппарат; 6 – регулятор давления; 7 – регулятор давления с дистанционно управляемым приводом; 8 – клапан предохранительный; 9 – счетчик газа; 10 – насос подачи одоранта; 11 – блок одоризации.

С целью исключения избыточной арматуры, сварных и фланцевых соединений предусмотрены две единые технологические линии подготовки природного газа с фильтрами узлов очистки газа от механических примесей, теплообменниками узлов подогрева газа для предотвращения гидратообразования и

узлами редуцирования для снижения давления газа, при этом краны между этими узлами отсутствуют, а переключение между линиями осуществляется посредством шаровых кранов с дистанционно управляемым приводом на входе и выходе каждой линии по команде от системы автоматического управления ГРС, при этом система автоматического управления должна отслеживать наработку каждой технологической линии и обеспечивать равномерный износ оборудования. На каждой технологической линии предусмотрена возможность подключения турбодетандерной установки, использующей перепад давления для выработки электроэнергии и формирования полностью автономного энергобаланса станции. Отбор газа для турбодетандера осуществляется до узла редуцирования, а сброс газа после регулятора давления до узла коммерческого учета расхода газа. Следует отметить, что в предлагаемой схеме применяется исключительно оборудование российского производства в соответствии с политикой импортозамещения [7].

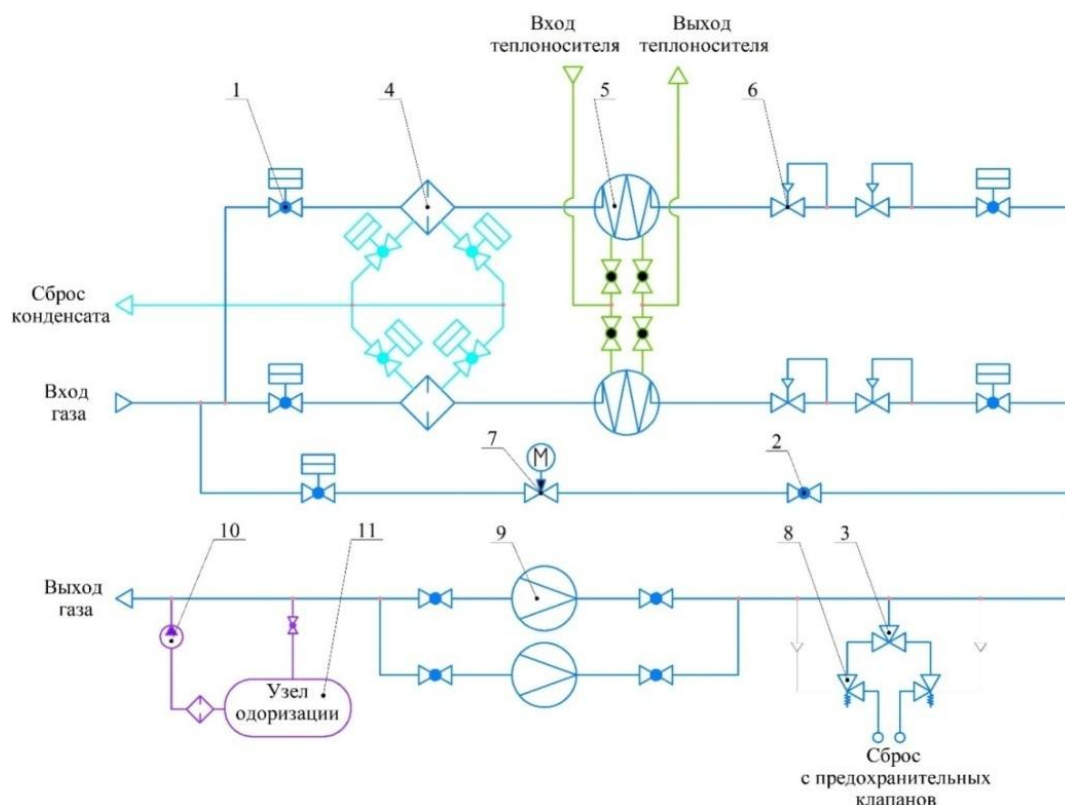


Рис. 1

Наряду со снижением количества эксплуатируемого оборудования, требующего периодического обслуживания, и повышения уровня автономности ГРС, важную роль также играет предиктивная диагностика и прогнозирование событий. В Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого занимаются проектом «Разработка и внедрение адаптивных динамических моделей для управления надежностью и проектирования элементов ГТС ПАО «Газпром», в рамках которого разработан программный комплекс, объединяющий взаимосвязанные слои адаптивных динамических моделей – газодинамический, тепловой, информационный, прочностной, ресурсный, энергетический, интегральный, экономический. Основной функционал комплекса включает предиктивное обслуживание оборудования, мониторинг и оптимизацию производственных процессов в реальном времени, оптимизацию режимов работы оборудования, виртуальное моделирование и тестирование элементов ГРС и всего объекта, обучение сотрудников на виртуальной модели, конструирование ГРС по заданным параметрам и определение достоверной стоимости полного жизненного цикла технологических систем и комплексов [8].

Данная схема построения технологических линий вошла в унифицированные проектные решения по газораспределительным станциям модульного исполнения в части реализации технологических блоков, каждый из которых может быть рассчитан на разную проектную производительность и установлен

на объект по мере увеличения текущей производительности ГРС. При этом такие узлы и системы, как узел переключения, емкость сбора конденсата, вспомогательные помещения, рассчитываются на проектную производительность всей станции и монтируются на первом этапе.

Модульные и блочные ГРС строятся по принципу заводской готовности, включающей блоки очистки, подогрева, редуцирования, учета и одоризации газа, размещенные в транспортируемых блок-боксах. Сочетание модульного исполнения с высоким уровнем автоматизации рассматривается как базовый подход к модернизации и развитию ГРС в стратегических документах и отраслевых исследованиях ПАО «Газпром».

Типовая конструктивная схема автономной ГРС включает узел переключения с запорной арматурой на входе и выходе автоматической ГРС, узел очистки, узел подогрева газа, блок редуцирования с турбодетандерными линиями, байпасную линию автономной ГРС, узел коммерческого учета и узел одоризации, а также блоки электроснабжения и автоматики. На каждой линии редуцирования в параллель с регулятором давления монтируется турбодетандер, где вместо дросселирования газ расширяется с совершением механической работы на валу турбины, связанной с электрическим генератором [6, 7].

Блок электроснабжения включает систему бесперебойного питания, аккумуляторные батареи, распределительный щит, тем самым обеспечивается полностью автономная работа КИПиА и всех систем автономной ГРС [5].

Схема автономной ГРС представлена на рис. 2. Здесь: 1 – кран шаровой с дистанционно управляемым приводом; 2 – кран шаровой с ручным управлением; 3 – кран трехходовой с ручным управлением; 4 – фильтр; 5 – теплообменный аппарат; 6 – регулятор давления; 7 – регулятор давления с дистанционно управляемым приводом; 8 – клапан предохранительный; 9 – счетчик газа; 10 – насос подачи одоранта; 11 – блок одоризации; 12 – турбодетандер.

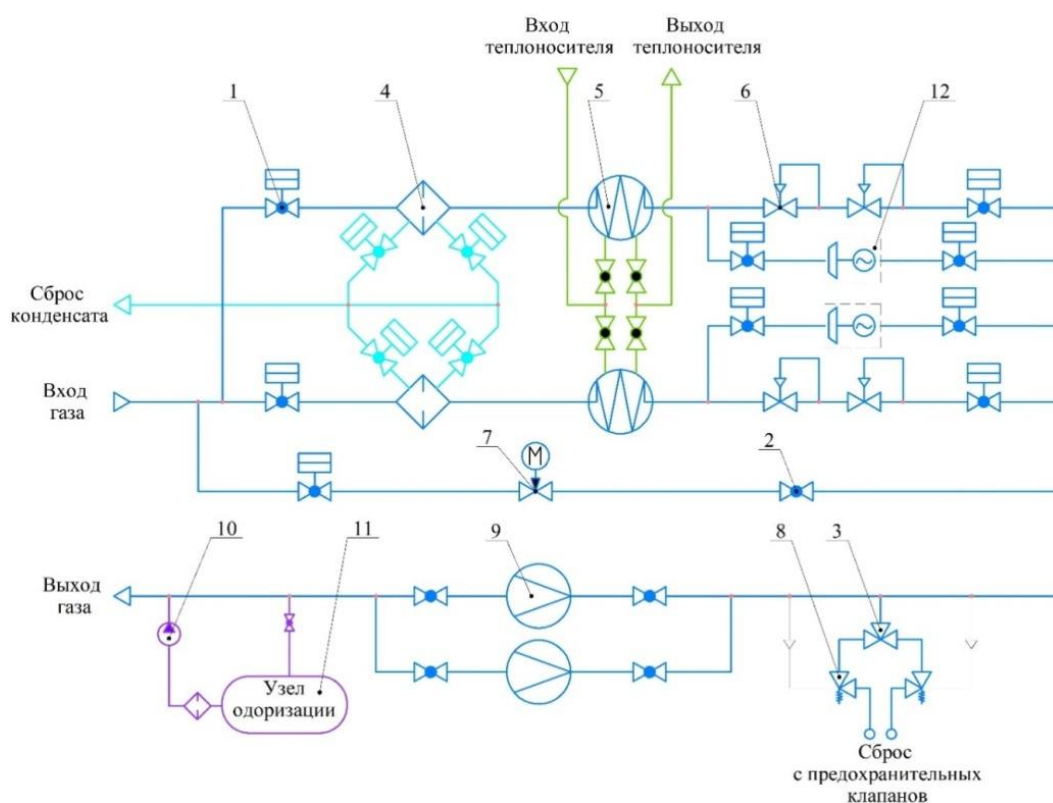


Рис. 2

Для выработки электроэнергии могут применяться классические турбодетандеры с привычной турбиной для расширения природного газа, струйные детандерные генераторы, а также вихревые детандерные генераторы. Преимуществом струйных детандерных генераторов является низкая зависимость от качества природного газа и наличия в нем механических примесей. Вихревые детандерные генераторы ха-

рактируются малым перепадом между выходным и входным давлением. Струйный детандерный генератор, разработанный ООО «НПП «Авиагаз-Союз+», успешно прошел первый этап приемочных испытаний и находится в опытно-промышленной эксплуатации на объекте ООО «Газпром трансгаз Казань».

При протекании природного газа через турбодетандер происходит адиабатическое расширение с понижением давления до требуемого уровня на выходе ГРС и одновременной выработкой механической энергии на валу турбины. С помощью синхронного или асинхронного генератора механическая энергия преобразуется в электрическую, которая используется для питания собственных нужд станции (системы подготовки газа, автоматики, телемеханики, освещения), либо при наличии соответствующей схемы включения на выдачу избыточной мощности в локальную сеть. Современные турбодетандерные агрегаты отличаются высоким кпд и при необходимости могут комплектоваться встроенными системами маслоснабжения, автоматическими регуляторами нагрузки, а также унифицированными блоками автоматики для работы в составе ГРС [3, 4].

Исследования по применению турбодетандерных установок на ГРС показывают, что использование энергии перепада давления позволяет существенно снизить потребление внешней электроэнергии, вплоть до полного обеспечения собственных нужд станции [4, 6]. На ряде действующих объектов при давлении магистрального газа порядка 0,7–1,2 МПа и значительных расходах газа удельная установленная мощность детандер-генераторных агрегатов достигает сотен киловатт, что демонстрируется в публикациях, касающихся вопросов энергетизации ГРС [3, 4]. Дополнительно отмечается возможность комбинирования детандерной генерации с иными источниками (солнечные панели, твердооксидные топливные элементы, термоэлектрические модули), при этом формируются гибридные схемы автономного энергоснабжения автоматических ГРС, мобильных узлов подачи газа, редуцирующих пунктов и других объектов.

Одной из особенностей работы турбодетандеров является обеспечение требуемых расхода и давления природного газа. При газопотреблении, недостаточном для нормальной работы турбодетандера, рекомендуется использование источников бесперебойного питания. Суточная неравномерность газопотребления на ГРС, обеспечивающих социальные объекты (с максимальными нагрузками в дневной период и снижением до минимальных значений в ночное время), обуславливает циклический режим работы аккумуляторных батарей источников бесперебойного питания с повышенной частотой переходов «заряд/разряд». Для свинцово-кислотных аккумуляторов, получивших широкое распространение, указанный эксплуатационный режим приводит к значительному уменьшению заявленного ресурса и снижению номинальной емкости до 60 %. В связи с этим для таких систем бесперебойного питания рекомендуется применение литий-ионных аккумуляторов, которые также характеризуются высоким уровнем безопасности за счет отсутствия выделения водорода при работе. Преимуществами литий-ионных аккумуляторов перед свинцово-кислотными является более высокая плотность энергии, быстрая зарядка, отсутствие необходимости обслуживания, безопасность и экологичность, герметичность при сравнительно малых габаритах и массе, высокие токи наряду со стабильным напряжением.

Нормативная документация ПАО «Газпром» обязывает потребителей особой группы первой категории надежности электроснабжения запитывать через станционный источник бесперебойного питания для обеспечения автономной работоспособности в течение 48 ч при отключении основного источника электроэнергии. С целью снижения капитальных затрат и сокращения окупаемости при строительстве ГРС с турбодетандером рекомендуется объединить станционный источник бесперебойного питания и источник бесперебойного питания турбодетандерного агрегата, что позволит расширить объем электропотребителей, сохраняющих непрерывный режим работы для повышения безопасности ГРС.

В соответствии с политикой импортозамещения и с учетом отнесения ГРС к объектам критической информационной инфраструктуры Российской Федерации обязательным требованием является применение аккумуляторов, производственный цикл которых полностью локализован на территории Российской Федерации. В качестве соответствующего решения рассматривается продукция ООО «БАТАРЕОН», производственные мощности которого размещены на площадке особой экономической зоны «Иннопо-

лис» (Республика Татарстан). В рамках сотрудничества ПАО «Газпром» с предприятиями республики с 2015 г. объемы закупок у региональных производителей превысили 125 млрд руб. Промышленные предприятия Республики Татарстан зарекомендовали себя в качестве надежных производителей современного высокотехнологичного оборудования, поставляемого для нужд ПАО «Газпром» [9].

Экономический эффект от внедрения турбодетандеров обусловлен снижением затрат на покупку электроэнергии, возможностью отказа от строительства внешних ЛЭП и сокращением эксплуатационных расходов за счет высокой степени автоматизации [1]. Согласно данным работ [4, 6] применение турбодетандерных установок на ГРС характеризуется экономически обоснованными сроками окупаемости как в условиях модернизации действующих станций, так и при сооружении новых модульных автоматических ГРС, в которых энергетическая составляющая интегрируется на этапе проектирования. Дополнительным положительным эффектом выступает сокращение тепловых потерь вследствие оптимизации схемы предварительного подогрева газа, а также возможность более гибкого управления режимами температуры и давления [2].

Внедрение автоматизированных схем защиты от превышения давления и отказа элементов, подобных реализованным в запатентованной автоматической ГРС с использованием поршневых предохранительных клапанов и регуляторов давления, повышает уровень безопасности при работе станции в автономном режиме [7]. Использование турбодетандеров требует обеспечения надежного подогрева газа до расширения, а также исключения образования гидратов и конденсата в низкотемпературных зонах, что подробно анализируется в работах по современным ГРС и детандерным агрегатам [2]. Отраслевые исследования подчеркивают значимость дистанционного мониторинга технического состояния автоматической ГРС, применения диагностических алгоритмов и обслуживания по состоянию, что позволяет увеличивать межремонтные интервалы и снижать риск аварийных отключений [1].

Конструкция и схемные решения автоматических ГРС с турбодетандером должны соответствовать требованиям технических регламентов Таможенного союза, отраслевых стандартов безопасности, а также стандартов на блочные газораспределительные станции [2]. Перспективными направлениями развития являются создание типовых линеек автоматических ГРС с интегрированными турбодетандерами, унификация узлов, разработка методик оценки жизненного цикла и цифровых двойников станций для оптимизации эксплуатации [1].

Интеграция турбодетандерных установок в состав автоматических модульных ГРС позволяет существенно повысить энергоэффективность и обеспечить автономное электроснабжение объектов газораспределения [3, 4]. Использование патентованных технических решений по модульной компоновке, автоматическим системам защиты и дистанционному управлению создает основу для перехода к новому поколению автоматических ГРС, отвечающих современным требованиям надежности, безопасности и экономичности [2]. Дальнейшие исследования целесообразно направить на подробную технико-экономическую оценку различных конфигураций турбодетандерных модулей, адаптацию нормативной базы и разработку типовых проектов для массового внедрения на объектах магистрального транспорта газа [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дистанов Р.Ю., Посмак М.П., Лигачев А.В. Перспективы развития газораспределительных станций ПАО «Газпром» // Территория Нефтегаз. 2016. № 12. С. 34–38.
2. Морозова В.А., Попов И.Н. Совершенствование газоснабжения использованием современных газораспределительных станций // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоснабжения. 2022. № 1. С. 31–36.
3. Белошицкий М.В. Выработка электроэнергии на детандер-генераторных установках [Электронный ресурс]. URL: <http://www.turbine-diesel.ru/node/4619?ysclid=mrrq92n82594440409> (дата обращения: 28.04.2026).
4. Воронов В.А., Самигуллин Г.Х., Рузманов А.Ю. Повышение энергетических характеристик газораспределительной станции путем применения турбодетандера // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 4. С. 35–39.
5. Аверьянов В.К. и др. Автономное энергоснабжение автоматизированных газораспределительных станций нового поколения» // СОК. 2021. № 12. С. 58–65.

6. Зацепин С.С., Купцов С.М. Применение турбодетандерных установок на газораспределительных станциях // Территория Нефтегаз. 2016. № 12. С. 50–53.
7. Автоматическая газораспределительная станция: пат. 2714184 Рос. Федерация, № 2019106248; заявл. 4.03.2019; опубл. 12.02.2020.
8. Итоги и перспективы эксплуатации ГРС и систем газоснабжения обсудили на международной конференции в «Газпроме» // Газовая промышленность. 2025. № 10. С. 40–41.
9. Промышленные предприятия Татарстана представили производственному блоку «Газпрома» новые решения для добычи, переработки и транспортировки газа // Газовая промышленность. 2025. № 5. С. 18.

Поступила в редколлегию 28.05.26

AUTONOMOUS GAS DISTRIBUTION STATION

B.R. Mubarakshin and V.G. Tonkonog

This article examines the development prospects for next-generation automated gas distribution stations using turboexpander units to generate electricity using the energy of gas pressure differentials across pressure-reducing units. The operational challenges of traditional gas distribution stations are analyzed, and a modernized process flow diagram for a gas distribution station is proposed. The article describes the design features and operating principles of turboexpanders, their integration with Russian-made lithium-ion uninterruptible power supply systems, and the use of adaptive dynamic models for predictive diagnostics.

Keywords: AGDS, turboexpander, autonomous power supply, lithium-ion batteries, predictive diagnostics.

Мубаракшин Булат Ринатович – техн. директор (ООО «БАТАРЕОН», Республика Татарстан)
E-mail: bulat-ags@mail.ru

Тонконог Владимир Григорьевич – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: tonkonogvg@yandex.ru

ФОРМИРОВАНИЕ МАРШРУТНОЙ КАРТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПОСРЕДСТВОМ СЧИТЫВАНИЯ НЕОБХОДИМЫХ ДАННЫХ С ЧЕРТЕЖА ДЕТАЛИ

Р.А. Шарипов, Е.И. Егорова, А.Н. Лунев

Рассматривается вопрос автоматического формирования маршрутной карты технологического процесса механической обработки деталей типа тел вращения с применением нейронных сетей.

Ключевые слова: нейронные сети, автоматизация технологической подготовки, металлообработка, технологический процесс, маршрутная карта, технологическая карта процесса, СПРУТ-ТП.

В современном машиностроении прослеживается тенденция к сокращению жизненных циклов изделий и ужесточению требований к кастомизации продукции. В этих условиях скорость и гибкость технологической подготовки производства становятся критическими конкурентными преимуществами. Традиционные системы автоматизированного проектирования (САПР) технологических процессов, основанные на жестких правилах и иерархических базах данных, часто не справляются с задачей синтеза оптимального маршрута для новых, нестандартных деталей и единичного производства. Требуется трудоемкая ручная корректировка инженером-технологом, что уменьшает экономическую целесообразность автоматизации.

Технологический процесс – это часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда [1].

Задача автоматизации технологического процесса производства остается актуальной задачей, несмотря на существование мощных CAD/CAM-систем. Переход от конструкторской документации (чертежа или 3D-модели) к плану ее изготовления – разработке управляющих программ и маршрутной карты – требует участия опытного инженера-технолога. Его опыт позволяет сопоставить требования к поверхностям детали с возможностями оборудования и последовательностью операций. Однако для автоматизированной системы, работающей по жестким алгоритмам, задача синтеза, а не выбора из базы оптимального маршрута обработки является сложной эвристической проблемой [2].

Эволюция систем автоматизации технологического процесса производства может быть классифицирована по ряду последовательных этапов.

На первом этапе (1960–1980-е гг.) автоматизация носила фрагментарный характер и сводилась к созданию информационно-справочных систем, которые помогали инженеру-технологу хранить и быстро находить типовые технологические процессы. Эти системы не генерировали новые решения, а лишь облегчали доступ к уже существующим.

На втором этапе (1980–2000-е гг.) распространение получили САПР технологических процессов, базирующиеся на параметризации и таблицах решений, которые генерировали последовательность операций на основе заданных характеристик детали. Данные системы, характерные для большинства современных коммерческих САПР технологических процессов, демонстрировали высокую эффективность для унифицированных деталей, однако характеризовались низкой адаптивностью к инновационным конструкторским решениям.

Третий, современный этап характеризуется попытками применения методов искусственного интеллекта, в частности экспертных систем и нейронных сетей, для решения задач технологического проектирования. Отмечается, что современное развитие САПР ТП ориентировано на интеграцию методов искусственного интеллекта. Однако большинство подобных разработок сохраняют экспериментальный статус и не получили широкого промышленного внедрения [3].

Современный этап развития машиностроения характеризуется усложнением конструкций и ужесточением требований к точности, аналогично тому, как в авиастроении рост функциональных возможностей требует повышения энерговооруженности и точности систем ориентации. Однако методы проектирования технологических процессов во многих отраслях остаются консервативными. Традиционные САПР технологических процессов, такие как «СПРУТ-ТП», «Вертикаль» или аналоги, эффективны при работе с унифицированными и типовыми процессами. Их архитектура, основанная на иерархических базах данных и таблицах решений, позволяет быстро подобрать процесс для детали, уже имеющей аналог в производстве. Однако при появлении детали с новыми конструктивными элементами или нестандартным сочетанием точностных параметров (например, высокий kvalitet при сложной конфигурации) система неспособна синтезировать решение. Инженер-технолог вынужден вручную формировать маршрут, опираясь на свой производственный опыт, что вносит элемент субъективности и увеличивает время подготовки производства. Использование существующих подходов к автоматическому распознаванию чертежей, особенно бумажных или растровых, ограничено неоднозначностью интерпретации семантической информации (допуски, базы, шероховатость).

Наиболее перспективна работа непосредственно с электронными CAD-моделями, где геометрическая и технологическая информация изначально структурирована, что позволяет применять к ней методы математического и имитационного моделирования, аналогичные тем, что используются при расчете динамики сложных систем.

Ключевые ограничения существующих подходов можно систематизировать следующим образом.

Первое ограничение связано с жесткостью логических правил. В основе традиционных систем лежат продукционные правила типа «ЕСЛИ (условие), ТО (действие)», адекватно формализующие устоявшиеся знания, однако лишенные механизмов обобщения. Вследствие этого при неполном соответствии новой детали заданным условиям система утрачивает возможность генерации частично подходящего решения и модификации существующего.

Второе ограничение касается неполноты описания. В большинстве САПР технологических процессов деталь описывается ограниченным набором параметров, как правило, геометрическими размерами и обозначением материала. Тонкие технологические характеристики (допуски формы и расположения, требования к микроструктуре поверхностного слоя или технологические наследственные свойства) либо не учитываются вовсе, либо вводятся вручную, что нивелирует основные преимущества автоматизации.

Третье ограничение – отсутствие адаптивности. Традиционные системы не обучаются на новых данных. Если на предприятии накоплен большой опыт изготовления деталей определенного класса, этот опыт не может быть автоматически обобщен и использован системой для улучшения качества проектирования. Система продолжает работать по тем же правилам, что и на момент ее внедрения.

Четвертое ограничение – проблема интерпретации чертежей. Существующие подходы к автоматическому распознаванию чертежей, особенно бумажных или растровых носителей, осложняются неоднозначностью интерпретации семантической информации. Допуски, базы, обозначения шероховатости на чертеже имеют не только графическое начертание, но и сложное семантическое значение, которое трудно формализовать для автоматического распознавания. В связи с этим предпочтительной стратегией признается переход к обработке электронных CAD-моделей, где геометрическая и технологическая информация изначально структурирована, что позволяет применять к ней методы математического и имитационного моделирования.

Как отмечается в работе по основам технологии машиностроения, применение модульного принципа описания изделия обеспечивает возможность формализации задачи синтеза технологического процесса за счет представления детали в виде взаимосвязанного комплекса элементарных поверхностей [4]. Этот принцип декомпозиции, известный в литературе как моделирование на основе конструктивно-

технологических элементов, позволяет формализовать задачу и подготовить данные для последующего анализа с помощью методов машинного обучения.

В отличие от традиционного методологического подхода, предполагающего рассмотрение детали как единое целое, признаковое представление предусматривает декомпозицию изделия на отдельные функционально и технологически значимые зоны. Каждая из таких зон, представляющая собой поверхность, характеризуется уникальным набором параметров, определяющих технологию ее формирования. При этом важно понимать, что поверхности не изолированы друг от друга; они связаны пространственными и точностными соотношениями (соосность, перпендикулярность, параллельность), которые также должны учитываться при формировании маршрута обработки.

Ключевым этапом является формирование признакового описания для каждой выделенной поверхности. В отличие от упрощенных моделей, используемых в традиционных САПР технологических процессов, предлагаемый вектор признаков учитывает не только геометрический тип (цилиндр, плоскость), но и комплекс точностных характеристик, а также информацию о взаимном расположении поверхностей [5].

Предлагаемый подход основывается на следующей совокупности признаков.

1. Геометрический тип поверхности – цилиндр (наружный/внутренний), плоскость (торец, уступ), конус, сфера, тор, резьба, шпоночный паз, зубья и т. д.

Тип поверхности кодируется с использованием one-hot encoding для подачи в нейронную сеть.

2. Размерные характеристики.

Для цилиндрических поверхностей используется диаметр и длина, для плоских – длина, ширина и при необходимости площадь; для сложных поверхностей – габаритные размеры или параметры образующей.

3. Квалитет точности (IT).

Определяется на основе поля допуска на размер. Квалитет является интегральной характеристикой точности и варьируется от IT01 (наивысшая точность) до IT18 (грубая точность). Одна и та же поверхность может иметь разные квалитеты для разных размеров, например для диаметра и длины. В этом случае в вектор признаков включается наиболее жесткий квалитет.

4. Параметр шероховатости поверхности (R_a , R_z или другие).

Шероховатость является ключевым фактором, определяющим необходимость финишных операций – шлифования, полирования, хонингования.

5. Допуски формы и расположения.

Наличие допусков (цилиндричности, перпендикулярности, соосности, радиального биения и т. д.) даже при относительно невысоком квалитете размера может потребовать введения дополнительных операций или изменения последовательности обработки.

6. Информация о базировании.

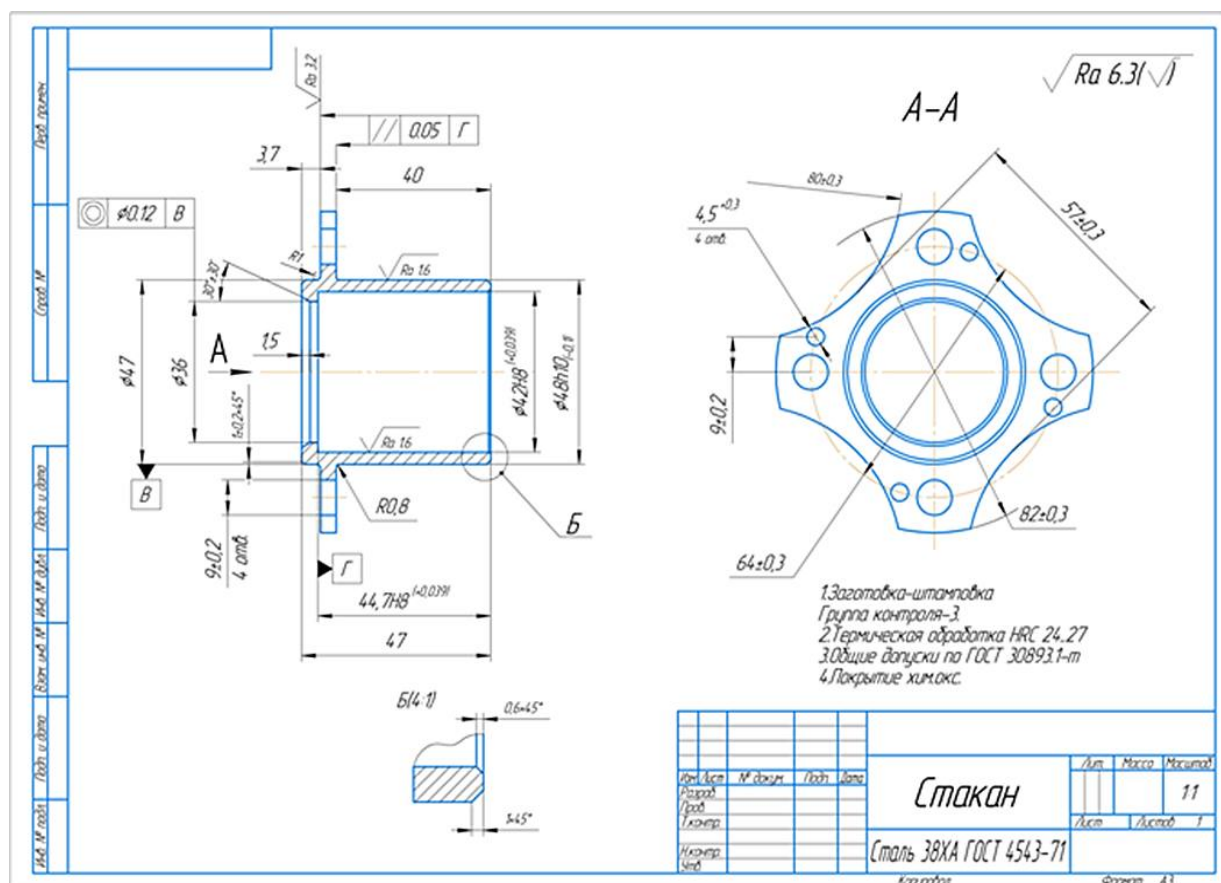
Указание на чертеже базовых поверхностей определяет, какие элементы детали будут использоваться для ее установки на станке, что критически важно для обеспечения заданной точности взаимного расположения.

7. Термическая обработка и покрытия.

Требования к показателям твердости, глубине цементованного слоя, а также наличию гальванических или лакокрасочных покрытий оказывают существенное влияние на формирование технологического маршрута, обуславливая включение в него операций термической обработки и нанесения покрытий.

Именно совокупность этих данных, извлеченных из 3D-модели и ее аннотаций, определяет сложность и последовательность обработки. Важно подчеркнуть, что все эти данные могут быть автоматически извлечены из современной CAD-модели, если она выполнена с соблюдением требований EDM и содержит всю необходимую аннотацию в машиночитаемом виде.

Рассмотрим деталь «Стакан» с наружным диаметром 47,8h9, внутренним диаметром 42H7 и торцевой поверхностью с шероховатостью R_a 0,40 мкм. Поверхности изготавливаются по седьмому качеству, параметр шероховатости указан на чертеже детали (рисунок). Допуски формы и расположения (перпендикулярность, соосность, радиальное биение и т. д.) указаны на чертеже детали [6].



Для определения последовательности операций «черновое точение → чистовое точение → шлифование» необходимо обучить нейросетевую модель, способную синтезировать маршрут на основе технологических признаков поверхностей детали.

Предполагается, что система будет работать как интеллектуальный модуль, интегрированный в среду технологической подготовки производства, например, через API системы «СПРУТ-ТП» следующим образом. Инженер загружает САД-модель детали. Система автоматически выполняет признаковый анализ модели, формируя массив поверхностей с их атрибутами. Для каждой поверхности в зависимости от ее признаков нейронная сеть определяет цепочку технологических переходов. Далее система агрегирует эти цепочки, объединяя однотипные операции для разных поверхностей в единые технологические установки, формируя оптимальный маршрут. Результат выдается в виде структурированной маршрутной карты в формате .json или .xml для последующего импорта в систему технологического процесса производства. На этапе интеграции указанная карта дополняется данными о режимах резания, применяемом инструменте и нормативах трудоемкости операций.

Автоматический анализ модели выделяет три ключевые поверхности [7].

1. Внутренний цилиндр диаметром 42Н7: Н7, R_a 3,2 (предполагается). Признаки: высокий квалитет, средняя шероховатость.

2. Наружный цилиндр диаметром 47,8h9: R_a 3,2. Признаки: средний квалитет, средняя шероховатость.

3. Торец: плоскость, R_a 0,40. Признаки: высокая чистота поверхности.

На основе извлеченных признаков поверхности нейросетевой модуль синтезирует последовательность необходимых технологических операций и автоматически формирует структурированную маршрутную карту технологического процесса.

Для поверхности «внутренний цилиндр Ø42Н7»: Н7 + R_a 3,2 → черновое точение → чистовое точение → шлифование.

Для поверхности «наружный цилиндр Ø47,8h9»: h9 + R_a 3,2 → черновое точение → чистовое точение.

Для поверхности «плоскость R_a 0,40»: R_a 0,40 (при стандартной точности размера) → чистовое точение → шлифование.

Система объединяет операции, формируя итоговый маршрут: «токарная ЧПУ (черновая) → токарная ЧПУ (чистовая) → шлифовальная».

Помимо геометрических параметров и требований к точности поверхностей, система выполняет анализ общего блока технических требований, указанных в основной надписи чертежа или технических условиях на деталь. В рассматриваемом примере деталь «Стакан» согласно чертежу должна подвергаться термообработке (закалке до твердости 40...45 HRC) с последующим нанесением фосфатного покрытия для защиты от коррозии. Эти требования автоматически распознаются модулем анализа технических условий и включаются в общую логику синтеза маршрута. На основе извлеченных признаков поверхностей и технологических требований нейросетевой модуль синтезирует последовательность необходимых технологических операций. При этом система учитывает, что термообработка должна выполняться после механической обработки, но до финишных операций (шлифования), чтобы избежать деформации поверхностей после закалки. Фосфатное покрытие, как финишная операция, наносится после окончательной механической обработки.

Предложенный подход демонстрирует возможность использования нейронных сетей для интеллектуального синтеза маршрутных карт. Ключевым достижением является переход от систем, основанных на поиске по шаблонам, к системе, способной генерировать новые, технологически обоснованные решения для широкого класса деталей типа тел вращения [8].

В результате анализа взаимного расположения поверхностей и требований к точности система сформировала следующий итоговый маршрут обработки:

Операция 005 токарная с ЧПУ
Операция 010 токарная с ЧПУ
Операция 015 термообработка
Операция 020 шлифовальная
Операция 025 гальваническая
Операция 030 контрольная

Полученный результат полностью соответствует логике, которую применил бы опытный инженер-технолог. Подчеркнем, что система не выбрала этот маршрут из базы данных, а синтезировала его, комбинируя знания о требованиях к каждой отдельной поверхности и общие принципы построения технологических процессов (минимизация количества установов, совмещение обработки родственных поверхностей).

Проведенное исследование подтвердило принципиальную возможность использования нейросетевых методов для синтеза маршрутных технологических процессов. Ключевым результатом является демонстрация того, что нейронная сеть, обученная на множестве примеров, способна не просто воспроизводить заученные шаблоны, но и генерировать новые технологически обоснованные решения для комбинаций признаков, не встречавшихся в обучающей выборке. Это свойство обобщения имеет фундаментальное значение. Оно означает, что система не ограничена заранее заложенными правилами и может адаптироваться к новым типам деталей, что особенно важно в условиях быстро меняющейся номенклатуры производства. Кроме того, использование нейросетей позволяет неявно учитывать множество факторов, влияние которых сложно формализовать в виде явных правил, например технологическое наследование или влияние последовательности обработки на точность взаимного расположения поверхностей. В долгосрочной перспективе предложенный подход может стать основой для создания самообучающихся технологических систем. Такая система, работая в контуре реального производства, будет накапливать данные о результатах выполнения спроектированных ею технологических процессов и использовать эти данные для автоматической корректировки и улучшения своих моделей. Например, если система спроектировала маршрут для новой детали и в процессе изготовления возникли проблемы с точностью или производительностью, эти данные могут быть использованы для дообучения нейронной сети, чтобы впоследствии подобные ошибки не повторялись. Таким образом, система будет непрерывно совершенствоваться, адаптируясь к особенностям конкретного производства и накапливая уникальный технологический опыт предприятия.

В результате проведенного исследования предложен и апробирован метод автоматического формирования маршрутных технологических карт, основанный на нейросетевом анализе признаков описания поверхностей детали. Ключевым отличием разработанного подхода является отказ от логики прямого поиска по шаблону в пользу синтеза нового технологического решения на основе знаний, обобщенных нейронной сетью. Применение данного метода позволяет устранить субъективный фактор и снизить трудоемкость этапа технологической подготовки за счет автоматической интерпретации САД-модели и генерации маршрута обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егорова Е.И., Лунев А.Н., Курылев Д.В. Правила построения маршрута обработки элементарных поверхностей детали // Научно-технический вестник Поволжья. 2025. № 11. С. 164–167.
2. Егорова Е.И. Методика формирования базы знаний интеллектуальной системы проектирования технологических процессов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2025. № 2. С. 189–194.
3. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения. М.: Инфра-М, 2020. 683 с.
4. Белов П.С., Драгина О.Г. САПР технологических процессов. М.: Ай Пи Ар Медиа, 2025. 154 с.
5. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение. М.: ДМК Пресс, 2021. 652 с.
6. ГОСТ 2.309-73. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). М.: Стандартинформ, 2007. 9 с.
7. Данилов В.В. Нейронные сети. Донецк: ДонНУ, 2020. 158 с.
8. Хайкин С. Нейронные сети: Полный курс. М.: Издательский дом Вильямс, 2008. 1103 с.

Поступила в редколлегию 16.03.26

AUTOMATIC PROCESS FLOWCHART CREATION USING NEURAL NETWORKS BY READING THE REQUIRED DATA FROM A PART DRAWING

R.A. Sharipov, E.I. Egorova, and A.N. Lunev

This article examines the automatic generation of process flow charts for the machining of solid-of-revolution parts using neural networks.

Keywords: neural networks, automation of process preparation, metalworking, technological process, route map, process flow chart, SPRUT-TP.

Шарипов Рустам Айдарович – ст. преподаватель (Альметьевский филиал КНИТУ-КАИ, Альметьевск)
E-mail: rustam.sharipov.14@list.ru

Егорова Елена Ивановна – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: egrvelena@mail.ru

Лунев Александр Николаевич – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: ANLunev@kai.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДАЛЬНЕЙШЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ПО КРИТЕРИЮ КОНТАКТНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ

А.С. Шубина, А.Д. Слабунова

Рассмотрен комплексный подход к оценке остаточного ресурса зубчатых передач по критерию контактной выносливости, обеспечивающий принятие технически и экономически обоснованных решений о возможности их дальнейшей эксплуатации. Представлены результаты аналитического обзора физических механизмов контактной усталости, расчета контактных напряжений по формуле Герца – Беляева (ГОСТ 21354-87) и систематизации методов инструментальной диагностики, включая твердометрию, профилометрию, акустическую эмиссию и вибрационный анализ. Показано, что определяющим фактором работоспособности зубчатых передач является не только наличие дефектов (питтинга, заедания, износа), но и динамика их развития. Предложен интегральный критерий, основанный на отношении расчетного контактного напряжения к допускаемому с учетом накопленного ресурса. Полученные результаты могут быть использованы при технической диагностике и ремонте зубчатых передач в машиностроении, транспортной и энергетической отраслях.

Ключевые слова: контактная выносливость, зубчатые передачи, остаточный ресурс, контактные напряжения, усталостное выкрашивание, питтинг, метод конечных элементов, акустическая эмиссия, диагностика.

Зубчатые передачи относятся к числу основных элементов большинства механических систем, используемых в промышленном оборудовании, транспортных средствах и других технических устройствах. В процессе их длительной эксплуатации возникает необходимость объективной оценки остаточного ресурса, на основании которой принимается решение о возможности дальнейшей эксплуатации, проведении ремонта или замене передачи. Одним из определяющих критериев такой оценки является контактная выносливость, характеризующая способность материала противостоять усталостному выкрашиванию (питтингу) рабочих поверхностей зубьев.

Цель настоящей работы – разработка и обоснование комплексного подхода к оценке возможности дальнейшей эксплуатации зубчатых передач по критерию контактной выносливости.

Задачи исследования – анализ физических механизмов зарождения и развития контактно-усталостных повреждений; выявление ключевых расчетных параметров, определяющих контактную прочность; систематизация диагностических методов для верификации расчетных оценок; формулирование количественных критериев принятия технического решения.

При взаимодействии сопряженных зубьев в зоне контакта возникает сложное напряженное состояние. Согласно теории Герца контактная область характеризуется малыми размерами, в ней формируются высокие нормальные напряжения $\sigma_{\max}$ (сжатие) на поверхности и максимальные касательные напряжения $\tau_{\max}$ на некоторой глубине под поверхностью [1, 2].

Циклическое действие $\tau_{\max}$ инициирует зарождение микротрещин в подповерхностном слое, их прогрессирующий рост и, в конечном счете, отделение частиц материала – образование питтингов. Этот механизм подтвержден экспериментально для сталей с поверхностным упрочнением (цементация, закалка ТВЧ) [3].

Величина контактных напряжений определяется комплексом факторов – крутящим моментом (окружная сила F_t), геометрией зацепления (радиусы кривизны, передаточное число u , ширина венца b), упругими свойствами материалов (модуль Юнга E , коэффициент Пуассона μ), коэффициентом нагрузки K_H , учитывающим динамику, неравномерность распределения нагрузки и влияние износа.

Расчет контактной выносливости выполняется в соответствии с ГОСТ 21354-87 (ISO 6336). Для цилиндрических прямозубых передач расчетное контактное напряжение σ_H определяется по формуле

$$\sigma_H = Z_E Z_H Z_\epsilon \sqrt{\frac{K_H F_t (u \pm 1)}{d_1 b u}} \leq [\sigma_H], \quad (1)$$

где σ_H – расчетное значение контактного напряжения; Z_E – коэффициент, учитывающий физико-механические характеристики материалов (модуль Юнга и коэффициент Пуассона); Z_H – коэффициент формы сопряженных поверхностей зубьев; Z_ε – коэффициент суммарной длины контактных линий; F_t – значение окружной силы; u – передаточное число; d_1 – диаметр делительной окружности шестерни; b – ширина зубчатого венца; $[\sigma_H]$ – допускаемое контактное напряжение.

Допускаемое контактное напряжение $[\sigma_H]$ не является константой: оно снижается с накоплением числа циклов нагружения N_H :

$$[\sigma_H] = \frac{\sigma_{Hlimb}}{S_H} K_{HL}, \quad (2)$$

где σ_{Hlimb} – базовый предел контактной выносливости поверхностей зубьев; S_H – коэффициент безопасности (зависит от марки стали); K_{HL} – коэффициент долговечности, который находится по формуле

$$K_{HL} = \sqrt[6]{\frac{N_{H0}}{N_H}}, \quad (3)$$

где N_{H0} – базовое число циклов, при котором наступает предел выносливости; N_H – число циклов нагружения зубьев.

При оценке остаточного ресурса необходимо использовать фактические значения F_t , K_H (по данным эксплуатации) и уточненный $[\sigma_H]$ с учетом уже наработанного ресурса.

Расчетные оценки обязательно должны быть подтверждены инструментальным контролем. Рекомендуется следующий минимальный комплекс диагностических мероприятий.

Визуальный контроль (с увеличением до $\times 10$) позволяет выявить питтинг (микрораковины), задиры и следы заедания, абразивный износ, трещины и сколы.

Количественные критерии предложены на основе обобщения данных [4, 5]. Питтинг на площади до 20–30 % поверхности зуба при отсутствии прогрессирования (по данным повторных осмотров, через 200–300 моточасов) допустимо. При глубине выкрашивания более 0,2 модуля или поражении более 30 % требуется замена. В случае шероховатости $R_a = 2,5$ мкм на активной поверхности происходит снижение допускаемого напряжения на 10–15 %.

Проведена инструментальная диагностика.

1. Твердометрия (метод Роквелла или Виккерса).

Контроль деградации поверхностной твердости (снижение более чем на 15 % от исходной критично).

2. Профилометрия.

Оценка фактической шероховатости и волнистости:

- ультразвуковая или магнитопорошковая дефектоскопия – выявление подповерхностных трещин;
- координатно-измерительные машины – построение 3D-модели изношенного зуба для конечно-

элементного анализа.

Современные исследования направлены на интеграцию методов неразрушающего контроля и цифрового моделирования.

Метод конечных элементов позволяет моделировать контакт с учетом реальной геометрии изношенных зубьев, оценивать влияние остаточных напряжений, прогнозировать развитие трещин [6].

Посредством акустоэмиссионной диагностики возможно регистрировать момент зарождения микротрещин в реальном времени и отслеживать их рост.

Вибрационно-спектральный анализ – косвенный метод, позволяющий по изменению спектра вибраций контролировать развитие дефектов контактных поверхностей [7].

К ограничениям рассматриваемых методов относится высокая чувствительность акустико-эмиссионного контроля к внешним помехам, а также необходимость наличия эталонных спектров исправной передачи для эффективного применения вибродиагностики. Вместе с тем комплексное

использование данных методов позволяет повысить точность прогнозирования остаточного ресурса.

На основе выполненного анализа сформулированы следующие выводы и практические рекомендации.

Ключевым фактором при оценке возможности дальнейшей эксплуатации является не статическое наличие дефектов, а динамика их развития (скорость роста питтинга, трещин).

Расчетно-экспериментальный подход должен включать проверочный расчет σ_H по формуле (1) с реальными эксплуатационными нагрузками, определение уточненного $[\sigma_H]$ по формуле (2) с учетом накопленного ресурса, инструментальную верификацию (визуальный контроль + твердометрия + профилометрия + дефектоскопия).

Приведем количественные критерии принятия решения (рекомендуемые).

При выполнении условия $\sigma_H/[\sigma_H] \leq 0,8$ и отсутствии признаков прогрессирующего питтинга допускается дальнейшая эксплуатация передачи с проведением планового контроля через каждые 500 ч работы. Если отношение контактных напряжений находится в диапазоне $0,8 < \sigma_H/[\sigma_H] \leq 1,0$, рекомендуется эксплуатация с ограничением нагрузки до 80 % от номинальной и сокращением интервала между контрольными обследованиями до 200 ч. При превышении допускаемых контактных напряжений $\sigma_H/[\sigma_H] > 1,0$, а также при выявлении подповерхностных трещин или глубины выкрашивания более 0,2 мм дальнейшая эксплуатация передачи не допускается, и ее замена является обязательной.

Зубчатая передача после длительной эксплуатации может сохранять работоспособность по критерию контактной выносливости при условии выполнения комплексной диагностики и соблюдения предложенных критериев.

Инженерная задача сводится к формированию обоснованного прогноза остаточного ресурса, что позволяет принять технически и экономически целесообразное решение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.
2. Козаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. М.: Высшая школа, 1991. 319 с.
3. Dawson J.A. The Effect of Hardness and Microstructure on the Contact Fatigue of Steel // ASME Journal of Mechanical Design. 1985. Vol. 107. P. 432–438.
4. Лебедев Д.В. Разработка методики оценки остаточного ресурса зубчатых передач по критерию контактной прочности: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Челябинск: ЮУрГУ, 2019. 24 с.
5. Нахатакян Ф.С. Расчет контактных напряжений в зубчатых передачах с учетом дефектов материала // Перспективные материалы и технологии машиностроения. 2023. № 2 (18). С. 45–52.
6. Иванов А.А., Петров В.К. Моделирование контактного взаимодействия зубчатых колес с учетом износа методом конечных элементов // Вестник машиностроения. 2024. № 5. С. 33–39.
7. Баранов С.А., Кузьмин В.Н., Семенов А.Л. Контактные напряжения в зубчатых колесах тягового редуктора колесно-моторного блока электровоза // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. № 3. С. 27–34.

Поступила в редколлегию 28.05.26

RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF FURTHER OPERATION OF GEARINGS BY THE CRITERION OF CONTACT ENDURANCE

A.S. Shubina and A.D. Slabunova

The purpose of the work is to substantiate an integrated approach to assessing the residual life of gears according to the criterion of contact endurance in order to make a technically and economically sound decision on further operation. Methods: analytical review of the physical

mechanisms of contact fatigue, calculation of contact stresses according to the Hertz–Belyaev formula (GOST 21354-87), systematization of instrumental diagnostic methods (hardness measurement, profilometry, acoustic emission, vibration analysis). It is shown that the determining factor of operability is not so much the presence of defects (pitting, jamming, wear) as the dynamics of their development; an integral criterion is proposed the ratio of the calculated contact voltage to the allowable adjusted for accumulated life. Scope of application: technical diagnostics and repair of gears in mechanical engineering, transport and energy industries.

Keywords: contact endurance, gears, residual resource, contact stresses, fatigue staining, pitting, finite element method, acoustic emission, diagnostics.

Шубина Александра Сергеевна – ст. преподаватель (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: ASShubina@kai.ru

Слабунова Алиса Денисовна – студент (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: alislabinova@gmail.com

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ СТАНКОВ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Д.С. Калашников

Представлена аппаратно-программная система вибродиагностики вращающихся узлов, обеспечивающая регистрацию вибрационных сигналов, передачу измерений на вычислительный модуль и последующий анализ в условиях стендовых и эксплуатационных испытаний. Рассмотрена практическая реализация системы, включающая измерительный модуль, канал обмена данными и программное обеспечение для приема, хранения, визуализации и первичной обработки сигналов. Показано, что предложенная архитектура обеспечивает воспроизводимый сбор данных и формирование диагностических критериев на основе традиционных частотных показателей вибрации.

Ключевые слова: вибродиагностика, вращающиеся узлы, вибрационные сигналы, аппаратно-программный комплекс, частотные характеристики.

В настоящее время в области вибродиагностики шпиндельных узлов станков с числовым программным управлением (ЧПУ) используются различные решения, включая специализированные системы мониторинга вибрации и температуры, а также анализаторы ошибок вращения. Эти системы, как правило, основаны на применении пьезоэлектрических или MEMS-датчиков для регистрации вибрационных сигналов с последующим анализом временных и частотных характеристик [1–3]. Тем не менее в данной сфере сохраняется ряд значимых проблем: недостаточная точность при анализе нестационарных процессов (разгон, торможение, изменение нагрузки), влияние внешних помех и шума на качество сигнала, высокая стоимость внедрения систем реального времени, а также зависимость результатов от ориентации датчика, что затрудняет сопоставимость данных между различными измерениями. Кроме того, многие существующие подходы характеризуются ограниченным объемом данных, доступных для раннего выявления типичных дефектов, таких как дисбаланс и износ подшипников. Это увеличивает риск возникновения внеплановых простоев и снижает эффективность методов предварительного технического обслуживания.

Вибродиагностика представляет собой критически важный инструмент обеспечения надежности и точности металлообрабатывающего оборудования, поскольку динамическое состояние технологической системы напрямую влияет на качество формообразования и долговечность инструмента. При диагностике подшипников шпинделя станка с ЧПУ выявлено, что изменение вибрационных характеристик позволяет выявлять начальные стадии дефектов вращающихся узлов до их перехода в аварийное состояние [4]. При исследовании компенсации упругих перемещений нежестких валов установлено, что даже в случае незначительных динамических отклонений, фиксируемых методами вибродиагностики, существенно возрастают погрешности обработки. Следовательно, регистрация и анализ вибрационных параметров позволяют своевременно выявлять изменения деформированного состояния технологической системы и использовать полученную информацию для коррекции режимов обработки, обеспечивая повышение точности [5]. В работах по управлению качеством при шлифовании поверхностей под углом к оси детали показано, что термодинамические и динамические процессы в зоне резания вызывают структурные изменения поверхностного слоя и формирование дефектов, что указывает на необходимость контроля колебательного состояния системы при проектировании режимов обработки [6]. Таким образом, совокупность представленных исследований показывает, что вибродиагностика является не вспомогательным, а основным элементом обеспечения точности, устойчивости и экономической эффективности процессов механической обработки.

Вместе с тем анализ существующих подходов показывает, что при диагностике шпиндельных узлов станков с ЧПУ основное внимание, как правило, уделяется либо отдельным временным показателям вибрации, либо спектральным характеристикам, полученным по одной измерительной оси. Такой подход оказывается недостаточно информативным в условиях сложных колебаний конструкции, характерных для реальных станочных систем [7]. В результате диагностические признаки могут существенно зависеть от ориентации датчика, точки установки и локальных особенностей конструкции, что затрудняет сопоставление результатов между различными измерениями и снижает воспроизводимость оценки вибрационного состояния. Дополнительной сложностью является то, что изменения динамического состояния шпиндельного узла нередко проявляются не только в росте общего уровня вибрации, но и в перераспределении энергии между гармоническими составляющими спектра [8, 9]. Усиление отдельных гармоник может быть связано как с неуравновешенностью вращающихся масс, так и с возбуждением резонансных форм колебаний элементов конструкции или ослаблением жесткости соединений. При этом использование только амплитуды основной гармоники вращения не позволяет в полной мере отразить физическую природу происходящих процессов и может приводить к запаздывающему выявлению потенциально опасных состояний [10].

Перспективным направлением развития методов вибродиагностики станков является использование обработки информации на высокопроизводительных удаленных вычислительных средствах, поскольку это позволяет повысить точность обработки данных и производить накопление экспериментальных данных для повышения надежности прогнозов технического состояния оборудования на основе применения алгоритмов машинного обучения [11–13].

Таким образом, задача измерений вибрационных сигналов, наблюдающихся в процессе работы станков с ЧПУ, является актуальной для контроля технического состояния, обнаружения критических режимов работы и повышения качества производимой продукции. В данной работе предложена и создана система измерения вибрационных сигналов на основе MEMS-датчиков, позволяющая проводить исследования в широком частотном диапазоне и производить их контроль для разных пространственных осей.

Анализ нормативной документации [14] показывает, что при оценке вибрационного состояния металлорежущих станков рекомендуется рассматривать вибрационные сигналы в частотном диапазоне 10...1000 Гц. Для обеспечения достоверной регистрации вибрационных процессов в шпиндельных узлах станков с ЧПУ акселерометр должен удовлетворять ряду технических требований. В частности, датчик должен обеспечивать измерение виброускорений в рабочем диапазоне частот 0...2000 Гц при сохранении равномерной амплитудно-частотной характеристики. В работе [7] на основе анализа экспериментальных данных установлено, что величину виброускорений около $5,5 \text{ м/с}^2$ можно рассматривать как предельные допустимые значения. Достижение данного уровня связано с переходом машины в режим, требующий повышенного внимания и ограничения эксплуатации. Следовательно, измерительный датчик, применяемый в системе вибродиагностики, должен обеспечивать корректную регистрацию виброускорений до уровня $5,5 \text{ м/с}^2$ без насыщения сигнала и искажения амплитудных характеристик. С учетом возможных кратковременных динамических перегрузок и резонансных эффектов целесообразно выбирать акселерометр с запасом по диапазону измерения, превышающим указанный уровень в 1,5-2 раза. Предпочтительным является использование трехосевого акселерометра с цифровым интерфейсом передачи данных и встроенным аналого-цифровым преобразователем.

Разработанная система, структурная схема которого показана на рис. 1, представляет собой компактный измерительный модуль для вибродиагностики вращающихся узлов, объединяющий датчик вибрации, вычислительный контроллер, узел питания и интерфейс передачи данных. В процессе работы датчик регистрирует виброускорения, после чего контроллер выполняет дискретизацию сигнала с заданной частотой, первичную фильтрацию/нормировку (при необходимости) и буферизацию выборок. Далее данные формируются в пакеты фиксированного формата и передаются по проводному сетевому каналу на внешний вычислительный модуль (ПК) для сохранения и последующего анализа. Архитектура систе-

мы предусматривает непрерывный режим измерений, контроль целостности передачи и возможность оперативной диагностики состояния канала связи.

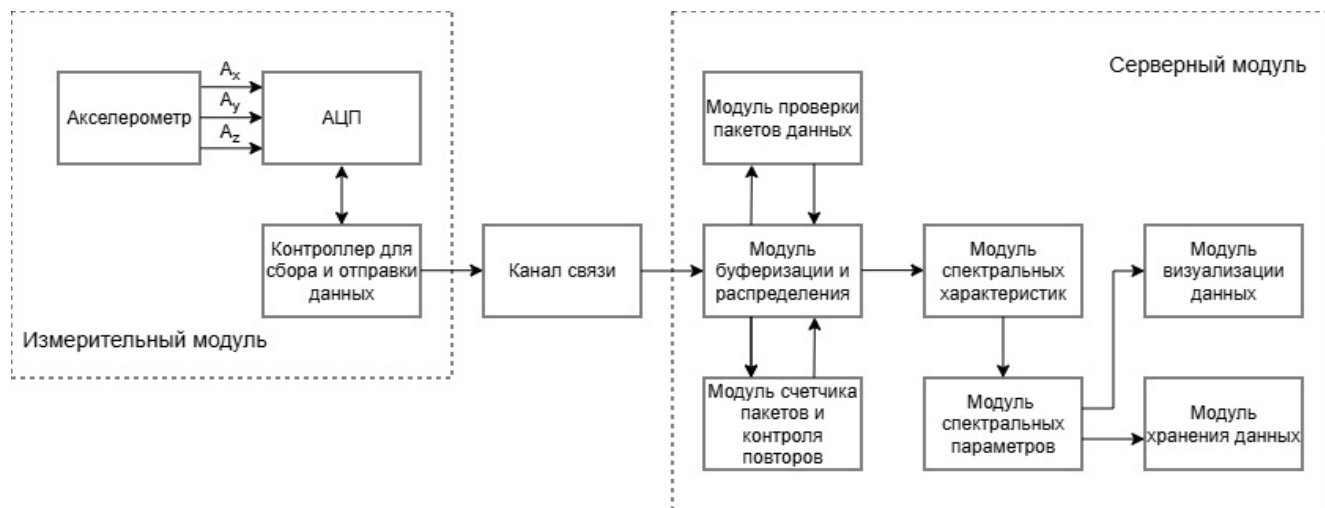


Рис. 1

Предлагаемая в работе система вибродиагностики основана на использовании компактного измерительного модуля на базе MEMS-акселерометра с частотой дискретизации до 3200 Гц. Акселерометр регистрирует виброускорения по трем координатным осям, после чего сигналы поступают на аналого-цифровой преобразователь и далее передаются в контроллер сбора и отправки данных. Контроллер выполняет прием сигналов по трем каналам, их первичную обработку, формирование пакетов и передачу по проводному интерфейсу Ethernet через канал связи на серверный модуль. На принимающей стороне данные поступают в модуль буферизации и распределения, который обеспечивает их дальнейшую маршрутизацию внутри программной системы. Параллельно реализуются модуль проверки пакетов данных и модуль счетчика пакетов и контроля повторов, что позволяет контролировать корректность передаваемой информации, выявлять повторы и оценивать стабильность обмена. После этого данные направляются в модуль спектральных характеристик, где выполняется преобразование сигналов в частотную область, и далее в модуль спектральных параметров, предназначенный для расчета диагностически значимых признаков. Результаты обработки поступают в модули визуализации и хранения данных, обеспечивающие оперативное отображение и накопление информации для последующего анализа. Таким образом, система включает два взаимосвязанных уровня – измерительный модуль, содержащий MEMS-акселерометр ADXL345, блок аналого-цифрового преобразования и микроконтроллер STM32H755, а также серверный модуль, включающий средства проверки пакетов, буферизации и распределения, контроля повторов, спектральной обработки, расчета параметров, визуализации и хранения данных.

Точность датчика определяется требованиями к измерению и оценке спектра вибраций. В задачах вибродиагностики основной измеряемой величиной является амплитуда спектральной составляющей виброускорения $A(f)$, поэтому исходным проектным требованием является точность ее определения. Если при спектральном анализе допускается относительная погрешность оценки амплитуды не более δ_A , то должно выполняться условие

$$\frac{\Delta A(f)}{A(f)} \leq \delta_A,$$

где $A(f)$, $\Delta A(f)$ – амплитуда спектральной составляющей на частоте f и абсолютная погрешность ее определения; δ_A – допустимая относительная погрешность оценки амплитуды.

Амплитуда спектральной составляющей определяется на основе временного сигнала, регистрируемого акселерометром. В связи с этим требования к точности спектрального анализа непосредственно

определяют требования к точности измерительного тракта и характеристикам датчика. При этом верхняя граница допустимой погрешности датчика определяется допустимой погрешностью оценки амплитуды спектральной составляющей:

$$a_{\text{sens}} \leq \delta_A A(f),$$

где a_{sens} – допустимая погрешность датчика.

Для исследуемого станка требуемая точность датчика определяется по амплитудам тех спектральных составляющих, которые используются в качестве диагностических признаков. Таким образом, расчет требуемой точности датчика должен выполняться по наименьшей из диагностически значимых амплитуд, поскольку именно она задает наиболее жесткое требование к датчику. Зададимся требованием, что составляющая вибрационного сигнала с амплитудой $0,1 \text{ м/с}^2$ должна оцениваться с относительной погрешностью не более 2 %. Следовательно, требуемая точность датчика составляет $0,002 \text{ м/с}^2$.

Требования к частотному и динамическому диапазонам датчика определяются условиями измерения спектра вибраций с заданной точностью и заданным частотным разрешением. Рабочий частотный диапазон датчика должен полностью перекрывать интервал анализируемых частот при сохранении допустимой амплитудной погрешности, т. е.

$$\left| \frac{K(f) - K_0}{K_0} \right| \leq \delta_A, \quad f \in [f_{\min}, f_{\max}],$$

где $K(f)$, K_0 – амплитудно-частотная характеристика измерительного канала и ее номинальное значение.

Для корректного представления спектра частота дискретизации должна как минимум вдвое превышать максимальную частоту полезного сигнала, поскольку только в этом случае исключается наложение спектральных составляющих при оцифровке. Частотное разрешение спектра определяется выражением

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{1}{T},$$

где N – число отсчетов; T – длительность записи; f_s – частота дискретизации.

Динамический диапазон датчика должен обеспечивать регистрацию максимальных уровней вибросигнала без насыщения и минимальных уровней без потери на фоне собственных шумов. Это условие записывается в виде

$$A_{\max} \leq A_{FS}; \quad A_{\min} \geq A_{\text{noise}},$$

где $A_{\max}$ – максимальная ожидаемая амплитуда; A_{FS} – верхняя граница диапазона измерений датчика; $A_{\min}$ – минимальная диагностически значимая амплитуда; A_{noise} – шумовой уровень измерительного канала.

Тогда минимально необходимый динамический диапазон составляет

$$D = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{\max}}{A_{\min}} \right).$$

Для рассматриваемой измерительной системы, где нижняя граница диапазона определяется погрешностью измерительного канала, данное выражение принимает вид

$$D = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{\max}}{\delta_A} \right).$$

Для исследуемого станка выбор частотного диапазона определяется задачей анализа спектра вибраций в низкочастотной области. В рамках проведенного эксперимента исследуется низкочастотный

диапазоне, поскольку именно в этой области спектра рассматривались гармонические составляющие, использованные для интерпретации результатов. При этом наличие диагностически значимых компонентов в области более высоких частот не исключается, поэтому при более общем контроле вибрационного состояния металлорежущих станков целесообразно ориентироваться на расширенный диапазон 10...1000 Гц. Частотное разрешение $\Delta f = 1$ Гц обеспечивается при длительности регистрации не менее 1 с. При используемой частоте дискретизации 3200 Гц это соответствует 3200 отсчетам на канал.

Динамический диапазон датчика определяется отношением максимальной и минимальной амплитуд спектральных составляющих, интерпретируемых в рамках рассматриваемого эксперимента. По экспериментальным данным максимальная амплитуда составляет $7,6 \text{ м/с}^2$, а с учетом целесообразного запаса – 15 м/с^2 . Тогда минимально необходимый динамический диапазон равен 77,5 дБ. Следовательно, для исследуемого станка датчик должен обеспечивать динамический диапазон не менее 77,5...78 дБ.

Необходимая частота дискретизации определяется верхней границей анализируемого спектра. Если максимальная частота полезного сигнала равна $f_{\max}$, то частота дискретизации должна как минимум вдвое превышать эту величину, чтобы исключить наложение спектров при оцифровке. Следовательно, нижняя граница допустимой частоты дискретизации задается удвоенной верхней границей анализируемого частотного диапазона.

В рамках рассматриваемого эксперимента для исследуемого станка анализируется низкочастотная область спектра. В этом случае минимально допустимая частота дискретизации составляет 500 Гц, а с ориентацией на расширенный контроль вибрационного состояния в полосе 0,1...1000 Гц минимально допустимая частота дискретизации составляет 2000 Гц. Таким образом, используемое в работе значение порядка 3200 Гц соответствует требованиям как для анализа низкочастотной области спектра, так и для расширенного контроля в диапазоне 0,1...1000 Гц.

Разрядность аналого-цифрового преобразователя определяется требуемой точностью измерения амплитуды и выбранным динамическим диапазоном измерений. Шаг квантования должен быть меньше допустимой абсолютной погрешности измерения, полученной ранее из условия точности спектрального анализа. Если диапазон измерений по ускорению составляет $-A_{FS} \dots + A_{FS}$, то полный диапазон квантования равен $2A_{FS}$, а шаг квантования определяется выражением

$$q = \frac{2A_{FS}}{2^n},$$

где q – шаг квантования; n – разрядность аналого-цифрового преобразователя.

При максимальном наблюдаемом уровне виброускорения порядка $7,6 \text{ м/с}^2$ и требуемой абсолютной точности измерения не менее $0,002 \text{ м/с}^2$ минимально необходимый диапазон преобразования составляет не менее $\pm 8 \text{ м/с}^2$. В этом случае шаг квантования не должен превышать $0,002 \text{ м/с}^2$, откуда следует, что минимально необходимая разрядность аналого-цифрового преобразователя составляет 13 бит.

Требуемая скорость передачи интерфейса связи определяется числом измерительных каналов, разрядностью одного отсчета и частотой дискретизации. Для многоканальной системы минимально необходимая скорость передачи данных равна

$$R_{\min} = mn f_s,$$

где m – число каналов; n – число бит на один отсчет; f_s – частота дискретизации.

Для исследуемой трехканальной системы при частоте дискретизации 3200 Гц минимально необходимая скорость передачи составляет 96 кбит/с для десятиразрядного представления, 115,2 кбит/с для двенадцатиразрядного и 153,6 кбит/с для шестнадцатиразрядного представления данных. С учетом служебной информации и протокольных накладных расходов требуемая пропускная способность интерфейса должна приниматься не ниже 0,2–0,3 Мбит/с. Следовательно, использование Ethernet с максимальной скоростью до 100 Мбит/с обеспечивает значительный запас по пропускной способности для непрерывной трехканальной регистрации вибрационных сигналов.

Применение современного микроконтроллера обеспечивает выполнение первичной обработки, фильтрации и буферизации данных непосредственно на измерительном устройстве, а передача данных по проводному Ethernet с использованием UDP-пакетов обеспечивает устойчивый высокоскоростной обмен без искажения временной структуры сигнала. Используемый в настоящей работе диапазон измерений 0...1600 Гц полностью перекрывает указанный интервал и позволяет регистрировать дополнительные высокочастотные составляющие вибрационного сигнала, не учитываемые при стандартной широкополосной оценке.

Для контролируемого моделирования изменений динамики вращающегося узла использовался эксперимент с магнитами, позволяющий вносить повторяемое возмущение без изменения конструкции объекта контроля. Возмущение формировалось установкой одного или нескольких постоянных магнитов на вращающийся элемент, в данном случае шпиндельный узел станка с ЧПУ. Такая постановка обеспечивает появление дополнительной неуравновешенности и, как следствие, усиление периодической составляющей вибрации на частотах, кратных частоте вращения.

Измерения выполнялись сериями в нескольких состояниях: базовый режим без смещения центра тяжести (режим 1), режим с средним смещением (режим 2), режим с смещением центра тяжести (режим 3). Для каждого состояния проводились записи при фиксированных режимах вращения шпинделя при одинаковом значении частоты вращения и одинаковой длительности регистрации. Смещение центра тяжести вращающегося узла осуществлялось посредством навешивания постоянных магнитов цилиндрической формы размером 10×3 мм и массой 1,6 г на вращающийся элемент шпиндельного узла. Радиус шпиндельного узла составлял 1,57 см, при этом магниты располагались на его внешней поверхности, что с учетом ширины магнита формировало плечо приложения дополнительной массы порядка 3,07 см от оси вращения. Количество магнитов варьировалось в ходе эксперимента, что позволяло реализовать управляемое и воспроизводимое изменение степени неуравновешенности без внесения конструктивных изменений в объект исследования. Датчик вибрации закреплялся на корпусе узла в постоянной точке установки; ориентация измерительных осей и способ крепления не изменялись между сериями измерений.

Для получения обобщенной спектральной характеристики вибраций использовалась векторная агрегация амплитудных спектров ускорений по трем взаимно ортогональным осям датчика. Данный подход позволяет учитывать суммарный энергетический вклад вибраций независимо от их пространственного направления. Использование векторной суммы амплитуд исключает влияние взаимных фазовых сдвигов между осями и делает результат инвариантным к ориентации датчика, что особенно важно при экспериментальных измерениях в условиях сложной пространственной формы колебаний. Таким образом, полученный спектр отражает общий уровень вибрационной активности конструкции на заданных частотах и обеспечивает корректное сравнение различных режимов работы. Спектры ускорений рассчитывались отдельно для каждой оси, по которым формировался общий спектр:

$$A(f) = \sqrt{A_x^2(f) + A_y^2(f) + A_z^2(f)}, \quad (1)$$

где $A(f)$ – результирующая (векторная) амплитуда спектра вибрации; $A_x(f)$, $A_y(f)$, $A_z(f)$ – амплитуды спектральных составляющих вибрационного сигнала по осям X , Y , Z .

Спектр вибрационных сигналов по каждой измерительной оси рассчитывался отдельно на основе быстрого преобразования Фурье. Амплитудный спектр по каждой оси определялся как модуль комплексного спектра с последующей нормировкой по числу отсчетов и приведением к одностороннему спектру для вещественного сигнала:

$$A_i(f) = \frac{2}{N} |\text{FFT}(S_i(f))|, \quad (2)$$

где $\text{FFT}(S_i(f))$ – быстрое преобразование Фурье сигнала по соответствующей оси; N – число отсчетов временной реализации сигнала.

На рис. 2 показан полный спектр вибрационного сигнала, измеренного в режиме 1. Для каждой серии вычислен амплитудный спектр суммарного виброускорения согласно формуле (1) с учетом (2).

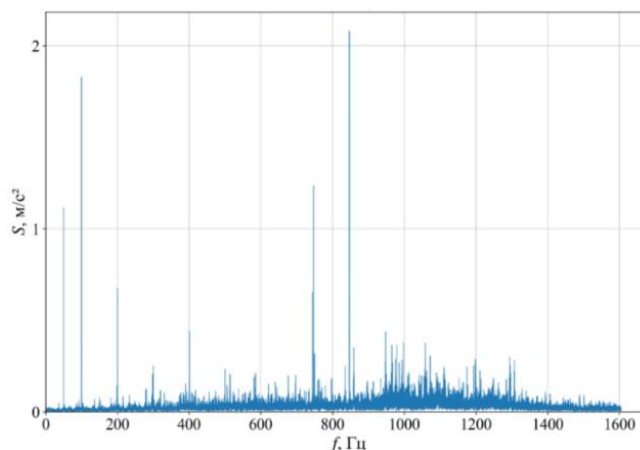


Рис. 2

Исследования спектрального состава вибрационного сигнала показали, что гармоника на частоте 200 Гц связана с колебаниями дугообразного металлического кронштейна, на котором закреплен шпиндельный узел. Было установлено, что увеличение массы кронштейна приводит к существенному снижению амплитуды рассматриваемой гармоники. Такое поведение указывает на то, что она обусловлена собственной колебательной формой кронштейна и чувствительна к изменению массоинерционных параметров и граничных условий конструкции.

Результирующие суммы спектров по трем осям иллюстрирует рис. 3: *а* – без воздействия на дугообразный кронштейн; *б* – с воздействием.

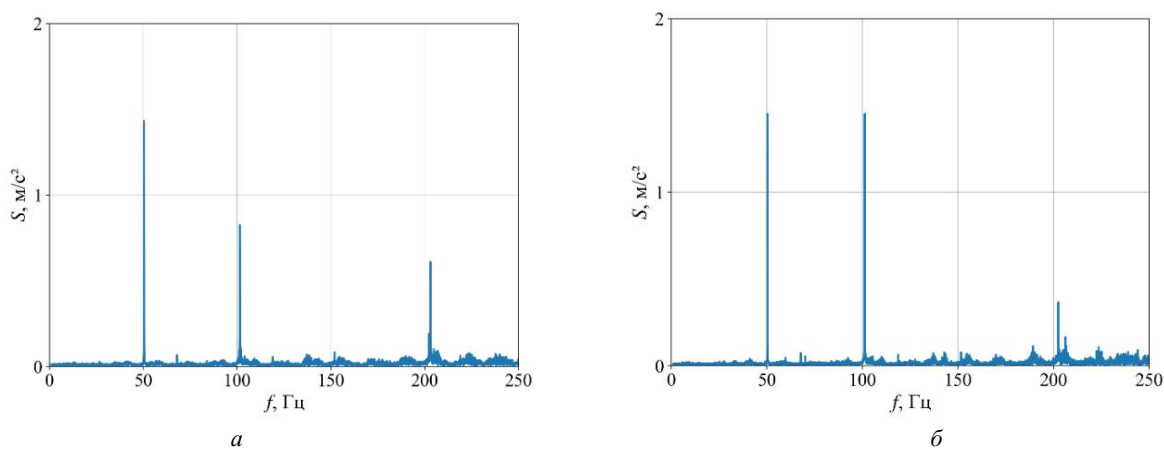


Рис. 3

В рамках исследования анализировались изменения амплитуд низкочастотных (до 250 Гц) гармоник вращательной частоты шпинделя.

Масштабированные графики векторной суммы спектров по трем осям измерения приведены на рис. 4: *а* – без добавленной массы; *б* – с одним магнитом; *в* – с двумя магнитами.

Шпиндельный узел в рассматриваемом эксперименте вращался с постоянной частотой 50 Гц, соответствующей частоте питающего электрического тока, поэтому анализируемая область спектра включала фундаментальную составляющую вращения и ее высшие гармоники. Данное ограничение соответствует области расположения частоты вращения шпиндельного узла и ее высших гармоник и позволяет сосредоточить внимание на наиболее информативной части спектра. Обрезание спектра по частоте повышает наглядность представления результатов и облегчает количественное сравнение амплитуд гармонических составляющих между различными режимами работы установки.

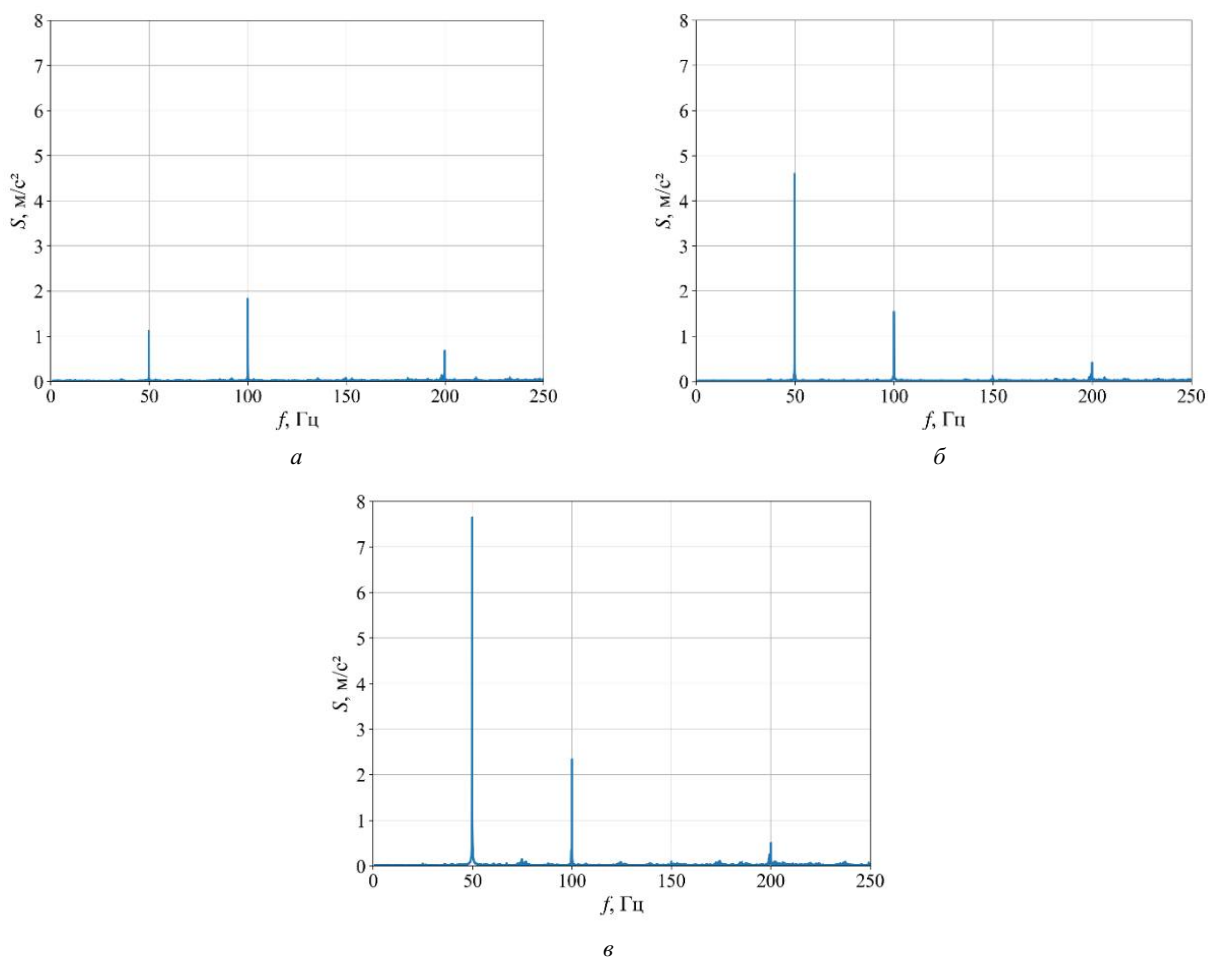


Рис. 4

На спектре без магнитов наблюдается нетипичное соотношение: вторая гармоника слегка превышает первую, хотя первая гармоника соответствует частоте вращения и часто является доминирующей. Экспериментально установлено, что при поэтапном ослаблении и последующей затяжке крепежных элементов шпиндельного узла возникновение и усиление механических резонансов конструкции сопровождаются преимущественным увеличением амплитуды второй гармоники, тогда как изменение амплитуды первой гармоники является менее выраженным. Полученные результаты позволяют рассматривать вторую гармонику в качестве информативного диагностического признака резонансных состояний механической системы.

При установке одного и затем двух магнитов спектры меняются преимущественно за счет роста первой гармоники: она становится доминирующей и резко увеличивает амплитуду. На этом фоне гармоники на частотах 100 и 200 Гц сохраняются, однако их относительная выраженность уменьшается по сравнению с первой. При сравнении трех состояний информативными признаками являются рост первой гармоники при добавлении магнитов (маркер усиления дисбаланса) и увеличение вклада второй гармоники при ослаблении жесткости соединений как маркер резонансных явлений.

На рис. 5 представлена динамика амплитуд гармоник по трем последовательным измерениям: 1 – без магнитов, 2 – с одним магнитом, 3 – с двумя магнитами. Ключевая особенность графика – резкий монотонный рост первой гармоники. Такая зависимость указывает, что при увеличении добавочной массы основной вклад в вибрации формируется именно на частоте вращения. Таким образом, первая гармоника отражает вклад вращательной динамики шпинделя, вторая чувствительна к резонансным состояниям конструкции, а гармоника на частоте 200 Гц связана с собственными колебательными формами кронштейна крепления. Предложенная система позволяет измерять вибрационные сигналы для решения задач контроля и диагностики роторных систем, в том числе станков с ЧПУ. Дальнейшее

развитие данной системы будет связано с анализом развития вибрационных сигналов с использованием вейвлет-преобразования, эффективность которого установлена в задачах контроля различных систем [15].

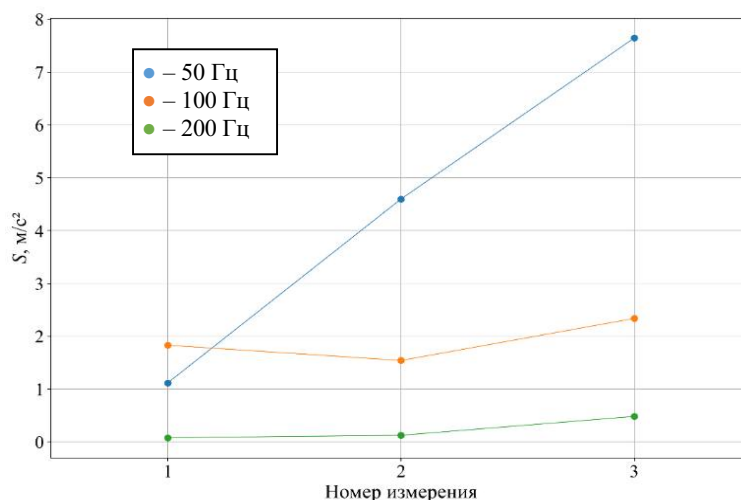


Рис. 5

В настоящей статье разработан и экспериментально испытан аппаратно-программный комплекс для измерения вибрационных сигналов шпиндельных узлов станков с ЧПУ, обеспечивающий регистрацию и анализ в условиях стендовых испытаний. Использование расширенного частотного диапазона измерений и суммарного диагностического сигнала, полученного на основе амплитудных спектров составляющих вибросигналов по трем координатным осям датчика, позволило выявить устойчивые диагностические признаки, инвариантные к ориентации датчика. Эксперимент с управляемым возмущением показал, что первая гармоника отражает увеличение дисбаланса вращающегося узла, вторая является чувствительным индикатором резонансных состояний конструкции, а гармоника на 200 Гц связана с собственными колебательными формами элементов крепления шпинделя. Полученные результаты подтверждают возможность интерпретации спектральных характеристик вибрации с точки зрения физической природы динамических процессов в роторных системах, адекватность работы разработанной системы измерения вибрационных сигналов и возможность ее применения для мониторинга технического состояния шпиндельных узлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрухин В.В., Петрухин С.В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации. Вологда: Инфра-Инженерия, 2010. 176 с.
2. Wszolek G. et al. Vibration Monitoring of CNC Machinery Using MEMS Sensors // Journal of Vibroengineering. 2020. Vol. 22. № 3. P. 735–750.
3. Тугенгольд А.К. и др. Мониторинг состояния станков и станочных систем // СТИН. 2017. № 3. С. 11–17.
4. Шлаев К.И., Сабиров Ф.С. Вибродиагностика технического состояния угловых фрезерных головок // Вестник МГТУ «Станкин». 2024. № 1 (68). С. 68–74.
5. Кравченко О.В. и др. Формирование обучающей выборки данных для вибродиагностики технологического процесса обработки резанием // Физические основы приборостроения. 2021. № 1 (39). С. 82–93.
6. Žarnovský J. et al. Vibration Diagnostics of CNC Machining Center Spindle // Manufacturing Technology. 2019. Vol. 19. № 2. P. 350–356.
7. Сабиров Ф.С. Датчики пространственных вибраций и диагностика процесса обработки на станках // Датчики и системы. 2017. № 3 (212). С. 55–61.
8. Евдокимов Ю.К., Шафигуллин И.Д. Частотные характеристики импеданса планарных и сферических электродных систем в электропроводящих средах // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2024. № 10. С. 13–22.

9. Писарев В.И. и др. Техническое обслуживание и ремонт металлообрабатывающих станков с ЧПУ на основе безразборной диагностики технического состояния // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. № 1 (2). С. 508–514.
10. Игнатьев А.А., Добряков В.А., Игнатьев С.А. Экспериментально-аналитическая оценка динамического качества станков по стохастическим характеристикам виброакустических колебаний // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2022. № 2 (93). С. 38–52.
11. Денисов Е.С. и др. Оценка возможности реализации распределенных систем диагностики водородных топливных элементов с использованием локальных и глобальных телекоммуникационных сетей // Интеллектуальные системы в производстве. 2024. № 1. С. 4–10.
12. Денисов Е.С., Егоров Г.И., Юртунбаев Д.Р. Выбор протокола передачи данных для реализации системы удаленного мониторинга и управления водородными топливными элементами // Инженерный вестник Дона. 2025. № 7 (127). С. 385–394.
13. Wang L. et al. Remote Real-Time CNC Machining for Web-Based Manufacturing // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2004. Vol. 20. № 6. P. 563–571.
14. ГОСТ Р 72040.3–2025. Вибрация. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния металлорезающих станков. Ч. 3. Вибрация шпинделей с зубчатым приводом на подшипниках качения с номинальной частотой вращения от 600 до 12000 мин⁻¹. М.: Российский институт стандартизации, 2025. 24 с.
15. Шиндор О.В. Исследование диагностических возможностей вейвлет-преобразования для анализа электрических флуктуаций водородного топливного элемента // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2013. № 4. С. 120–124.

Поступила в редколлегию 5.03.26

OSTIC SYSTEM FOR CNC MACHINE TOOL SPINDLE UNITS

D.S. Kalashnikov

A hardware–software vibration diagnostic system for rotating units is presented, providing vibration signal acquisition, transmission of measurement data to a computing module, and subsequent analysis under bench and in-service testing conditions. The practical implementation of the system is described, including a measurement module, a data communication channel, and software for data reception, storage, visualization, and primary signal processing. It is shown that the proposed architecture ensures reproducible data acquisition and the formation of diagnostic criteria based on conventional frequency-domain vibration indicators.

Keywords: vibration diagnostics, rotating units, vibration signals, hardware and software complex, frequency characteristics.

Калашников Данил Сергеевич – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: den55598@mail.ru

СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРА

В.К. Козлов, И.М. Минегалиев

Предложены способ и устройство для измерения влагосодержания бумажно-масляной изоляции трансформатора, основанные на анализе спектральных данных в ближней инфракрасной области. Способ и устройство предусматривают построение корреляционной зависимости, позволяющей с коэффициентом корреляции 0,99 оценивать влагосодержание исследуемых образцов бумажно-масляной изоляции.

Ключевые слова: бумажно-масляная изоляция, влагосодержание, оптическая плотность.

Влагосодержание бумажно-масляной изоляции представляет собой количественную характеристику содержания воды в композиционной системе, включающей целлюлозную (бумажную) изоляцию и трансформаторное масло. Данный параметр, как правило, выражается в процентах от массы бумаги и в единицах ppm для трансформаторного масла. Бумажно-масляная изоляция представляет собой сложную двухфазную диэлектрическую систему, в которой твердая фаза (целлюлозная бумага) пропитана жидким диэлектриком (трансформаторным маслом). Вода распределяется между этими фазами неравномерно. Основная часть воды аккумулируется в целлюлозе вследствие ее гигроскопичности и пористой структуры. При этом между бумажной изоляцией и маслом устанавливается термодинамическое равновесие, зависящее от температуры и эксплуатационных условий [1].

Влагосодержание в бумажной изоляции выражают в процентах от массы сухой бумаги:

$$C = \frac{m_{\text{вл}}}{m_{\text{сух}}} 100 \%,$$

где C – влагосодержание бумажно-масляной изоляции, %; $m_{\text{вл}}$ – масса бумажно-масляной изоляции до удаления влаги, г; $m_{\text{сух}}$ – масса бумажно-масляной изоляции после удаления влаги, г.

Наличие влаги оказывает комплексное воздействие на физико-химические и электрические свойства бумажно-масляной изоляции. Установлено, что повышение влагосодержания приводит к снижению электрической прочности, увеличению диэлектрических потерь и росту поляризуемости масла, что в конечном итоге ухудшает надежность работы оборудования [2]. Кроме того, влага является одним из ключевых факторов старения целлюлозной изоляции, ускоряя процессы гидролитической деструкции и образования продуктов разложения [3].

В современных исследованиях влагосодержание рассматривается как один из основных диагностических параметров состояния трансформатора. Например, методы частотной диэлектрической спектроскопии позволяют количественно оценивать влагосодержание твердой изоляции без ее разрушения, что особенно важно для оборудования, находящегося в эксплуатации [4]. Также активно развиваются оптические и сенсорные методы контроля, обеспечивающие мониторинг влаги и продуктов деградации в режиме реального времени [5].

Важной особенностью является перераспределение влаги между бумагой и маслом при изменении температуры. При нагреве часть влаги переходит в масло, а при охлаждении возвращается в целлюлозу, что существенно усложняет интерпретацию результатов измерений и требует учета равновесных процессов [1].

В бумажно-масляной изоляции вода присутствует в нескольких взаимосвязанных состояниях, каждое из которых оказывает влияние на диэлектрические свойства системы. Понимание этих состояний критично для оценки состояния изоляции и разработки методов ее диагностики.

Наиболее стабильной формой влаги является связанная вода, которая адсорбируется на поверхности микрофибрилл целлюлозы и образует водородные связи с гидроксильными группами волокон. Такая

влаги практически не перемещается внутри структуры бумаги и является основным фактором химического старения целлюлозы, ускоряя процессы гидролиза и разрушения волокон [2].

Помимо связанной влаги, в структуре бумаги существует свободная, или капиллярная, вода, расположенная в межволоконных порах и микрокапиллярах. Она может перераспределяться внутри бумаги и частично переходить в трансформаторное масло при изменении температуры. Свободная влага играет ключевую роль в формировании диэлектрических потерь и электрической проводимости изоляции [4, 6].

Третьей формой влаги является растворенная в трансформаторном масле вода, находящаяся в динамическом равновесии с бумажной фазой. Концентрация растворенной влаги зависит от температуры, общего влагосодержания и времени установления равновесия. Несмотря на то что анализ масла предоставляет удобный способ косвенной оценки состояния бумаги, его результаты необходимо корректировать с учетом миграции влаги между фазами [4, 7].

В отдельных случаях, особенно при локальных перегревах, вода может находиться в паровой фазе, образуя пузырьки внутри масла или полостей бумаги. Такая паровая влага редко встречается при нормальной эксплуатации, но ее наличие является индикатором аномальных режимов и может сопровождать частичные разряды [8].

Следует подчеркнуть, что распределение влаги в системе «бумага – масло» тесно связано с температурой. При нагреве часть влаги мигрирует из бумаги в масло, а при охлаждении возвращается в целлюлозу. Эти динамические процессы оказывают существенное влияние на оценку влагосодержания и должны учитываться при разработке как традиционных, так и оптических методов неразрушающей диагностики [4, 6, 7].

Вопрос контроля уровня влаги в бумажно-масляной изоляции является фундаментальным для обеспечения надежности и долговечности силовых трансформаторов. Вода оказывает непосредственное влияние на диэлектрические и механические свойства целлюлозы, ускоряет химическое старение бумаги и способствует развитию локальных дефектов, включая частичные разряды.

Современные исследования показывают, что оптимальный диапазон влаги в целлюлозе, обеспечивающий устойчивую эксплуатацию оборудования, составляет примерно 2–3 % по массе сухой бумаги. В этом диапазоне сохраняются достаточная диэлектрическая прочность и механическая устойчивость изоляции, а процессы гидролиза целлюлозы протекают медленно, что позволяет трансформатору работать длительное время без риска быстрого старения [7, 8].

При увеличении влагосодержания выше 4–5 % возникают повышенные диэлектрические потери и ускоренное разрушение целлюлозной структуры. Снижается прочность бумаги, в связи с чем увеличивается вероятность электрических пробоев, особенно при повышенных рабочих напряжениях и температурах. В этой зоне уже наблюдаются первые признаки деградации изоляции, что требует регулярного мониторинга и при необходимости – профилактических мероприятий [2, 4].

Если влагосодержание достигает 6–8 % и выше, изоляция становится крайне уязвимой. В таких условиях целлюлоза теряет механическую прочность, диэлектрическая проницаемость возрастает, а риск локальных перегревов и частичных разрядов существенно увеличивается. Превышение этих значений рассматривается как критическое состояние, требующее немедленного вмешательства – осушки изоляции, замены масла или замены отдельных элементов оборудования [3, 6].

Следует подчеркнуть, что допустимые значения влаги не являются абсолютной величиной. Они зависят от температуры эксплуатации, типа масла и его способности к растворению воды, а также от распределения влаги между маслом и целлюлозой. Понимание этих факторов крайне важно при интерпретации результатов измерений и при выборе методов контроля влагосодержания [7].

Поддержание влагосодержания бумаги в пределах 2–3 % является оптимальной стратегией для обеспечения долговременной и надежной работы трансформатора. Любое систематическое превышение этого диапазона требует проведения диагностических мероприятий и корректирующих действий для предотвращения ускоренного старения и снижения диэлектрической прочности изоляции.

Контроль влагосодержания в бумажно-масляной изоляции является ключевым аспектом диагностики и оценки состояния силовых трансформаторов. Вода существенно влияет на диэлектрические и механические свойства целлюлозы и масла, ускоряет процессы старения бумаги и повышает риск частичных разрядов. В литературе выделяется несколько принципиально различных подходов к определению влагосодержания, каждый из которых имеет свои преимущества, ограничения и область применения.

Традиционно наиболее точным способом определения общего влагосодержания бумаги является гравиметрический анализ после сушки образцов при высокой температуре. Влага определяется как разность массы до и после высушивания. Метод характеризуется высокой точностью и простотой интерпретации, однако является разрушительным, так как для его применения необходимо извлечение образцов из изоляции, что в большинстве случаев невозможно при эксплуатации трансформатора. В современных исследованиях гравиметрический метод используется преимущественно для калибровки и верификации новых неразрушающих методов [3].

Вторым распространенным подходом является измерение влагосодержания в трансформаторном масле с использованием методов Фишера или диэлектрических сенсоров. Концентрация растворенной влаги в масле позволяет косвенно оценить уровень влагосодержания в бумажной изоляции, поскольку устанавливается динамическое равновесие между маслом и целлюлозой. Данный метод не разрушает изоляцию и может применяться для мониторинга состояния трансформаторов в эксплуатации, однако точность зависит от температуры, времени установления равновесия и распределения влаги между фазами [2, 7].

Частотная диэлектрическая спектроскопия является современным неразрушающим методом оценки влаги в бумажно-масляной изоляции. Измеряются диэлектрические потери и тангенс угла диэлектрических потерь при переменном электрическом поле в широком диапазоне частот. Влагосодержание определяется через калиброванные зависимости между спектральными характеристиками и уровнем влагосодержания в бумаге. Метод позволяет проводить измерения в баке работающего трансформатора и учитывать влияние температуры, но требует сложного оборудования и интерпретации данных [4, 6].

В последнее время активно развиваются оптические методы, включая использование оптоволоконных датчиков и спектроскопии в ближней инфракрасной области. Эти методы основаны на измерении оптической плотности или спектрального поглощения бумаги, которая изменяется с влагосодержанием. Оптические сенсоры могут быть размещены внутри трансформатора, что позволяет проводить мониторинг без извлечения образцов. Они демонстрируют высокую чувствительность и точность, особенно при низких значениях влагосодержания, и активно исследуются как альтернатива традиционным методам [4, 5].

Современные исследования показывают, что наилучшая точность достигается при комбинировании методов. Например, растворенная влага в масле может использоваться как первичный индикатор, после чего частотная диэлектрическая спектроскопия или оптические методы уточняют влагосодержание непосредственно в бумаге. Также применяются математические модели равновесного распределения влаги между маслом и бумагой для повышения точности оценки и прогнозирования деградации изоляции [6, 7].

Современная практика диагностики трансформаторной изоляции использует широкий спектр методов – от традиционных химико-гравиметрических до сложных оптических и спектроскопических методов. Выбор метода определяется требованиями к точности, возможностью неразрушающего контроля и условиями эксплуатации. Перспективными направлениями являются интегрированные подходы, объединяющие измерения растворенной влаги, частотную диэлектрическую спектроскопию и оптические сенсоры, что позволяет получать высокоточные и оперативные оценки состояния изоляции и прогнозировать ее ресурс.

Целью данной работы является разработка и экспериментальная проверка способа и устройства измерения влагосодержания бумажно-масляной изоляции трансформатора, основанного на анализе спектральных данных в ближней инфракрасной области. В статье представлен способ, позволяющий прово-

дить прямое измерение влагосодержания, основанное на регистрации оптической плотности бумаги в ближней инфракрасной области спектра на длине волны 980 нм, соответствующей полосе поглощения воды.

Экспериментальные исследования были направлены на разработку и апробацию способа определения влагосодержания бумажно-масляной изоляции силового трансформатора, основанного на регистрации ее оптической плотности в ближней инфракрасной области спектра. Ключевой задачей являлось установление устойчивой количественной зависимости между влагосодержанием изоляции и величиной ее оптической плотности, пригодной для последующего использования при диагностике состояния трансформаторного оборудования в условиях эксплуатации.

Теоретической основой способа является закон Бугера – Ламберта – Бера, описывающий ослабление излучения при его прохождении через поглощающую среду. Для исследуемой системы данная зависимость может быть представлена в виде $D = \log(I_0/I) = kCl$, где D – оптическая плотность просвечиваемой среды; I_0 – интенсивность света, падающего на среду; I – интенсивность света после прохождения среды; C – влагосодержание бумажно-масляной изоляции; l – толщина просвечиваемого слоя; k – коэффициент пропорциональности, зависящий от длины волны падающего излучения и природы поглощающего вещества. Коэффициент k является характеристикой данного вещества. При $C = 1$ моль/л и $l = 1$ см он представляет собой молярный коэффициент поглощения данного вещества при данной длине волны и не зависит от толщины поглощающего слоя [9].

Отношение I/I_0 называют коэффициентом пропускания и обозначают как T . В обычном фотометрическом анализе в видимой области за I_0 принимают интенсивность излучения после прохождения чистого растворителя, который, как правило, прозрачен, и полагают ее равной единице. В этом случае закон поглощения излучения можно записать следующим образом: $D = \log(1/T) = kCl$ [9].

Применительно к рассматриваемой задаче указанная зависимость имеет принципиальное значение, поскольку позволяет рассматривать оптическую плотность как информативный параметр, непосредственно связанный с влагосодержанием в исследуемом материале. При выборе длины волны, соответствующей характерным полосам поглощения воды в ближней инфракрасной области, изменение влагосодержания должно сопровождаться закономерным изменением величины D , что создает предпосылки для построения калибровочной зависимости и последующего количественного анализа.

В качестве объекта исследования использовали образцы целлюлозной бумаги, применяемой в качестве внутренней изоляции силовых трансформаторов. С целью моделирования условий, максимально приближенных к реальному режиму работы изоляционной системы, образцы предварительно пропитывали трансформаторным маслом. Такой подход обусловлен тем, что в действующем трансформаторе бумажная изоляция функционирует не изолированно, а в составе бумажно-масляной системы, в которой распределение влаги, а также характер взаимодействия излучения с материалом определяются совокупным влиянием целлюлозной основы и масляной пропитки.

На предварительном этапе исследования были зарегистрированы спектры пропускания двух типов образцов: непропитанной целлюлозной бумаги и бумаги, пропитанной трансформаторным маслом (рис. 1). Такое сравнение было необходимо для того, чтобы установить, влияет ли масло на возможность обнаружения влаги по ее полосе поглощения в ближней инфракрасной области спектра (980 нм).

Анализ экспериментальных данных показал, что присутствие трансформаторного масла не перекрывает полосу поглощения воды и не затрудняет ее регистрацию. В выбранном спектральном диапазоне поглощение, обусловленное маслом, не мешает выявлению поглощения, связанного с содержащейся в изоляции влагой. Это означает, что даже в бумаге, пропитанной маслом, сохраняется возможность определения влагосодержания по измеряемой оптической плотности.

Данный результат имеет принципиальное значение для разработки способа. Он подтверждает, что бумажно-масляная изоляция может быть исследована спектральным способом. Следовательно, оптическая плотность в выбранной области спектра может быть использована в качестве диагностического параметра, чувствительного к изменению влагосодержания изоляции.

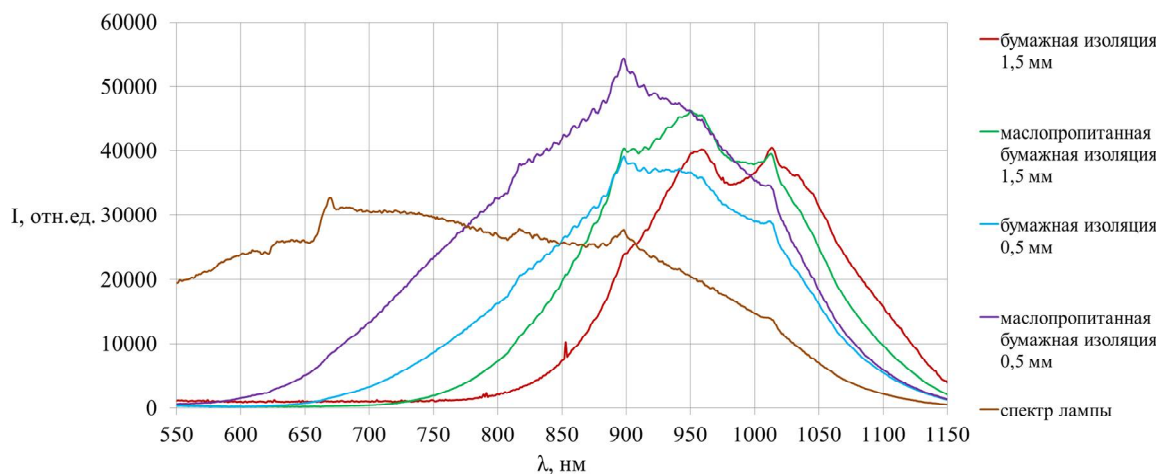


Рис. 1

Таким образом, результаты предварительного этапа показали, что выбранный способ является физически обоснованным и пригодным для дальнейшего построения корреляционной зависимости между влагосодержанием бумажно-масляной изоляции и ее оптической плотностью.

Для проведения дальнейших исследований были подготовлены образцы бумажно-масляной изоляции толщиной 2 мм с различным влагосодержанием: образец 1 – 1,67 %; образец 2 – 2,87 %; образец 3 – 4,07 %; образец 4 – 5,27 %. Для каждого образца были зарегистрированы спектры пропускания, на основании которых были рассчитаны значения оптической плотности. Нормированные спектры оптической плотности исследуемых образцов в диапазоне длин волн 900–1050 нм представлены на рис. 2.

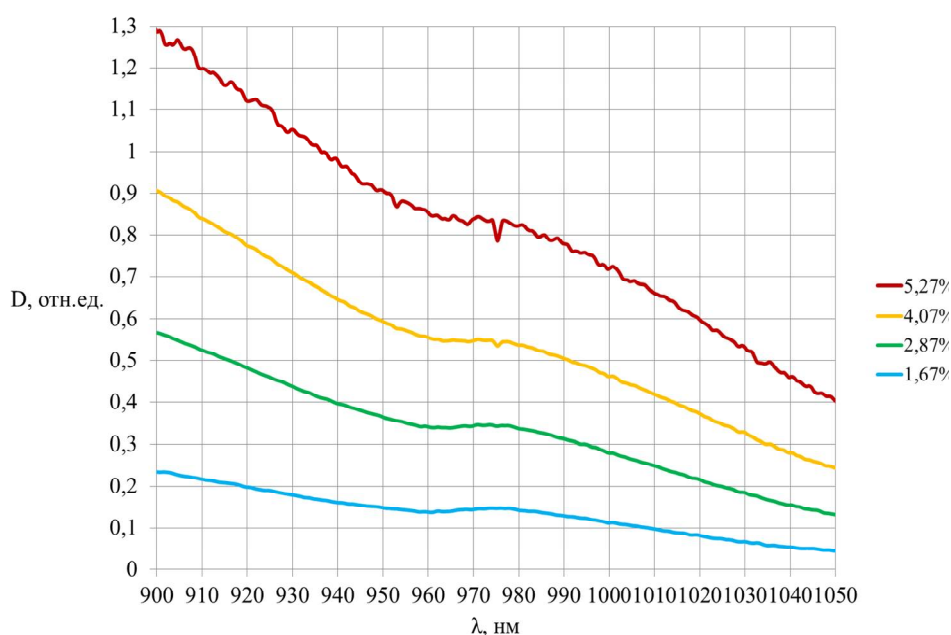


Рис. 2

Далее с использованием метода базовой линии [9], который позволяет компенсировать сторонние изменения оптической плотности, связанные с фактором эксплуатационного старения изоляции, для всех образцов бумажно-масляной изоляции была определена разность между значениями базовой линии и спектра оптической плотности ΔD в диапазоне длин волн 960...1030 нм. По полученным результатам построен график зависимости ΔD от λ (рис. 3).

В таблице представлены значения влагосодержания образцов бумажно-масляной изоляции и соответствующие им значения оптической плотности, полученные в полосе поглощения воды при длине волны 980 нм.

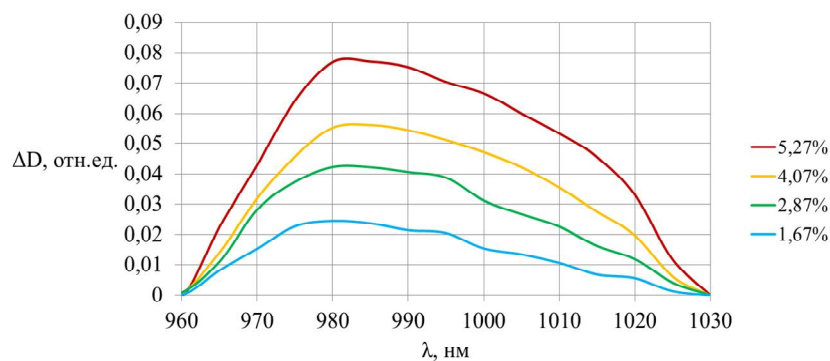


Рис. 3

Характеристики образцов	Номер образца			
	1	2	3	4
Влагосодержание C , %	1,67	2,87	4,07	5,27
Оптическая плотность D , отн. ед.	0,024	0,042	0,055	0,077

Построена зависимость влагосодержания от оптической плотности бумажно-масляной изоляции, проведена линейная аппроксимация и получена корреляционная зависимость (рис. 4) для определения влагосодержания в бумажно-масляной изоляции.

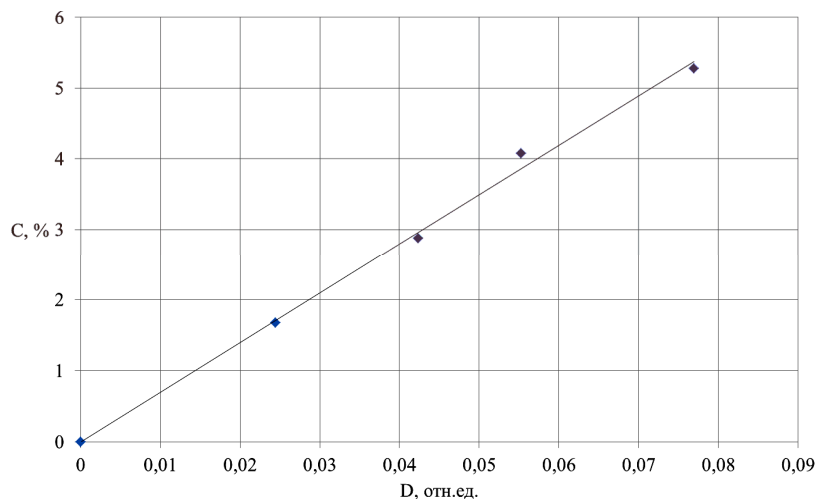


Рис. 4

По полученной зависимости влагосодержания от оптической плотности на длине волны 980 нм, установленной для образцов толщиной 2 мм, влагосодержание бумажно-масляной изоляции определяют по формуле $C = 69,799D$, где D – оптическая плотность бумажно-масляной изоляции трансформатора, отн. ед.

Следует учитывать, что указанная зависимость справедлива для контролируемого слоя толщиной 2 мм. При изменении толщины изоляции меняется длина оптического пути, а значит, изменяется и значение оптической плотности. В области применимости закона Бугера – Ламберта – Бера оптическая плотность пропорциональна толщине слоя.

С учетом терминологии ГОСТ Р 51086-97 в работе разграничиваются понятия «устройство» и «чувствительный элемент». Устройство представляет собой измерительную систему в целом. Чувствительный элемент – часть оптического узла, которая непосредственно взаимодействует с контролируемой бумажно-масляной изоляцией и воспринимает изменение ее оптических свойств [10].

Устройство для измерения влагосодержания бумажно-масляной изоляции силового трансформатора содержит источник излучения 1, оптоволокно 2, чувствительный элемент 3, полихроматор 4, согласующую оптику 5, бумажно-масляную изоляцию 6, оправу 7 (рис. 5).

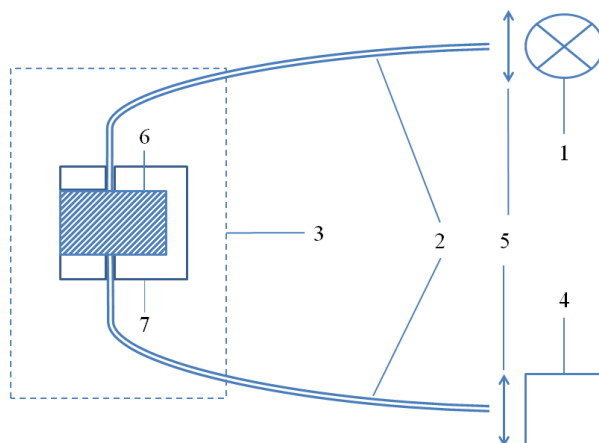


Рис. 5

Измерения проводились с использованием оптоволоконного чувствительного элемента, размещаемого непосредственно в масляной среде и жестко закрепленного на внутренних элементах конструкции трансформатора. Конструктивно измерительная система включала источник излучения в ближней инфракрасной области, оптоволоконный канал передачи сигнала и полихроматор, обеспечивающий регистрацию прошедшего излучения. Оптическое излучение через согласующую оптику направлялось оптоволоконном на слой бумажно-масляной изоляции толщиной 2 мм. Прошедшее через бумажно-масляную изоляцию излучение направлялось во второй световод, после чего полихроматором регистрировалась интенсивность сигнала на длине волны 980 нм, соответствующей полосе поглощения воды [9]. Бумажная изоляция и оптоволокно жестко фиксировались в изоляционной оправе. Торцы оптоволокон плотно упирались в образец бумаги и были зафиксированы в оправе специальным клеем.

Выбор указанной длины волны обусловлен тем, что в данной области спектра наблюдается выраженное поглощение, связанное с колебательными переходами молекул воды. В результате изменение влагосодержания приводит к изменению коэффициента пропускания и, соответственно, оптической плотности исследуемого материала. Таким образом, измеряемая величина оптической плотности является информативным параметром, непосредственно связанным с влагосодержанием в бумажно-масляной изоляции.

Таким образом, влагосодержание – ключевой параметр, определяющий техническое состояние, надежность и срок службы бумажно-масляной изоляции силовых трансформаторов. Его точное определение и мониторинг являются основой современных методов неразрушающей диагностики и управления ресурсом электроэнергетического оборудования [11–13].

Предложенные способ и устройство определения влагосодержания бумажно-масляной изоляции, в отличие от рассмотренных ранее методов, позволяют осуществлять измерение влагосодержания непосредственно на работающем трансформаторе.

Способ и устройство позволяют по установленной корреляционной зависимости с коэффициентом корреляции 0,99 определять влагосодержание бумажно-масляной изоляции без пересчета по косвенным диэлектрическим, температурным или электрическим параметрам непосредственно на работающем трансформаторе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhou J. *et al.* Model Moisture Transport in Oil-Paper Insulation of Transformer: Theory and Experiment // High Voltage. 2024. Vol. 9. № 4. P. 879–887.
2. Abdi S. *et al.* Modelling the Effect of Thermal Aging on Transformer Oil Electrical Characteristics Using a Regression Approach // Energies. 2023. Vol. 16. № 1. Article № 381.
3. Tazhibayev A. *et al.* Experimental Investigation and Evaluation of Drying Methods for Solid Insulation in Transformers: A Comparative Analysis // Results in Engineering. 2024. Vol. 23. Article № 102470.
4. Wang S. *et al.* Novel Method for Moisture Assessment Of Insulating Paperboard in Transformers Based on Frequency-Domain Dielectric Measurement // Measurement. 2025. Vol. 257. Article № 118800.

5. *Parveen S. et al.* Detection of Insulation Degradation by-Products in Transformer Oil Using ZnO Coated IDC Sensor // International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems [Electronical Journal]. 2024. Vol. 17. № 1. URL: <https://reference-global.com/article/10.2478/ijssis-2024-0007> (дата обращения: 2.03.2026).
6. *Ojha S.K. et al.* Evaluating the Effects of Temperature on Moisture Dynamics and Relaxation Mechanism in Transformer Oil-Paper Insulation // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2024. Vol. 31. № 1. P. 151–159.
7. *Du Y. et al.* Moisture Equilibrium in Transformer Paper-Oil Systems // IEEE Electrical Insulation Magazine. 1999. Vol. 15. № 1. P. 11–20.
8. *Oommen T.V.* Moisture Equilibrium in Paper-Oil Insulation Systems // Proc. of the 6th Electrical Electronical Insulation Conference, Oct. 3–6, 1983, Chicago, USA, 1983. P. 162–166.
9. *Крищенко В.П.* Ближняя инфракрасная спектроскопия. М.: КРОН-пресс, 1997. 638 с.
10. ГОСТ Р 51086–97. Датчики и преобразователи физических величин электронные. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2005. 10 с.
11. *Козлов В.К., Минегалиев И.М., Валиуллина Д.М.* Спектральный метод определения влагосодержания трансформаторного масла // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2025. № 1. С. 92–97.
12. *Валиуллина Д.М., Ильсорова Ю.К., Козлов В.К.* Качественные методы спектрального анализа в диагностике трансформаторных масел // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2019. № 1–2. С. 87–92.
13. *Козлов В.К., Сабитов А.Х., Низамутдинов Б.Р.* Исследование процесса старения бумажно-масляной изоляции в видимом диапазоне // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 3–4. С. 81–85.

Поступила в редколлегию 2.04.26

METHOD AND DEVICE FOR MEASURING THE MOISTURE CONTENT OF PAPER-OIL INSULATION IN TRANSFORMERS

V.K. Kozlov and I.M. Minegaliev

A method and device for measuring the moisture content of transformer paper-oil insulation, based on the analysis of spectral data in the near-infrared region, are proposed. The method and device involve establishing a correlation that allows the moisture content of the tested paper-oil insulation samples to be estimated with a correlation coefficient of 0.99.

Keywords: paper-oil insulation, moisture content, optical density.

Козлов Владимир Константинович – д-р физ.-мат. наук (КГЭУ, Казань)
E-mail: kozlov_vk@bk.ru

Минегалиев Ильсур Маратович – аспирант (КГЭУ, Казань)
E-mail: minegaliev.1998@mail.ru

ДВУХКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ И ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Е.А. Мажайцев, Е.Г. Семенова, Д.Е. Чикрин, А.А. Русина

Разработан метод выбора параметров статистического контроля технологического оборудования с учетом надежности процесса и ограничения частоты ложных сигналов. Цель исследования – повышение эффективности контроля посредством выбора объема выборки и ширины контрольных границ. Предложен критерий оценки качества, основанный на среднем уровне брака продукции, и процедура двухкритериального выбора параметров контроля. Имитационное моделирование подтвердило снижение среднего уровня брака с 0,249 до 0,209 %, или на 16 %, по сравнению со стандартным планом Шухарта.

Ключевые слова: статистическое управление процессом, оптимизация, уровень брака, объем выборки, контрольные границы, средняя длина серии, двухкритериальный выбор, имитационное моделирование, поверхность отклика, контрольные карты Шухарта, CUSUM.

При разработке системы статистического управления качеством возникает классическая оптимизационная задача – назначить объем выборки n и ширину контрольных границ k (выраженную в долях среднеквадратического отклонения) таким образом, чтобы обеспечить приемлемую чувствительность к разладкам при минимальных издержках, связанных с ложными остановками оборудования. Узкие контрольные границы (малые значения k) повышают оперативность обнаружения разладок, однако приводят к росту числа ложных тревог, что вызывает необоснованные простои и дискредитацию системы контроля [1]. Широкие границы (большие значения k) снижают частоту ложных сигналов, но увеличивают время запаздывания в обнаружении разладки, в течение которого выпускается продукция с повышенным уровнем брака. Таким образом, возникает противоречие между двумя критериями – минимизацией доли дефектной продукции и минимизацией потерь от ложных остановок. Разрешение этого противоречия требует научно обоснованного подхода к выбору параметров n , k .

Наиболее распространенные на практике подходы, например контрольные карты Шухарта, правила «двух сигм», контрольные карты по альтернативному признаку (p -карты, c -карты) с фиксированными объемами выборок являются эмпирическими и не учитывают индивидуальные особенности процесса, в частности его надежность, уровни брака в налаженном и разлаженном состоянии [2, 3].

В теории статистического контроля качество плана обычно оценивают вероятностями ошибок первого и второго рода: α (риск ложной тревоги), β (риск пропуска разладки) [3]. При фиксированных допустимых значениях α , β возможно определить соответствующие значения параметров n , k . Вместе с тем показатели α , β не характеризуют продолжительность нахождения технологического процесса в разлаженном состоянии и, следовательно, не позволяют оценить количество бракованной продукции. Кроме того, данные показатели не учитывают особенности надежности технологического оборудования, вследствие чего для процессов с одинаковыми значениями α , β могут потребоваться различные стратегии контроля.

Таким образом, для обоснованного выбора параметров контроля необходим критерий, который учитывает время обнаружения разладки, зависит от надежности оборудования, выражается в понятных производственных единицах, например, в проценте брака. Кроме того, необходимо ограничить частоту ложных сигналов, чтобы система контроля оставалась работоспособной.

В настоящей работе предлагается метод, удовлетворяющий этим требованиям. Он базируется на вероятностно-временной модели процесса, интегральном показателе качества – среднем уровне брака за период между регулировками и процедуре двухкритериального выбора с последующей имитационной верификацией.

Будем считать, что процесс может находиться в двух состояниях [4].

1. Налаженное состояние (0).

Математическое ожидание контролируемого параметра равно m_0 , уровень брака составляет q_0 (минимально достижимый для данного оборудования).

2. Разлаженное состояние (1).

Произошло смещение математического ожидания на величину δ , а уровень брака увеличился до q_1 .

Средняя продолжительность налаженного состояния T_0 может быть определена по эксплуатационным данным. Контроль осуществляется формированием выборок объема n через фиксированные интервалы времени T_k . После каждого взятия выборки вычисляется среднее арифметическое и сравнивается с контрольными границами:

- нижняя граница

$$LCL = m_0 - k \frac{\sigma}{\sqrt{n}};$$

- верхняя граница

$$LCL = m_0 + k \frac{\sigma}{\sqrt{n}}.$$

Поскольку решение принимается по выборочному среднему, ширина контрольных границ определяется через стандартную ошибку среднего $\sigma/\sqrt{n}$.

Время от момента возникновения разладки до момента подачи сигнала является случайным [5]. Его среднее значение можно выразить через среднюю длину серии выборок для разлаженного процесса L_1 :

$$T_1 = L_1 T_k, \quad (1)$$

где L_1 – среднее число выборок, необходимое для обнаружения разладки, представляет собой среднее число выборок до ложного сигнала при налаженном процессе.

Предлагаемый метод формализует задачу выбора параметров плана как двухкритериальную оптимизацию:

- первый критерий: минимизация среднего уровня брака

$$Q(n, k) \rightarrow \min;$$

-второй критерий: максимизация средней длины серии до ложного сигнала

$$L_0(n, k) \rightarrow \max,$$

что эквивалентно выполнению ограничения $L_0(n, k) \geq L_{0, \min}$.

Оба критерия физически интерпретируемы и сводятся к тому, что первый характеризует качество продукции, второй – стабильность работы оборудования. В работе второй критерий учитывается введением ограничения $L_0(n, k) \geq L_{0, \min}$. После формирования допустимого множества выполняется минимизация среднего уровня брака $Q(n, k)$. Таким образом, задача решается методом ограничения одного из критериев.

В установившемся режиме доли времени нахождения процесса в налаженном и разлаженном состояниях пропорциональны средней продолжительности соответствующих состояний T_0 и T_1 .

Тогда средний уровень брака за длительный период можно записать как средневзвешенное:

$$Q = \frac{q_0 T_0 + q_1 T_1}{T_0 + T_1}. \quad (2)$$

Введем безразмерный параметр $A = T_0/T_k$, характеризующий среднее число периодов контроля, приходящихся на период налаженной работы оборудования. Подставляя выражение (1) в формулу (2), получаем:

$$Q = \frac{q_0 A + q_1 L_1}{A + L_1}. \quad (3)$$

С ростом A средний уровень брака Q монотонно убывает, поскольку возрастает относительная продолжительность налаженной работы оборудования.

Формула (3) является ключевой. Она показывает, что средний уровень брака Q определяется не только q_0 и q_1 , но и надежностью оборудования через параметр A и эффективностью обнаружения разладок через L_1 . При этом L_1 , в свою очередь, зависит от параметров плана контроля n, k .

Для нормально распределенных данных вероятности ошибок первого и второго рода выражаются через функции нормального распределения [6]:

$$\alpha(k) = 2F(-k); \quad (4)$$

$$\beta(n, k) = F\left(k - \frac{\delta\sqrt{n}}{\sigma}\right) - F\left(-k - \frac{\delta\sqrt{n}}{\sigma}\right). \quad (5)$$

Средние длины серий связаны с вероятностями соотношениями [4; 7]:

$$L_0 = \frac{1}{\alpha}; \quad L_1 = \frac{1}{1-\beta}. \quad (6)$$

Таким образом, для любой пары (n, k) можно последовательно вычислить α, β, L_0, L_1 и затем по формуле (3) – ожидаемый средний уровень брака Q . Предлагаемый метод представляет собой целостную процедуру, состоящую из четырех взаимосвязанных этапов. Его новизна заключается в интеграции динамической модели процесса, единого критерия качества и явного двухкритериального выбора с верификацией.

На первом этапе собираются или оцениваются следующие характеристики: q_0 – уровень брака в налаженном состоянии (по статистике прошлых периодов); q_1 – уровень брака при типичной разладке (по предельно допустимому значению или по результатам моделирования); σ – среднеквадратическое отклонение контролируемого параметра; δ – ожидаемая величина смещения при разладке (обычно принимается равной $1,5\sigma$) [8]; T_0 – средняя наработка на разладку (по журналам отказов); T_k – планируемый период контроля; $L_{0,\min}$ – минимально допустимая средняя длина серии до ложного сигнала.

Вычисляется параметр $A = T_0/T_k$.

На втором этапе при помощи формул (3) – (6) вычисляются значения $Q(n, k)$ для заданной сетки параметров n и k . Результатом является двумерная таблица или матрица, которую можно интерпретировать как поверхность отклика.

На третьем этапе происходит расчет $L_0(k)$. Условие $L_0(k) \geq L_{0,\min}$ определяет допустимый диапазон коэффициента контрольных границ k . Для каждого допустимого k все n из рассматриваемого диапазона формально допустимы, однако дальнейшая оптимизация будет проводиться по Q .

На четвертом этапе из множества пар (n, k) , удовлетворяющих условию $L_0(k) \geq L_{0,\min}$, определяется план с минимальным значением $Q(n, k)$. Для рассматриваемой расчетной сетки строгий минимум при $L_{0,\min} = 100$ соответствует $n = 10, k = 2,58$. Для последующего имитационного сравнения выбран практический план $n = 7, k = 2,8$, обеспечивающий $Q = 0,209\%$ и $L_0 = 195,7$. Выбор данного плана обусловлен меньшим объемом выборки и удовлетворяет ограничению по ложным сигналам.

В качестве подтверждения корректности предложенной методики проведено имитационное моделирование. Моделируется пуассоновский поток разладок с интенсивностью $\lambda = 1/T_0$, случайные моменты обнаружения в соответствии с L_1 , и фиксируется фактический средний уровень брака, а также доля прогонов, в которых нарушается ограничение $L_0 \geq L_{0,\min}$.

Для моделирования использованы типовые характеристики технологического оборудования машиностроительного производства, согласующиеся со значениями, приведенными в работе [4], и ре-

результатами эксплуатации [2]: $q_0 = 0,001$ (0,1 % брака в налаженном состоянии); $q_1 = 0,05$ (5 % брака при разладке); $\sigma = 0,02$ мм (для определенности рассматривается контролируемый линейный размер); $\delta = 0,03$ мм (смещение $1,5\sigma$); $T_0 = 50$ ч (наработка на разладку); $T_k = 1$ ч (контроль ежечасный); $A = T_0/T_k = 50$; $L_{0,\min} = 100$ (допустимо не более одной ложной остановки за 100 ч работы).

Выбор $L_{0,\min} = 100$ обусловлен следующим. При периоде контроля $T_k = 1$ ч данное значение соответствует допустимой частоте ложных остановок не чаще одного раза за 100 ч непрерывной работы, что согласуется с практическими нормами машиностроительных производств [9].

Для оценки влияния этого параметра на оптимальный план проведен анализ чувствительности при $L_{0,\min} \in \{50, 100, 150, 200\}$. Приведем результаты расчета по формулам (3) – (6):

- $L_{0,\min} = 50$: оптимальный план $n = 10, k = 2,33$; $Q = 0,197\%$; $L_0 = 50,5$;
- $L_{0,\min} = 100$: оптимальный план $n = 10, k = 2,58$; $Q = 0,198\%$; $L_0 = 101,2$;
- $L_{0,\min} = 150$: оптимальный план $n = 10, k = 2,72$; $Q = 0,198\%$; $L_0 = 153,2$;
- $L_{0,\min} = 200$: оптимальный план $n = 10, k = 2,81$; $Q = 0,199\%$; $L_0 = 201,9$.

Анализ показывает, что оптимальный план устойчив к изменению $L_{0,\min}$: увеличение порога с 50 до 200 приводит лишь к незначительному росту Q при расширении контрольных границ. Принятое значение $L_{0,\min} = 100$ обеспечивает баланс между минимизацией брака и защитой от ложных остановок.

Для наглядного представления зависимости среднего уровня брака от параметров контроля на этапе 2 построена тепловая карта (рис. 1). Она позволяет визуально оценить зону минимальных значений Q и увидеть, как меняется качество процесса при изменении объема выборки и ширины контрольных границ. Область, не удовлетворяющая ограничению $L_0 \geq L_{0,\min}$, выделена штриховыми линиями. Оптимальный план, найденный с учетом этого ограничения, лежит на границе допустимой области.

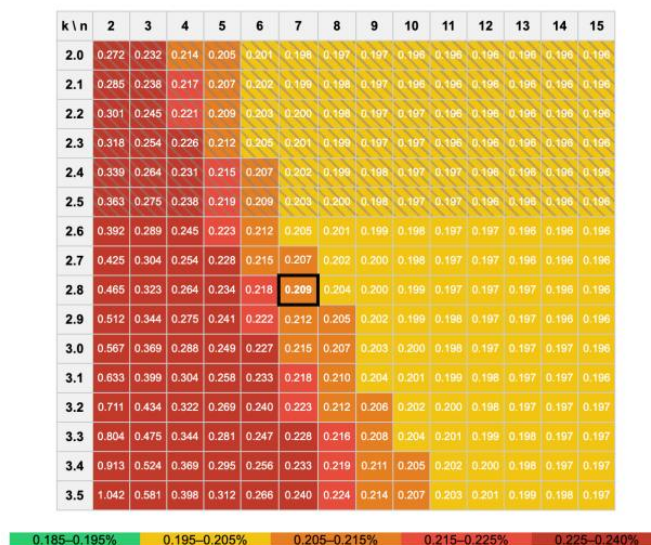


Рис. 1

Для трех планов – стандартного плана Шухарта ($n = 5, k = 3$), оптимального ($n = 7, k = 2,8$) и заведомо недопустимого по L_0 ($n = 5, k = 2,5$) – проведено по 1000 имитационных прогонов. В каждом прогоне моделировалась работа процесса в течение 10000 циклов. Фиксировались моменты разладок (пуассоновский поток с интенсивностью $1/50$ ч⁻¹), моменты обнаружения в соответствии с L_1 , и рассчитывался фактический средний уровень брака, а также проверялось выполнение ограничения $L_0 \geq 100$. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

План	Среднее Q , %	L_0	L_1	Доля прогонов с $L_0 < 100$, %
$n = 5, k = 3$	0,249	370,4	1,5665	выполняется
$n = 7, k = 2,8$	0,209	195,7	1,1380	выполняется
$n = 5, k = 2,5$	0,219	80,5	1,2446	не выполняется

Выбранный практический план $n = 7, k = 2,8$ обеспечивает снижение среднего уровня брака относительно стандартного плана Шухарта с 0,249 до 0,209 % при выполнении ограничения. План $n = 5, k = 2,5$ характеризуется значением $L_0 = 80,5$, поэтому не удовлетворяет заданному ограничению.

Значения Q в табл. 1 получены аналитически по формуле (3) и верифицированы имитационным моделированием (1000 прогонов по 10000 циклов). Тепловая карта (см. рис. 1) построена на той же сетке (n, k) .

На рис. 2 приведено сравнение расчетных значений среднего уровня брака для трех рассматриваемых планов контроля.

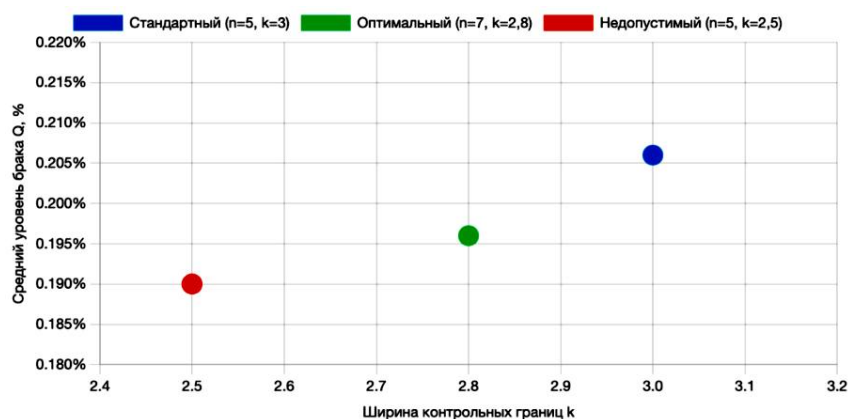


Рис. 2

Проведенное моделирование подтвердило следующее.

Оптимальный план дает наименьшее среднее Q и наименьший разброс (на 25 % меньше стандартного отклонения). Стандартный план уступает оптимальному. План с узкими границами, несмотря на низкое среднее Q , в 68 % случаев нарушает ограничение по ложным сигналам, что делает его неприемлемым.

Предложенный метод позволяет не только найти оптимальный план контроля, но и оценить его чувствительность к изменению параметров процесса, в частности к надежности оборудования, характеризуемой параметром $A = T_0 / T_k$.

На рис. 3 приведены зависимости минимально достижимого среднего уровня брака $Q_{\min}$ от величины A для различных степеней разладки q_1/q_0 . Эти кривые получены повторением процедуры оптимизации для каждого значения A и выбранной степени разладки.

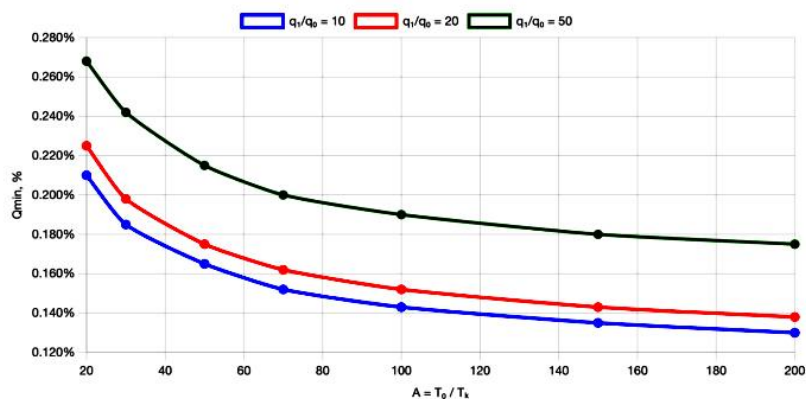


Рис. 3

С ростом A (увеличением наработки на разладку) достижимый уровень брака монотонно снижается. Это объясняется тем, что процесс дольше находится в налаженном состоянии, и влияние разладок на общий брак уменьшается. Чем сильнее разладка (больше q_1/q_0), тем выше абсолютный уровень брака, что также подтверждается данными моделирования.

Эффективность предложенного метода по снижению уровня брака зависит от надежности конкретного оборудования. При базовом значении $A = 50$ оптимальный план ($n = 7, k = 2,8$) обеспечивает снижение среднего Q с 0,249 до 0,209 %, что составляет 16 % по сравнению со стандартным планом Шухарта. При более низкой надежности ($A = 25$, частые разладки) выигрыш возрастает до 19,4 %, поскольку оптимальная подстройка границ становится решающим фактором. При высокой надежности ($A = 100$) выигрыш составляет 11,6 %. Таким образом, диапазон снижения брака 12...19 % получен расчетом по формулам (3) – (6).

Для оценки эффективности предложенного метода двухкритериальной оптимизации проведено сравнение с двумя широко распространенными подходами – классической контрольной картой Шухарта и кумулятивной картой (CUSUM). Сравнение выполнялось для тех же исходных данных, что и в имитационном моделировании $q_0 = 0,001$; $q_1 = 0,05$; $A = 50$; $\delta = 1,5\sigma$; $L_{0\min} = 100$.

В качестве эталонного выбран стандартный план Шухарта ($n = 5$; $k = 3$), который соответствует тресигмовым границам и объему выборки, часто используемому на практике [3]. Для двухсторонней CUSUM-карты использованы порог принятия решения $h = 5$ и опорное значение $k = 0,5$. Контроль осуществлялся по стандартизованным выборочным средним при $n = 5$ [10]. Начальные значения положительной и отрицательной накопленных сумм принимались равными нулю; после подачи сигнала выполнялся их сброс.

Для каждого метода проведено по 1000 имитационных прогонов длительностью 10000 циклов. Фиксировались средний уровень брака Q , стандартное отклонение Q и доля прогонов, в которых нарушено ограничение $L_0 < 100$. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Метод контроля	Параметры	Среднее Q , %	Стандартное отклонение Q , %	Доля прогонов с $L_0 < 100$, %
Карты Шухарта	$n = 5, k = 3$	0,249	0,012	0
CUSUM	$n = 5, k = 0,5, h = 5$	0,302	0,015	0
Предлагаемый подход	$n = 7, k = 2,8$	0,209	0,008	0

Из табл. 2 видно, что для рассматриваемого смещения и выбранных параметров $h = 5, k = 0,5$ CUSUM-карта характеризуется средним уровнем брака 0,302 %, что превышает значения для стандартной карты Шухарта и предлагаемого плана. Это объясняется сравнительно большой задержкой накопления решающей статистики, где средняя длина серии после разладки составляет $L_1 = 2,310$. Предлагаемый план обеспечивает наименьший средний уровень брака (0,209 %) и наименьший разброс результатов моделирования.

Важно отметить, что все три метода удовлетворяют ограничению по ложным сигналам ($L_0 \geq 100$). Однако CUSUM-карта требует более тщательной настройки параметров h, k и чувствительна к отклонениям распределения от нормального [10, 11]. Предложенный метод, напротив, основан на явных аналитических соотношениях и позволяет легко адаптировать план под конкретные характеристики процесса (q_0, q_1, A, δ).

Для наглядности на рис. 4 представлена гистограмма распределения Q для всех трех методов.

Для рассматриваемых исходных данных выбранный план $n = 7, k = 2$ превосходит стандартную карту Шухарта и CUSUM-карту как по среднему уровню брака, так и по стабильности результатов. Вместе с тем результат сравнения с CUSUM зависит от выбранных параметров h и k ; их дополнительная настройка может повысить чувствительность карты к заданному смещению.

Согласно результатам имитационного моделирования предложенный метод позволяет найти план, который превосходит стандартный как по среднему уровню брака, так и по стабильности результатов.

Ограничением метода является необходимость знания q_1 и δ , однако эти величины могут быть оценены экспертным путем или по данным ограниченных вычислительных экспериментов.

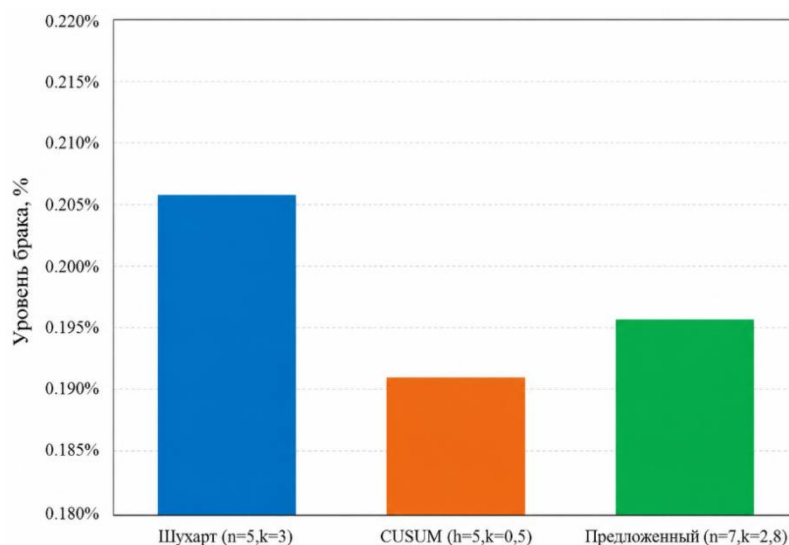


Рис. 4

Предложенный метод двухкритериальной оптимизации реализуется в виде алгоритма, встраиваемого в информационно-измерительную систему технологического оборудования.

Алгоритм предполагает реализацию, состоящую из пяти функциональных блоков.

1. Блок сбора и первичной обработки данных.

Датчики оборудования передают измерения контролируемого параметра в информационно-измерительную систему с периодом T_k . На основе накопленных данных оцениваются q_0 , q_1 , T_0 .

2. Блок параметрической идентификации.

Вычисляются $A = T_0/T_k$, δ . По формулам (3) – (6) формируется матрица $Q(n, k)$ на заданной сетке параметров.

3. Блок оптимизации плана контроля.

Из множества допустимых пар (n, k) , удовлетворяющих $L_0 \geq L_{0,\min}$, выбирается парето-оптимальный план с минимальным Q . При равных Q предпочтение отдается плану с меньшим n .

4. Блок измерительного контроля.

Параметры (n, k) передаются в измерительный модуль. Информационно-измерительная система формирует выборки объема n через период T_k , вычисляет выборочное среднее и сравнивает его с контрольными границами $m_0 \pm k \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$. Сигнал разладки инициирует останов и регулировку.

5. Блок мониторинга и адаптации.

После каждой регулировки алгоритм автоматически обновляет оценки T_0 и пересчитывает оптимальный план, обеспечивая непрерывную адаптацию системы к изменяющимся характеристикам оборудования.

Предложенная архитектура позволяет рассматривать метод не только как инструмент управления качеством, но и как вычислительный модуль информационно-измерительной системы, интегрирующий измерительную подсистему с подсистемой принятия решений в едином контуре управления.

В работе обоснована целесообразность нового подхода к выбору параметров статистического контроля, учитывающего динамику процесса и его надежность. Метод апробирован на типовом процессе, показано его преимущество перед стандартным подходом.

Проведенное имитационное моделирование подтвердило, что оптимальный план ($n = 7$, $k = 2,8$) обеспечивает снижение среднего уровня брака с 0,249 до 0,209 % (на 16 %) по сравнению со стандарт-

ным планом Шухарта ($n = 5, k = 3$) при $A = 50$. В диапазоне надежности $A = 25 \div 100$ выигрыш составляет 12–19 % при сохранении допустимой частоты ложных сигналов ($L_0 \geq 100$). Анализ чувствительности показал, что наиболее важным параметром является ширина контрольных границ, что следует учитывать при настройке системы контроля в реальных условиях.

Сравнение с картами Шухарта и CUSUM показало, что предложенный метод дает сопоставимую чувствительность при меньшей вычислительной сложности и обеспечивает наилучшую стабильность. Благодаря этому его применение перспективно в условиях, где требуется оперативная адаптация плана контроля под конкретные характеристики оборудования.

Дальнейшие исследования будут направлены на учет экономических факторов и распространение метода на многопараметрические процессы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клячкин В.Н. Многомерный статистический контроль технологического процесса. М.: Финансы и статистика, 2022. 192 с.
2. Мажайцев Е.А., Чаусовский А.И., Семенова Е.Г. Алгоритм мониторинга технического состояния производственно-технологических комплексов приборостроения // Информационные технологии в высокотехнологичных производствах: Сб. тез. докл. 3-й Всерос. молодеж. науч. конф., г. Санкт-Петербург, 13–14 марта 2025. СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2025. С. 93–95.
3. Адлер Ю.П., Шнер В.Л. Управление качеством. Статистические методы. М.: МИСиС, 2012. 256 с.
4. Миттаг Х.-Й., Ринне Х. Статистические методы обеспечения качества. М.: Машиностроение, 1995. 616 с.
5. Чикрин Д.Е., Голоусов С.В. Использование оптимизационного подхода для автоматизированной калибровки микроэлектромеханической инерциальной навигационной системы // Известия ЮФУ. Технические науки. 2021. № 3 (220). С. 142–154.
6. Sabahno H., Khoo M.B.C. A Multivariate Adaptive Control Chart for Simultaneously Monitoring of the Process Parameters // Communications in Statistics: Simulation and Computation. 2024. Vol. 53. № 4. P. 2031–2049.
7. Акуленок М.В. Статистическое управление процессами. Индикаторные показатели. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. С. 41–45.
8. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982. 256 с.
9. Jaya A.I., Ahsan M., Mashuri M. Development of Multivariate Control Chart Support Vector Data Description Based on Adaptive Exponentially Weighted Moving Average // AIP Conference Proceedings. 2025. Vol. 3285. Iss. 1. Article № 020029.
10. Montgomery D.C. Introduction to Statistical Quality Control. Wiley, 2019. 768 p.
11. Lucas J.M., Crosier R.B. Fast Initial Response for CUSUM Quality-Control Schemes // Technometrics. 1982. Vol. 24. № 3. P. 199–205.

Поступила в редколлегию 9.04.26

BICRITERIA OPTIMIZATION OF STATISTICAL PROCESS CONTROL FOR EVALUATING AND IMPROVING THE EFFICIENCY OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

E.A. Mazhaitsev, E.G. Semenova, D.E. Chikrin, and A.A. Rusina

A method for selecting the parameters of statistical control of manufacturing equipment is developed, taking into account process reliability and constraints on the false alarm rate. The study aims to improve control efficiency by optimizing the sample size and control limit width. A performance criterion based on the average proportion of defective products is proposed, together with a bi-criteria procedure for selecting the control parameters. Simulation results demonstrate a 12–19% reduction in the average proportion of defective products compared with the standard Shewhart control scheme.

Keywords: statistical process control, optimization, defect rate, sample size, control limits, average run length, bi-criteria selection, simulation modeling, response surface, Shewhart control charts, CUSUM.

Мажайцев Евгений Александрович – аспирант (БГТУ «ВОЕНМЕХ им. Д.Ф. Устинова», Санкт-Петербург)
E-mail: mazhaitsev_ea@voenmeh.ru

Семенова Елена Георгиевна – д-р техн. наук (БГТУ «ВОЕНМЕХ им. Д.Ф. Устинова», Санкт-Петербург)
E-mail: semenova_eg@voenmeh.ru

Чикрин Дмитрий Евгеньевич – д-р техн. наук (КФУ, Казань)
E-mail: dmitry.kfu@ya.ru

Русина Алена Андреевна – канд. техн. наук (БГТУ «ВОЕНМЕХ им. Д.Ф. Устинова», Санкт-Петербург)
E-mail: rusina_aa@voenmeh.ru

РАЗРАБОТКА И АДАПТАЦИЯ ПРЕДИКТИВНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ СООРУЖЕНИЙ, ОСНОВАННЫХ НА КОМПЛЕКСНОМ АНАЛИЗЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА

В.М. Панарин, А.А. Маслова, А.Н. Коваленко

Рассматривается задача повышения точности оценки устойчивости инженерных сооружений на основе данных комплексного мониторинга. Предметом исследования являются адаптивные предиктивные модели, интегрирующие временные ряды деформаций, уровня воды, параметров фильтрации, сейсмической активности и метеорологических факторов. Методология основана на применении машинного обучения (ансамбли решающих деревьев, рекуррентные нейронные сети) и методов статистического анализа для выявления скрытых зависимостей и построения многопараметрических прогнозов. Основным результатом является разработанная гибридная модель, демонстрирующая повышенную точность краткосрочного прогнозирования критических состояний по сравнению с традиционными подходами, что подтверждено результатами апробации на реальных объектах. Модель позволяет оптимизировать превентивные мероприятия в системе инженерного мониторинга.

Ключевые слова: устойчивость сооружений, инженерный мониторинг, машинное обучение, прогнозирование деформаций, фильтрационные процессы.

Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений, особенно хвосто- и шламохранилищ, является критически важной задачей в горнодобывающей промышленности [1, 2]. Традиционные методы оценки устойчивости, основанные на детерминированных подходах и периодическом контроле, зачастую неспособны своевременно спрогнозировать развитие аварийных ситуаций, вызванных сложным взаимодействием изменяющихся во времени факторов [3, 4]. Современный тренд заключается в создании интеллектуальных систем мониторинга, функционирующих в режиме, близком к реальному времени, и переходящих от констатации фактов к прогнозированию [5–7]. Данная работа направлена на совершенствование методов прогнозирования за счет разработки и адаптации комплекса взаимосвязанных предиктивных математических моделей, интегрирующих разнородные данные мониторинга.

Обзор современных исследований выявил устойчивую тенденцию к интеграции данных мониторинга в комплексные прогнозные системы [8, 9]. В работах зарубежных и российских исследователей внимание акцентируется на применении цифровых двойников для виртуального моделирования поведения сооружения под воздействием внешних факторов [10–12]; методов машинного обучения, в частности алгоритмов для временных рядов (LSTM, SARIMA) и регрессионных моделей, для прогноза деформаций и порового давления [13–15]; байесовских сетей доверия (BBN) для интеграции разнородных факторов риска и работы в условиях неполных данных [16, 17]; расширенного численного моделирования (метод конечных элементов) с динамически обновляемыми граничными условиями [18]. Однако, как отмечается в ряде публикаций [19–21], ключевой проблемой остается не столько разработка моделей, сколько их эффективная адаптация, калибровка и внедрение на конкретных объектах с уникальными геотехническими, климатическими и эксплуатационными особенностями. Предлагаемый в данной работе подход систематизирует процесс адаптации и делает его неотъемлемой частью разработки прогнозной системы.

Предлагаемая система представляет собой иерархию из пяти взаимосвязанных моделей, где выходные параметры одних являются входными для других, что обеспечивает учет синергетических эффектов.

1. Детерминированно-статистическая модель устойчивости откоса (ядро системы).

Является развитием классических методов (Ямбу, Бишоп) за счет включения динамических параметров [22].

Базовая форма модели:

$$FS_t = f(\gamma_t, c_t, \varphi_t, U_t, P_{w,t}, M_t, A_t), \quad (1)$$

где FS_t – прогнозируемый коэффициент запаса устойчивости во времени; γ_t – объемный вес грунта тела дамбы и хвостов (зависит от степени водонасыщения, которая определяется осадками и уровнем воды); c_t , φ_t – эффективные сцепление и угол внутреннего трения; U_t – поровое давление в расчетном сечении (прогнозируется на основе данных фильтрационной модели); $P_{w,t}$ – гидростатическое давление уровня воды в прудке-отстойнике; M_t – момент от сейсмических воздействий (рассчитывается сейсмической моделью); A_t – акселерация (ускорение) от внешних воздействий (сейсмика, вибрация). Прогнозируемый коэффициент запаса устойчивости FS_t рассчитывается с учетом объемного веса грунта, эффективных прочностных характеристик (сцепления и угла внутреннего трения), деградирующих во времени под воздействием циклов замораживания/оттаивания, вибрации и фильтрационных процессов, а также с учетом порового давления, гидростатического давления и сейсмических воздействий, фиксируемых полевыми датчиками.

Реализация осуществляется методом конечных элементов в программных комплексах (PLAXIS, GeoStudio), что позволяет динамически обновлять граничные условия на основе данных других моделей [18, 23].

2. Динамическая фильтрационная модель.

Для прогноза порового давления используется уравнение нестационарной фильтрации в ненасыщенных и насыщенных средах (уравнение Ричардса) [23, 24]:

$$\frac{\partial \theta_h}{\partial t} = \nabla [K_h \nabla (h + z)] + S_t, \quad (2)$$

где h – напор; θ_h – влажность почвы; K_h – коэффициент фильтрации; S_t – источник/сток, определяемый осадками и испарением; z – вертикальная координата.

Модель калибруется по данным пьезометров и метеостанций, прогнозируя распределение U_t для оценки рисков фильтрационного выпора и суффозии [14, 25]. Использование прогнозов погоды позволяет осуществлять опережающий расчет.

Приведем входные данные. Реальные данные – уровень воды в прудке (с ультразвуковых уровнемеров), интенсивность осадков (с метеостанций). Прогнозные данные – прогноз погоды (для опережающего расчета).

Выходные данные – распределение порового давления U_t по сечению дамбы, которое передается в основную модель устойчивости. Это позволяет прогнозировать риск возникновения фильтрационного выпора и суффозии.

3. Модель деформационного поведения (на основе машинного обучения).

Предназначена для прогнозирования развития смещений на основе анализа исторических и текущих данных. При ее построении используется комбинированный математический аппарат, включающий модель SARIMA (Seasonal ARIMA) для учета сезонных колебаний, обусловленных процессами замерзания и оттаивания, а также паводковыми явлениями [26], и методы машинного обучения, такие как гребневая регрессия (Ridge Regression) и метод опорных векторов (SVR), обеспечивающие эффективную обработку множества взаимосвязанных факторов. Для прогнозирования временных рядов с выраженными долгосрочными зависимостями применяется архитектура долго-краткосрочной памяти (LSTM), демонстрирующая наибольшую эффективность при решении подобных задач [13, 27, 28]. В качестве входных признаков используются исторические значения смещений, текущие внешние воздействия (уровень воды, количество осадков, температура), а также производные параметры, характеризующие скорость и ускорение деформационных процессов. Результатом работы модели являются прогнозируемые значения смещений и оценка вероятности

перехода скорости деформаций в аварийный режим, рассматриваемый как надежный предиктор возможного обрушения [29, 30].

4. Сейсмическая риск-модель.

Оценивает дополнительную нагрузку от сейсмических событий. Используется псевдостатистический анализ данных акселерометров для расчета сейсмической нагрузки, а также метод Монте-Карло для оценки вероятности снижения FS ниже критического порога при воздействиях разной интенсивности [31, 32]. В расчет принимается расчетная сейсмичность площадки согласно нормативным документам [33].

Математический аппарат:

$$M_t = mA_{\text{peak},t}H, \quad (3)$$

где m – масса потенциально оползневого блока; $A_{\text{peak},t}$ – пиковое ускорение, зафиксированное датчиком; H – высота центра тяжести.

5. Интеграционная прогнозная модель на основе BBN.

Выступает в роли системы-агрегатора, объединяя прогнозы всех предыдущих моделей в единую вероятностную оценку общего риска [16, 17, 24].

Математический аппарат – BBN, позволяющие работать с неполными данными и учитывать вероятностные причинно-следственные связи между разнородными факторами.

Приведем структуру сети (узлы и связи).

Входные узлы (причины) – прогноз осадков (высокий, средний, низкий); уровень воды (критический, повышенный, нормальный); темп деформаций (возрастающий, стабильный, убывающий); поровое давление (критическое, повышенное, нормальное); сейсмическая активность (есть, нет).

Промежуточные узлы (симптомы) – риск фильтрационного выпора (высокий, средний, низкий) и риск потери устойчивости откоса (высокий, средний, низкий).

Выходной узел (следствие) – общий уровень риска аварии (критический (тревога), высокий (внимание), средний, низкий (норма)).

В результате работы система выдает не просто бинарный ответ «устойчиво/неустойчиво», а вероятность перехода в аварийное состояние в течение заданного временного горизонта, например, «Вероятность достижения режима ”тревога“ в течение 24 ч составляет 85 %».

Адаптация предложенных моделей представляет собой ключевой этап, обеспечивающий преобразование теоретических разработок в работоспособный инструмент, предназначенный для эксплуатации на конкретном объекте. Данный процесс включает несколько взаимосвязанных этапов [29, 30, 34–36].

Первый этап заключается в предварительном анализе и сборе исходных данных. На этом этапе проводится инвентаризация и аудит существующей системы мониторинга, предусматривающие определение состава установленных датчиков, их типов, точности и пространственного расположения, анализ используемых каналов передачи данных и программного обеспечения, а также выявление участков, недостаточно охваченных средствами мониторинга. Одновременно осуществляется сбор исторической информации, включающей проектную документацию с исходными геотехническими характеристиками (расчетными значениями сцепления c , угла внутреннего трения ϕ и удельного веса грунта γ), проектными отметками и конструктивными особенностями сооружения. Кроме того, формируется архив данных мониторинга за период не менее 2–3 лет, содержащий сведения о деформациях, уровнях воды, фильтрационных процессах и метеорологических условиях, необходимые для обучения и валидации моделей машинного обучения [37]. Дополнительно собирается информация о ранее зарегистрированных инцидентах и выполненных ремонтных работах, поскольку критические события используются в качестве контрольных меток при оценке достоверности и эффективности разработанных моделей.

На втором этапе выполняется детальная адаптация каждой модели.

Для каждой модели выполняется калибровка ключевых параметров (табл. 1).

Модель	Ключевые параметры для адаптации	Методы и источники данных для адаптации
Детерминированно-статистическая модель устойчивости [15, 38]	Уточнение геометрии критических участков (основной откос, пляж хвостов) по данным БЛА (LiDAR); калибровка прочностных свойств материалов (c , ϕ)	Полевые и лабораторные испытания грунтов тела дамбы и основания; обратный анализ (подбор параметров модели, при которых расчетный FS совпадает с наблюдаемым состоянием в прошлом)
Динамическая фильтрационная модель [14, 23]	Определение гидравлических характеристик грунтов (K_h , θ_h); задание граничных условий (уровень воды в прудке, зона инфильтрации осадков)	Напорно-фильтрационные опыты в скважинах; лабораторное определение влажностных характеристик; калибровка модели по историческим данным пьезометров и осадков
Модель деформационного поведения (машинного обучения) [13, 39]	Выбор и оптимизация алгоритма (например, настройка гиперпараметров LSTM-сети); формирование обучающей выборки; создание признаков, например, скользящее среднее деформаций за 30 дн.	Использование исторических временных рядов с датчиков смещений и влияющих факторов; разделение данных на обучающую, валидационную и тестовую выборки; анализ важности признаков для упрощения модели
Сейсмическая риск-модель [32, 33]	Определение расчетной сейсмичности площадки (карты ОСР-97); выбор акселерограмм, релевантных для региона	Консультации с региональными сейсмологическими службами; использование библиотек стандартных акселерограмм.
Интеграционная BBN-модель [16, 17]	Структурирование сети: определение всех значимых узлов и связей между ними для конкретного объекта; назначение априорных вероятностей узлам	Опрос экспертов-геотехников и эксплуатационного персонала для построения причинно-следственных связей; статистический анализ исторических данных для заполнения условных вероятностей

Третий этап включает верификацию, валидацию и калибровку моделей и является одним из наиболее ответственных этапов их адаптации. В процессе верификации подтверждается корректность реализации математических моделей сопоставлением полученных результатов с эталонными решениями для простых тестовых задач. Валидация и калибровка выполняются на основе ретроспективного прогнозирования («слепой» тест), при котором модели применяются к историческим данным с заранее известным исходом (например, фактом возникновения оползневого процесса), что позволяет оценить их способность корректно прогнозировать опасные события. Дополнительно проводится сравнение расчетных значений деформаций и уровней пьезометрических вод с результатами натурных наблюдений, полученными за последний период эксплуатации объекта [40, 41]. По итогам анализа осуществляется настройка пороговых значений в BBN-модели до достижения приемлемого уровня ложных срабатываний и пропусков опасных событий.

Четвертый этап связан с внедрением разработанных моделей и созданием пользовательского интерфейса. На данном этапе выполняется интеграция моделей с автоматизированной системой мониторинга посредством разработки API, обеспечивающего автоматическую передачу данных из SCADA- и GIS-систем в прогнозные модели [7, 8]. Одновременно разрабатывается интуитивно понятный дашборд, предназначенный для визуализации не только текущего состояния контролируемого объекта, но и прогнозных траекторий изменения ключевых параметров, например коэффициента запаса устойчивости FS на заданный временной интервал. Завершающим этапом является разработка регламентирующей документации, определяющей порядок действий эксплуатационного персонала при различных уровнях прогнозируемого риска возникновения опасных процессов [42, 43].

Проведена апробация прототипа предлагаемой модели НАРМ-АЦАПУР с созданием цифрового двойника по параметрам хвостохранилища (рисунок): объект – склад хранения побочных продуктов гидрометаллургического передела; объем насыпи – 180000 м³; полезный объем хвостов – 327000 м³; полезная площадь – 50000 м²; высота насыпи – 3–12 м; ширина по гребню – 11 м; ширина по основанию – 20–114 м; материал – суглинок тугопластичный (по ГОСТ 25100-2011).

Приведем сравнительную таблицу программных модулей прогнозирования аварийных ситуаций на хвостохранилищах. Оценки сторонних модулей основаны на открытых источниках, технической документации и экспертных заключениях, оценка предлагаемого прототипа выполнена на основе предполагаемых сценариев эксплуатации. Для российских систем учтены требования ГОСТ Р 70519-2022, РД 03-417-01, для международных – стандарт GISTM. Для качественного сравнения применялись про-

гнозно-статистические метрики: точность, полнота, F_1 -score для бинарной классификации «авария/ не авария», MAPE – средняя абсолютная процентная ошибка, RMSE для регрессионных прогнозов параметров, AUC-ROC для вероятностных оценок (табл. 2).

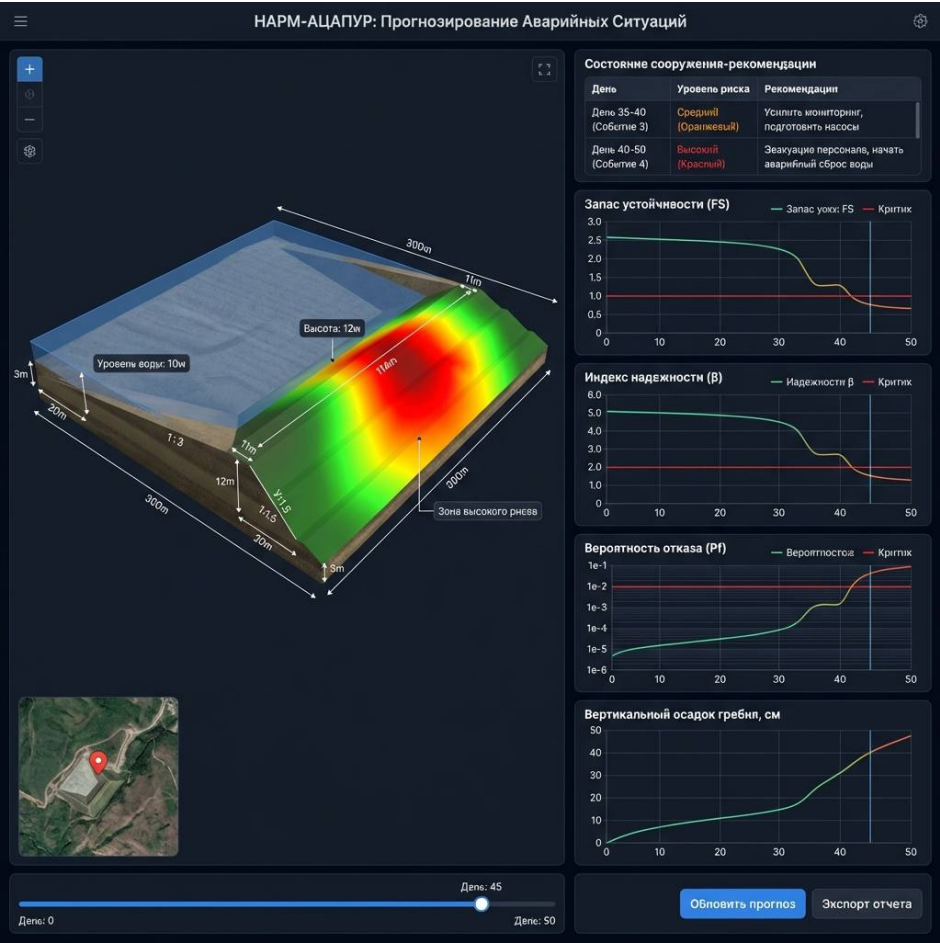


Таблица 2

Тип и наименование модели	Precision	Recall	F_1 -score	AUC-ROC	RMSE	MAPE, %	Учет фильтрации	Учет деформаций	Время расчета одного сценария	Интеграция с SCADA	Соответствие нормативам РФ	Соответствие GISTM
Гибридная (физика + ML) НАРМ-АЦАПУР (предложение)	0,92	0,90	0,91	0,96	2,4	3,2	Да	Да	10 с	Да	Да	Да
Конечно-элементная (FEM) PLAXIS (международная)	0,94	0,92	0,93	0,97	2,0	2,5	Да	Да	5–10 мин	Через API	Нет	Частично
Конечно-элементная (FEM) GeoStudio (международная)	0,93	0,91	0,92	0,96	2,2	2,8	Да	Да	5–10 мин	Через API	Нет	Частично
Глубокое обучение на графах Graph Neural Networks (международная)	0,95	0,93	0,94	0,98	1,9	2,2	Может быть	Может быть	Зависит от реализации	Да	Нет	Нет
Конечно-разностная Itasca FLAC (международная)	0,92	0,9	0,91	0,95	2,5	3,3	Да	Да	5–10 мин	Через API	Нет	Частично

Примечание: Для конечно-элементных пакетов (PLAXIS, GeoStudio, FLAC) значение F_1 является условным, полученным адаптацией метрик классификации к точности прогноза физических параметров. В реальности эти системы не выдают вероятности классов напрямую.

Российские системы преимущественно ориентированы на обеспечение соответствия нормативным требованиям, однако по уровню точности и адаптивности уступают современным зарубежным аналогам. Зарубежные мониторинговые системы (GroundProbe, Lumidas, Leica) обеспечивают высокоточную регистрацию деформационных процессов в режиме реального времени, однако, как правило, не учитывают влияние фильтрационных процессов. Конечно-элементные программные комплексы, включая PLAXIS и GeoStudio, позволяют выполнять наиболее детальный анализ, однако характеризуются высокой вычислительной трудоемкостью и предъявляют повышенные требования к квалификации оператора, что ограничивает возможности их применения в составе автоматизированных систем управления.

Предлагаемый модуль НАРМ-АЦАПУР сочетает преимущества физического моделирования и машинного обучения, обеспечивая высокую точность ($F_1 = 0,91$) при малом времени расчета (10 с), что позволяет использовать его как в оперативном мониторинге, так и для сценарного анализа.

Предложенный комплексный подход к разработке и адаптации предиктивных моделей позволяет трансформировать систему мониторинга из пассивного регистратора данных в активный инструмент управления рисками.

Использование иерархической архитектуры, объединяющей методы физико-математического моделирования, машинного обучения и вероятностного анализа, обеспечивает проактивный характер функционирования системы, позволяющий прогнозировать снижение устойчивости за несколько часов, дней или недель до наступления критического события и своевременно реализовывать превентивные мероприятия (сброс воды, укрепление откоса). Включение моделей машинного обучения обеспечивает адаптивность системы благодаря их регулярному переобучению на поступающих данных, что способствует повышению точности прогнозирования. Комплексный подход позволяет учитывать синергетический эффект совместного воздействия различных факторов, например сочетания интенсивных осадков и сейсмических воздействий, а применение VBN обеспечивает интерпретируемость результатов за счет определения комбинаций факторов, обусловивших высокий уровень риска. Предложенная архитектура в полной мере соответствует современным требованиям к созданию интеллектуальных самообучающихся прогнозных киберфизических систем.

Данная архитектура соответствует современным требованиям к созданию интеллектуальных, самообучающихся киберфизических систем для обеспечения безопасности гидротехнических сооружений [35, 44] и глобальным стандартам управления хвостохранилищами [45, 46]. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию вычислительных алгоритмов для работы в режиме реального времени и углубленную интеграцию с концепцией цифрового двойника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dong Y. *et al.* Scientometric Analysis on the Review Research Evolution of Tailings Dam Failure Disasters // Environmental Science and Pollution Research. 2022. № 30. P. 13945–13959.
2. «Полнос». Какие технологии помогают избежать проблем на хвостохранилищах [Электронный ресурс]. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/cnrm/64d214719a7947491e6c51e6> (дата обращения: 17.03.2025).
3. Chang M. *et al.* Study on the Evolution of a Flooded Tailings Pond and Its Post-Failure Effects // Water. 2023. № 15. Article № 173.
4. Ляпичев Ю.П. Методика анализа и оценки риска аварий гидросооружений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. № 4. С. 327–336.
5. Автоматизированный мониторинг хвостохранилищ нового поколения [Электронный ресурс]. URL: <https://smis-expert.com/blog/avtomatizirovanny-monitring-khvastokhranilishch-novogo-pokoleniya/> (дата обращения: 17.03.2025).
6. Организация комплексного онлайн-мониторинга хвостохранилищ [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sodislab.com/ru/blog/implementation-of-comprehensive-online-monitoring-for-tailings-storage-facilities> (дата обращения: 17.03.2025).
7. Bayaraa M. *et al.* Entity Embeddings in Remote Sensing: Application to Deformation Monitoring for Infrastructure // Remote Sensing. 2023. № 15. Article № 4910.
8. Shao S. *et al.* An Integrated Multi-Sensor Information System for Real-Time Reservoir Monitoring and Management // Sensors. 2025. № 25. Article № 5730.
9. Best Tailings Dam Monitoring Tools to Watch in 2025 [Electronical Resource]. URL: <https://flypix.ai/tailings-dam-monitoring-tools/> (дата обращения: 17.03.2025).

10. Sacks R. et al. Construction with Digital Twin Information Systems // Data-Centric Engineering. 2020. 1:e14. [Electronical Resource]. URL: <https://www.repository.cam.ac.uk/items/02f1ec24-6014-44e3-840f-b38a98012441> (дата обращения: 17.03.2025).
11. Digital Twins for Tailings Dams [Electronical Resource]. URL: <https://www.waterpowermagazine.com/analysis/digital-twins-for-tailings-dams/> (дата обращения: 17.03.2025).
12. Maté-González M.Á. et al. Integrating Advanced Technologies for Environmental Valuation in Legacy Mining Sites: The Role of Digital Twins at Lavrion Technological and Cultural Park // Sensors. 2025. № 25. Article № 5941.
13. Хуснутдинов А.О., Хабаров В.И., Карманов В.С. Глубокое обучение для анализа многомерных временных рядов: систематизация типов данных, задач, архитектур и подходов // Системы анализа и обработки данных. 2025. № 3 (99). С. 113–136.
14. An L. et al. Pore Water Pressure Prediction Based on Machine Learning Methods—Application to an Earth Dam Case // Applied Sciences. 2024. № 14. Article № 4749.
15. Fernández-Centeno M.Á., Alocén P., Toledo M.Á. Identification of Trends in Dam Monitoring Data Series Based on Machine Learning and Individual Conditional Expectation Curves // Water. 2024. № 16. Article № 1239.
16. Таран В.Н. Моделирование сложных (опасных) природных процессов при помощи сети доверия байеса // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии [Электронный журнал]. 2019. № 2 (46). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-slozhnyh-opasnyh-prirodnih-protsessov-pri-pomoschi-seti-doveriya-bayesa> (дата обращения: 17.03.2025).
17. Хайруллин Р.З. Применение метода байесовских сетей для установления причинно-следственных связей // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. № 3. С. 214–218.
18. Информационный ресурс для инженеров изыскателей «ГеоИнфо» [Электронный ресурс]. URL: <https://geoinfo.ru/products-pdf/ronald-brinkgreve-o-tom-chto-takoe-chislennoe-modelirovanie-mkeh-v-geotekhnike-i-o-validacii-modelej.pdf> (дата обращения: 17.03.2025).
19. Хвостохранилища под контролем [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vnedra.ru/tehnologii/hvostohranilishha-pod-kontrolem-22279/> (дата обращения: 17.03.2025).
20. Мониторинг и управление безопасностью хвостохранилищ: как минимизировать риски? [Электронный ресурс]. URL: <https://dprom.online/processing/moneetoreeng-ee-upravlyeneeye-bezopasnostyu-hvostohraneeleesh/> (дата обращения: 17.03.2025).
21. Догнать золотой стандарт: глобальные принципы безопасной эксплуатации хвостохранилищ [Электронный ресурс]. URL: <https://dprom.online/processing/globalnye-printsipy-bezopasnoj-ekspluatatsii-hvostohranilishh/> (дата обращения: 17.03.2025).
22. Duncan J.M., Wright S.G., Brandon T.L. Soil Strength and Slope Stability. Wiley, 2014. 333 p.
23. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации. М.: Макс Пресс, 2017. 88 с.
24. Li L. et al. Assessment of Catastrophic Risk Using Bayesian Network Constructed from Domain Knowledge and Spatial Data // Risk Analysis. 2010. Vol. 30. Iss. 7. P. 1157–1175.
25. Сахнюк В.И. и др. Применение методов машинного обучения в обработке данных геофизических исследований скважин // Георесурсы. 2022. № 24 (2). С. 230–238.
26. Box G., Jenkins G.M., Reinsel G.C. Time Series Analysis. Forecasting and Control Englewood Cliffs. N.Y: Prentice-Hall, 1994. 30 p.
27. Waihi Tailings Storage Facility Digital Twin Case Study [Electronical Resource]. URL: <https://www.geoengineer.org/news/waihi-tailings-storage-facility-digital-twin-case-study> (дата обращения 17.03.2025).
28. Мухамеджанов А.И., Хабибуллин И.И. Обзор методов машинного обучения для прогнозирования технического состояния газотурбинных двигателей. Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2023. № 3. С. 70–77.
29. Zhou W. et al. Combining Rainfall-Induced Shallow Landslides and Subsequent Debris Flows for Hazard Chain Prediction // Catena. 2022. Vol. 213. Article № 106199.
30. Vagnon F. et al. Investigation and Numerical Simulation of Debris Flow Events in Rochefort Basin (Aosta Valley–NW Italian Alps) Combining Detailed Geomorphological Analyses and Modern Technologies // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2022. Vol. 81. Article № 378.
31. Козлитин А.М., Козлитин П.А. Анализ риска технологических систем с использованием метода Монте-Карло // Технические науки – от теории к практике. 2016. № 7 (55). С. 11–20.
32. Kramer S.L. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1996. 653 p.
33. СП 14.13330.2018. Свод правил. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81* [Электронный ресурс]. URL: <https://mchs.gov.ru/uploads/document/2022-03-22/8d06e4315ca36fb2dd493a7ec92c3b.pdf> (дата обращения: 17.03.2025).
34. Zhang H., Zhang R., Sun J. Developing Real-Time IoT-Based Public Safety Alert and Emergency Response Systems // Scientific Reports. 2025. № 15. Article № 29056.
35. Медведев А.Г. Автоматизация мониторинга экологической ситуации на гидросооружениях и хвостохранилищах // Золото и технологии. 2023. № 4 (62). С. 1–5.

36. *Tu, Y. Intelligent Operation of Hydraulic Structures*. In: Management of Hydropower Enterprises / Water Resources Development and Management. 2024. Vol. 22. P. 123–142.
37. *Ahmed Abdulaal, Zhuanghua Liu, Tomer Lancewicki*. Practical Approach to Asynchronous Multivariate Time Series Anomaly Detection and Localization // Proc. of the 27th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery & Data Mining, Aug. 14–18, 2021, Virtual Event, Singapore. P. 2485–2494.
38. *Salazar F. et al.* Application of Machine-Learning Predictive Models to a Dam Portfolio // Management for Safe Dams: Proc. of the 91st Annual ICOLD Meeting, June 13–14, 2023, Gothenburg, Sweden. P. 1854–1860.
39. *Волошин Т.А., Зайцев К.С., Дунаев М.Е.* Применение адаптивных ансамблей методов машинного обучения к задаче прогнозирования временных рядов // International Journal of Open Information Technologies. 2023. Vol. 11. № 8. P. 2307–8162.
40. *Mengzhe Cai et al.* Chen Deep Learning-Based Defect Identification in Hydraulic Structures: A Comprehensive Review [Electronical Resource]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226798825005252> (дата обращения: 17.03.2025).
41. *Ohsaki M. et al.* Confusion-Matrix-Based Kernel Logistic Regression for Imbalanced Data Classification // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2017. Vol. 29. № 9. P. 1806–1819.
42. РД 03-417-01. Методические рекомендации по составлению проекта мониторинга безопасности гидротехнических сооружений на поднадзорных Госгортехнадзору России производствах, объектах и в организациях. М.: ПИО ОБТ, 2002. 24 с.
43. Федеральный закон № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений».
44. *Yang S.-H., Cao Y., Ding Y.* Advances in Process Safety and Protection of Cyber-Physical Systems // Processes. 2023. № 11. Article № 3419.
45. ICOLD 2023. Independent Tailings Review Board [Electronical Resource]. URL: <https://unece.org/ru/media/documents-download/events/379771> (дата обращения: 17.03.2025).
46. Practical Steps to Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM) Compliance for Operational Tailings Storage Facilities in South Africa // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2022. Vol. 122. № 6. P. 283–290.

Поступила в редколлегию 17.04.25

DEVELOPMENT AND ADAPTATION OF PREDICTIVE MATHEMATICAL MODELS FOR ASSESSING THE STABILITY OF STRUCTURES BASED ON A COMPREHENSIVE ANALYSIS OF MONITORING DATA

V.M. Panarin, A.A. Maslova, and A.N. Kovalenko

The article considers the task of improving the accuracy of assessing the stability of engineering structures based on integrated monitoring data. The subject of the study is adaptive predictive models that integrate time series of deformations, water levels, filtration parameters, seismic activity, and meteorological factors. The methodology is based on the use of machine learning (ensembles of decision trees, recurrent neural networks) and statistical analysis methods to identify hidden dependencies and build multiparametric predictions. The main result is the developed hybrid model, which demonstrates an increased accuracy of short-term forecasting of critical conditions compared to traditional approaches, which is confirmed by the results of testing on real objects. The model allows optimizing preventive measures in the engineering monitoring system.

Keywords: stability of structures, engineering monitoring, machine learning, deformation prediction, filtration processes.

Панарин Владимир Михайлович – д-р техн. наук (ТулГУ, Тула)

E-mail: panarin_tsu@yandex.ru

Маслова Анна Александровна – д-р техн. наук (ТулГУ, Тула)

E-mail: anna_zuykova@rambler.ru

Коваленко Андрей Николаевич – аспирант наук (ТулГУ, Тула)

E-mail: kovalenkoandrej@mail.ru

СИСТЕМА ВОЗДУШНЫХ СИГНАЛОВ С НЕПОДВИЖНЫМ НЕВЫСТУПАЮЩИМ ПРИЕМНИКОМ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ КАНАЛАМИ ВОСПРИЯТИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В.М. Солдаткин, В.В. Солдаткин, Е.С. Ефремова,
А.А. Кузнецов, А.Ж. Сахабутдинов, Т.А. Аглиуллин

Предложены принципы построения и функциональная схема системы воздушных сигналов летательного аппарата с одним интегрированным невыступающим приемником набегающего воздушного потока и волоконно-оптическими каналами восприятия, преобразования и ввода информации во встроенный вычислитель системы. Раскрываются особенности волоконно-оптических каналов преобразования первичных информативных сигналов системы и ввода их в вычислитель. Для восприятия и преобразования информативных давлений и температуры торможения набегающего воздушного потока предложено использовать оптические интерферометры Фабри – Перо и волоконные брэгговские решетки. Приводятся характеристики преобразования их информативных сигналов в электрические сигналы, подаваемые на вход вычислителя. Раскрываются аналитические модели обработки и определения воздушных сигналов движения летательного аппарата относительно окружающей среды.

Ключевые слова: воздушные сигналы, система измерения, интегрированный невыступающий приемник, волоконно-оптические каналы, интерферометр Фабри – Перо, принципиальная схема, алгоритмы.

Для целей пилотирования в системах автоматического управления и обеспечения безопасности полета самолета и других классов летательных аппаратов необходима достоверная информация о воздушных сигналах, определяющих аэродинамику, динамику и устойчивость движения летательного аппарата относительно окружающей среды, безопасность полета в неспокойной атмосфере [1–4].

Для измерения воздушных сигналов самолета и других летательных аппаратов широко применяются системы, основанные на контроле параметров набегающего воздушного потока с помощью вынесенных за обшивку фюзеляжа в контролируемый поток приемников и датчиков параметров набегающего потока, выходы которых с помощью пневмопроводов и электрических кабелей соединены с бортовым вычислителем, формирующим выходные сигналы системы [5–7]. При этом информация о параметрах набегающего воздушного потока воспринимается с помощью отверстий, расположенных на поверхности приемников встречно потоку. Такая конструктивная особенность обуславливает возможность их засорения, закупоривания, попадания влаги и заледенения, что снижает надежность функционирования системы в реальных условиях эксплуатации.

Использование распределенных по фюзеляжу и вынесенных за его обшивку приемников и датчиков информации о параметрах набегающего воздушного потока, соединенных пневмопроводами и кабелями связи, приводит к усложнению конструкции, увеличению массы и стоимости системы, повышению заметности траектории движения летательного аппаратов атмосфере, ограничению области применения таких систем, в частности, на малоразмерных пилотируемых и дистанционно-управляемых летательных аппаратах. Все это обуславливает актуальность работ по совершенствованию систем воздушных сигналов с учетом области их применения.

Рис. 1 иллюстрирует особенности построения и функциональные элементы системы воздушных сигналов с неподвижным невыступающим приемником параметров набегающего воздушного потока [8, 9] и волоконно-оптическими каналами восприятия, преобразования первичной информации о параметрах контролируемого потока и ввода ее в вычислитель. Вычислитель определяет воздушные сигналы и формирует выходные сигналы системы по барометрической высоте H , истинной воздушной скорости V_v , приборной скорости $V_{пр}$, числу Маха M , температуре T_H , давлению P_H и плотности воздуха ρ_H на текущей барометрической высоте полета.

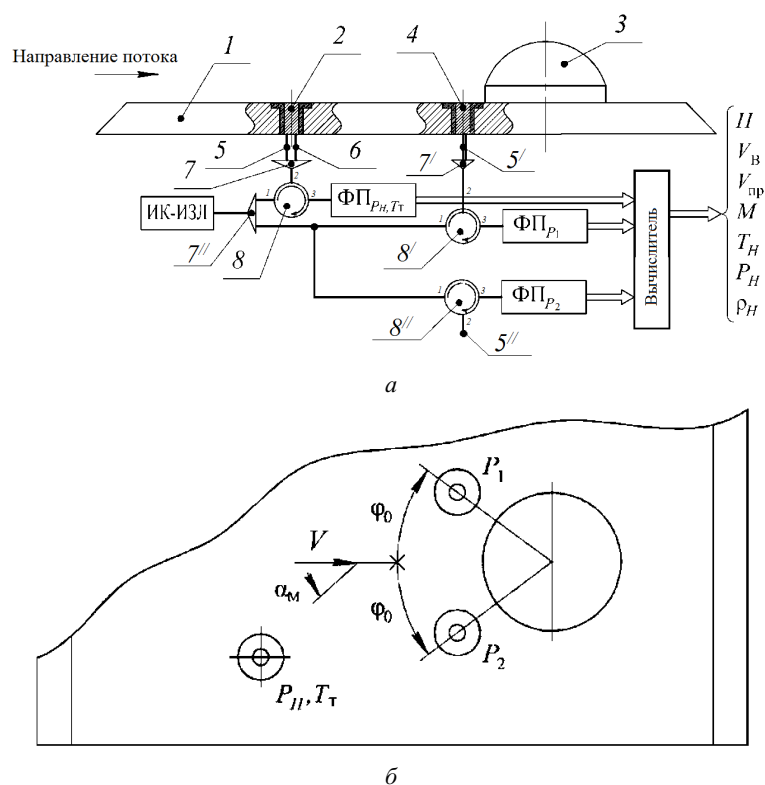


Рис. 1

Неподвижный невыступающий интегрированный приемник параметров набегающего воздушного потока выполнен на основе широко используемого в авиации фюзеляжного приемника статического давления с аэродинамическим компенсатором методической аэродинамической погрешности восприятия статического давления P_H , обусловленной искажением невозмущенного набегающего воздушного потока при движении самолета или летательного аппарата и обтекании фюзеляжа с приемником [10].

Неподвижный невыступающий интегрированный приемник параметров набегающего воздушного потока включает (рис. 1, а) плиту 1 фюзеляжного приемника статического давления, на которой расположено отверстие 2 для восприятия статического давления P_H и аэродинамический компенсатор 3 погрешности восприятия статического давления. Место расположения отверстия 2 для восприятия статического давления P_H относительно поверхности аэродинамического компенсатора определяется при летных испытаниях интегрированного приемника параметров набегающего воздушного потока для конкретного типа самолета или летательного аппарата по технологии, разработанной в ЛИИ им. М.М. Громова [11].

Для получения информации о всех воздушных параметрах движения самолета или другого летательного аппарата с использованием одного интегрированного приемника параметров набегающего воздушного потока предложено [9] размещать отверстия 4 для восприятия давлений P_1 и P_2 вблизи поверхности аэродинамического компенсатора под углом φ_0 (рис. 1, б) симметрично к оси фюзеляжного приемника, располагаемой параллельно продольной оси самолета или летательного аппарата.

Для восприятия статического давления P_H , давлений P_1 и P_2 , а также температуры T_T заторможенного набегающего воздушного потока на плите фюзеляжного приемника с аэродинамическим компенсатором предложено использовать волоконно-оптические каналы восприятия, преобразования первичных информативных сигналов P_H , T_T , P_1 и P_2 и ввода их в вычислитель, в качестве которых используются интерферометры Фабри – Перо и адресные волоконные брэгговские решетки [12–14]. Оптические волокна 5, 6 с чувствительными элементами волоконно-оптической системы устанавливаются в отверстия 2, 4, при этом торцы волокон выполняются заподлицо с внешней поверхностью плиты фюзеляжного приемника и контактируют с набегающим воздушным потоком, регистрируя параметры P_H , T_T , P_1 и P_2 .

Оптическое волокно 5 с чувствительным элементом торцевого интерферометра Фабри – Перо, чувствительного к давлению, торцом установлено в отверстие 2 и регистрирует статическое давление P_H . Оптическое давление в волоконной брэгговской решетке является чувствительным элементом интерферометра Фабри – Перо, чувствительного к температуре. Торец волокна 6 установлен в отверстие 2 и регистрирует температуру T_t заторможенного набегающего потока в месте расположения отверстия 2. Выходы оптических волокон 5, 6 через волоконно-оптический разветвитель 7 и циркулятор 8 подключены к источнику широкополосного инфракрасного излучения ИК-ИЗЛ и к фотоприемнику $\Phi\P_{P_H, T_t}$. Оптические волокна 5', 6' с чувствительными элементами других интерферометров Фабри – Перо, торцы которых установлены в отверстиях 4, регистрируют давления P_1 и P_2 и через волоконно-оптический разветвитель 7' и 7'' и циркуляторы 8' и 8'' подключены к фотоприемникам $\Phi\P_{P_1}$ и $\Phi\P_{P_2}$.

Для формирования выходных сигналов фотоприемников $\Phi\P_{P_H, T_t}$, $\Phi\P_{P_1}$ и $\Phi\P_{P_2}$, соответствующих давлению P_H и температуре T_t , давлениям P_1 и P_2 , оптические волокна 5, 6, 5', 5'' через разветвители 7, 7', 7'' и циркуляторы 8, 8', 8'' облучаются источником широкополосного инфракрасного излучения ИК-ИЗЛ. При этом циркуляторы 8, 8', 8'' с тремя портами направляют световой поток от излучателя ИК-ИЗЛ последовательно от одного порта к другому, причем свет, введенный в порт 1, выходит из порта 2, а свет, введенный в порт 2, выходит из порта 3, при этом свет из порта 2 не попадает обратно в порт 1. Это необходимо для того, чтобы отраженный свет не попадал обратно к излучателю, а шел целиком к фотоприемнику.

Выходные сигналы фотоприемников в виде электрических токов, определяющих давление P_H и температуру T_t , давления P_1 и P_2 , подаются на вход вычислителя. В каналах вычислителя обеспечивается усиление и аналого-цифровое преобразование выходных сигналов фотоприемников, проводится их обработка по предложенным алгоритмам и формирование цифровых выходных сигналов системы воздушных сигналов по барометрической высоте H , истинной воздушной скорости V_v , приборной скорости $V_{пр}$, числу Маха M , температуре T_H , давлению P_H , плотности воздуха ρ_H на текущей барометрической высоте полета H .

Таким образом, использование волоконных интерферометров Фабри – Перо с волоконными брэгговскими решетками позволяет обеспечить восприятие, преобразование первичных информативных сигналов о параметрах набегающего воздушного потока без отверстий восприятия первичной информации, подверженных засорению, забиванию и замерзанию в условиях эксплуатации системы воздушных сигналов. Кроме того, процесс восприятия, преобразования и ввода в вычислитель волоконно-оптических сигналов интерферометров Фабри – Перо с брэгговскими решетками обеспечивается без электрического питания чувствительных элементов.

Построение системы воздушных сигналов на основе фюзеляжного приемника с аэродинамическим компенсатором обеспечивает измерение полного комплекса воздушных параметров с использованием одного интегрированного неподвижного приемника, не выступающего за поверхность обшивки. При этом обработка информации осуществляется по четырем входным информативным параметрам, три из которых представляют собой давления, а четвертый – абсолютную температуру заторможенного потока. Все это упрощает каналы их выделения и преобразования, а также снижает число приемников и датчиков – преобразователей первичной информации параметров набегающего воздушного потока.

Волоконно-оптические каналы широко используются для измерения различных физических величин и постепенно заменяют традиционные электрические и электромеханические измерительные каналы благодаря таким свойствам, как взрыво- и пожаробезопасность, невосприимчивость к электромагнитным излучениям, коррозионная стойкость, высокая чувствительность, малые габариты и вес.

Для измерения температуры все чаще применяются датчики на основе волоконной брэгговской решетки, представляющей собой периодическую структуру изменения показателя преломления в сердцевине оптического волокна, выходной сигнал которой зависит от деформации и температуры [12]:

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{эф}}\Lambda(kv + \alpha\Delta T), \quad (1)$$

где k – коэффициент тензочувствительности; α – коэффициент температурной чувствительности; n_{eff} – эффективный показатель преломления; $\Delta\lambda_{\text{в}}$ – изменение длины волны отраженного излучения (брэгговской длины волны); ΔT – изменение температуры.

Для измерения давления с высокой чувствительностью с разрешением применяются датчики, построенные на основе интерферометра Фабри – Перо [13]. Чувствительный элемент такого датчика представляет собой интерферометр Фабри – Перо, зеркалами которого являются сколотый торец оптического волокна и перпендикулярно закрепленная мембрана. Обратные отражения от торца оптического волокна, внутренней и внешней поверхностей мембраны возвращаются в систему опроса, взаимодействуя и формируя на фотоприемнике интерференционную картину. При воздействии внешнего давления происходит прогиб мембраны, вследствие чего изменяется база интерферометра. Из-за этого происходит изменение периода интерференционной картины и наблюдается общее ее смещение. Прогиб мембраны под воздействием давления описывается выражением вида [13]:

$$\Delta L = \frac{3(1-\mu^2)R^4}{16Ed^3}\Delta P, \quad (2)$$

где R , d – радиус и толщина мембраны; E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона; ΔP – изменение внешнего давления.

Однако датчик давления на основе интерферометра Фабри – Перо также реагирует и на температуру. Для исключения влияния температуры необходимо использовать датчик температуры. В работе [13] рассматривается комбинация волоконной брэгговской решетки и интерферометра Фабри – Перо, при которой волоконная брэгговская решетка используется в качестве датчика температуры, а интерферометр Фабри – Перо предназначен для измерения давления.

На рис. 2 приведена схема чувствительного элемента датчика давления и температуры, построенного с использованием интерферометра Фабри – Перо.

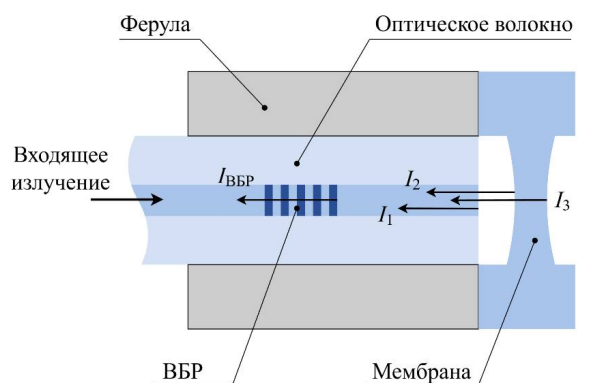


Рис. 2

Упругая мембрана и ферула (капилляр-наконечник оптоволоконного коннектора с диаметром 2,5 или 1,25 мм, изготавливаемый из кварцевого стекла КУ-1, керамики или металла), устанавливаются в отверстие плиты фюзеляжного приемника потока.

Изготовление мембраны может осуществляться при помощи фотолитографии и химического травления в растворе на основе фтороводородной кислоты. Толщина тонкой части мембраны составляет 50 ± 1 мкм. Рассматриваемый чувствительный элемент выполняется с использованием бесклевого соединения стеклянных деталей при помощи эфира ортокремниевой кислоты. Образующийся в процессе соединения слой кремния обеспечивает прочное и герметичное соединение.

Период интерференционной картины определяется базой интерферометра – расстоянием между торцом оптического волокна и внутренней поверхностью мембраны и составляет около 200 мкм. По пику волоконной брэгговской решетки можно определить текущую температуру датчика, а по изменению интерференционной картины – оказываемое на датчик давление.

Длина базы интерферометра определяется по оптическому сигналу интерферометра следующим образом [13]:

$$L = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)}, \quad (3)$$

где λ_1, λ_2 – длины волн, отличающиеся по фазе на 2π .

Смещение пика волоконной брэгговской решетки от температуры происходит линейно по заранее определенному закону. Используя коэффициенты $k_T, k_P, k_{\text{ББР}}$, можно составить уравнение комбинированного датчика давления и температуры в матричной форме вида [13]

$$\begin{bmatrix} \Delta \lambda_{\text{Б}} \\ \Delta L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & k_{\text{ББР}} \\ k_P & k_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где k_T, k_P – коэффициенты чувствительности интерферометра Фабри – Перо к температуре и давлению; $k_{\text{ББР}}$ – коэффициент чувствительности волоконной брэгговской решетки к температуре.

Таким образом, в отверстии для восприятия статического давления P_H и температуры T_T , заторможенного набегающего воздушного потока целесообразно разместить два оптических волокна 5, 6, каждый из которых содержит комбинацию волоконной брэгговской решетки с интерферометром Фабри – Перо, причем волокно 6 для восприятия температуры содержит интерферометр безмембранной конструкции, не чувствительный к давлению. С целью повышения разрешающей способности и частоты измерений, а также упрощения схемы опроса волоконно-оптических датчиков целесообразно применить волоконные брэгговские решетки особой конфигурации – адресные волоконные брэгговские структуры, выходной сигнал которых представляет собой два узкополосных спектральных пика пропускания, разнесенных на фиксированную частоту [14]. Аналогичную комбинацию чувствительного к давлению интерферометра Фабри – Перо и брэгговской структуры целесообразно устанавливать в отверстия для восприятия давлений P_1 и P_2 , тем самым обеспечивая компенсацию влияния температуры T_T на выходной сигнал интерферометра, повышая достоверность результатов измерения давлений.

Для формирования информативных сигналов по давлению и температуре выходы оптических волокон 5, 6 с чувствительными элементами, установленными в отверстие для восприятия статического давления и температуры заторможенного набегающего потока, и с чувствительными элементами, установленными в отверстиях для восприятия давлений P_1 и P_2 , через волоконно-оптический разветвитель и циркулятор облучаются источником широкополосного инфракрасного излучения ИК-ИЗЛ, в качестве которого можно использовать суперлюминесцентный диод [13]. Тогда на выходах соответствующих фотоприемников формируются выходные сигналы в виде токов на разностных частотах спектральных откликов брэгговских решеток (амплитуды которых пропорциональны P_H, T_T, P_1 и P_2), которые поступают на вход вычислителя, обеспечивающего усиление, аналого-цифровое преобразование и обработку по разработанным аналитическим моделям, формирование выходных цифровых сигналов системы по измеряемым воздушным параметрам движения летательного аппарата относительно окружающей среды.

В работе [15] приведены выражения для давлений P_1 и P_2 , воспринимаемых вблизи аэродинамического компенсатора, выполненного в виде полусферы радиуса r_0 , установленной на цилиндрическом основании того же радиуса высотой $0,25 \dots 0,3r_0$. При этом давления P_1 и P_2 имеют вид

$$\begin{aligned} P_1 - P_H &= \eta \frac{\rho_H V^2}{2} [4 \cos^2(\varphi_0 - \alpha_m) - \eta - 2] = \eta \frac{\rho_H V^2}{2} [4(1 - \sin^2(\varphi_0 - \alpha_m)) - \eta - 2]; \\ P_2 - P_H &= \eta \frac{\rho_H V^2}{2} [4 \cos^2(\varphi_0 + \alpha_m) - \eta - 2] = \eta \frac{\rho_H V^2}{2} [4(1 - \sin^2(\varphi_0 + \alpha_m)) - \eta - 2], \end{aligned} \quad (5)$$

где $\eta = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2$ – безразмерный конструктивный параметр, определяющий радиус r расположения отверстий для восприятия давлений P_1 и P_2 относительно поверхности аэродинамического компенсатора в ви-

де полусферы с цилиндрическим основанием радиуса r_0 ; $\frac{\rho_H V^2}{2}$ – скоростной напор (динамическое давление) набегающего воздушного потока; $\varphi_0 - \alpha_m = \varphi_1$, $\varphi_0 + \alpha_m = \varphi_2$ – углы, определяющие текущее угловое положение отверстий для восприятия давлений P_1 и P_2 относительно направления вектора V скорости набегающего воздушного потока.

С учетом тригонометрических соотношений

$$\sin^2(\varphi_0 \mp \alpha_m) = \frac{1}{2} [1 - \cos 2(\varphi_0 \mp \alpha_m)];$$

$$\cos(2\varphi_0 \mp 2\alpha_m) = \cos 2\varphi_0 \cos 2\alpha_m \pm \sin 2\varphi_0 \sin 2\alpha_m$$

полученные выражения (5) принимают вид

$$\Delta P_1 = P_1 - P_H = 2\eta \frac{\rho_H V^2}{2} \left[\cos 2\varphi_0 \cos 2\alpha_m + \sin 2\varphi_0 \sin 2\alpha_m - \frac{\eta}{2} \right];$$

$$\Delta P_2 = P_2 - P_H = 2\eta \frac{\rho_H V^2}{2} \left[\cos 2\varphi_0 \cos 2\alpha_m - \sin 2\varphi_0 \sin 2\alpha_m - \frac{\eta}{2} \right],$$
(6)

где ΔP_1 , ΔP_2 – информативные сигналы системы воздушных сигналов с неподвижным невыступающим приемником.

Выражения (6) позволяют получить аналитические модели для определения местного угла атаки α_m и истинной воздушной скорости $V_b = V$. С этой целью получим выражения для разности $\Delta P_1 - \Delta P_2$ и суммы $\Delta P_1 + \Delta P_2$:

$$\Delta P_1 - \Delta P_2 = 4\eta \frac{\rho_H V^2}{2} \sin 2\varphi_0 \sin 2\alpha_m; \quad (7)$$

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 = 4\eta \frac{\rho_H V^2}{2} \left(\cos 2\varphi_0 \cos 2\alpha_m - \frac{\eta}{2} \right). \quad (8)$$

При значении угла расположения отверстий для восприятия давлений P_1 и P_2 , равном $\varphi_0 = 45^\circ$, получим

$$\Delta P_1 - \Delta P_2 = 4\eta \frac{\rho_H V^2}{2} \sin 2\alpha_m; \quad (9)$$

$$|\Delta P_1 + \Delta P_2| = 2\eta^2 \frac{\rho_H V^2}{2}. \quad (10)$$

С учетом (9), (10) получим отношение вида

$$\frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{|\Delta P_1 + \Delta P_2|} = \frac{2}{\eta} \sin 2\alpha_m. \quad (11)$$

Тогда аналитическая модель для определения местного аэродинамического угла α_m в измерительном канале системы измерения воздушных параметров движения летательного аппарата с интегрированным фюзеляжным приемником будет иметь вид

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{\eta}{2} \frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{|\Delta P_1 + \Delta P_2|} \right). \quad (12)$$

С учетом выражения для определения плотности ρ_H воздуха на высоте H вида [16]

$$\rho_H = \rho_0 \frac{P_H T_0}{P_0 T_H} \quad (13)$$

аналитическая модель для определения истинной воздушной скорости V_b в измерительном канале рассматриваемой системы измерения воздушных параметров движения летательного аппарата с использованием выражения (7) будет иметь вид

$$V_b = \sqrt{\frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2| P_0 T_H}{\eta^2 \rho_0 T_0 P_H}}, \quad (14)$$

где $\rho_0 = 1,225 \text{ кг/м}^3$, $T_0 = 288,15 \text{ К}$, $P_0 = 101325 \text{ Па}$ – плотность, абсолютная температура и давление воздушной среды на высоте $H=0$ стандартной атмосферы [17].

Температура T_H наружного воздуха на данной высоте H определяется по регистрируемой температуре T_t торможения набегающего воздушного потока по известной аналитической модели вида [17]

$$T_H = \frac{T_t}{1 + 0,2\xi M^2}, \quad (15)$$

где $\xi = 0,98 \div 1,02$ – коэффициент торможения набегающего воздушного потока.

Аналогично, используя связь числа Маха M и истинной воздушной скорости V_b вида [17]

$$M = \frac{V_b}{a_H} = \frac{V_b}{\sqrt{kgRT_H}}, \quad (16)$$

где a_H – скорость звука в воздухе на высоте H ; $k=1,4$ – показатель адиабаты воздуха; $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $R=29,27125 \text{ м/К}$ – газовая постоянная, получим аналитическую модель для определения числа Маха в измерительных каналах системы измерения воздушных параметров движения летательного аппарата с интегрированным фюзеляжным приемником следующего вида:

$$M = \sqrt{\frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2| P_0}{\eta^2 kgR\rho_0 T_0 P_H}}. \quad (17)$$

Аналитическая модель для определения приборной скорости $V_{пр}$ в измерительных каналах системы измерения воздушных параметров движения летательного аппарата с учетом связи истинной приборной скорости V_b и приборной скорости $V_{пр}$ вида [17]

$$V_{пр} = \sqrt{\frac{\rho_H}{\rho_0}} V_b = \sqrt{\frac{P_H T_0}{P_0 T_H}} V_b \quad (18)$$

будет

$$V_{пр} = \sqrt{\frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2|}{\eta^2 \rho_0}}. \quad (19)$$

По воспринимаемому на скользящей поверхности с аэродинамическим компенсатором статическому давлению P_H по известным аналитическим моделям [17] определяется барометрическая (абсолютная) высота H :

- при $-2000 < H \leq 11000 \text{ м}$

$$H = \frac{T_0}{\tau} \left[1 - \left(\frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right]; \quad (20)$$

- при $11000 \leq H < 15000 \text{ м}$

$$H = H_{11} + RT_{11} \ln \frac{P_{11}}{P_H}, \quad (21)$$

где $\tau = 0,0065 \text{ К/м}$ – температурный градиент; $T_{11} = 216,65 \text{ К}$; $P_{11} = 22632 \text{ Па}$.

При необходимости в каналах системы измерения воздушных параметров можно определить скорость звука $a_H = \sqrt{kgRT_H}$ на данной высоте H .

Таким образом, предложенные принципы построения системы воздушных сигналов с интегрированным невыступающим (фюзеляжным) приемником параметров набегающего воздушного потока и волоконно-оптическими каналами восприятия, преобразования и ввода первичной информации во встроенный вычислитель для обработки и формирования цифровых выходных сигналов системы позволяют упростить конструкцию, снизить массу и стоимость. Также не нарушается аэродинамика обтекания фюзеляжа, не увеличивается заметность траектории движения летательного аппарата и повышается надежность работы системы в реальных условиях эксплуатации. Это определяет конкурентные преимущества и расширяет возможные области применения рассматриваемой системы измерения воздушных параметров движения относительно окружающей воздушной среды, особенно на малоразмерных и сверхлегких самолетах, на беспилотных и дистанционно-пилотируемых летательных аппаратах различного класса и назначения.

Рассмотренные особенности волоконно-оптических каналов восприятия и преобразования первичных информативных сигналов показывают, что использование в качестве волоконно-оптических каналов интерферометров Фабри – Перо и волоконных брэгговских решеток позволяет обеспечить восприятие, преобразование информативных сигналов о давлениях и температуре торможения набегающего воздушного потока без отверстий, подверженных засорению, забиванию и замерзанию в реальных условиях эксплуатации, обеспечить ввод их в вычислитель без электрического питания чувствительных элементов. Также снижается число преобразователей первичной информации параметров набегающего воздушного потока.

Для формирования информативных сигналов по воспринимаемым давлениям и температуре торможения набегающего воздушного потока используются чувствительные элементы интерферометров Фабри – Перо и волоконных брэгговских решеток, установленные заподлицо в отверстиях для восприятия давлений и температуры торможения. Выходы оптических волокон с чувствительными элементами через волоконно-оптические разветвители и циркуляторы облучаются источником широкополосного инфракрасного излучения и подключаются к фотоприемникам. На выходах фотоприемников формируются электрические сигналы в виде токов, амплитуда которых пропорциональна воспринимаемым давлениям и температуре торможения набегающего потока. Полученные сигналы поступают на вход усилителя, обеспечивающего их усиление, аналого-цифровое преобразование и обработку. В результате обработки формируется цифровая информация об истинной воздушной скорости, приборной скорости, числе Маха, барометрической высоте, угле атаки или угле скольжения в месте расположения приемника. Определение указанных параметров осуществляется на основе разработанных аналитических моделей.

Полученные результаты являются научной основой для системотехнического и схемотехнического проектирования, исследования методических и инструментальных погрешностей измерительных каналов разрабатываемых вариантов волоконно-оптической системы измерения воздушных параметров движения летательного аппарата с интегрированным фюзеляжным приемником параметров набегающего воздушного потока и волоконно-оптическими каналами восприятия и преобразования информативных сигналов.

Работа выполнена в рамках государственного задания FZSU-2026-009, регистрационный номер НИОКР 126020516512-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боднер В.А. Приборы первичной информации. М.: Машиностроение, 1981. 344 с.
2. Синяков А.Н., Шаймарданов Ф.А. Системы автоматического управления ЛА и их силовыми установками. М.: Машиностроение, 1991. 320 с.
3. Жулев В.И., Иванов В.С. Безопасность полетов летательных аппаратов. М.: Транспорт, 1986. 244 с.
4. Солдаткин В.М. Методы и средства построения бортовых информационно-управляющих систем обеспечения безопасности полета. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004. 350 с.

5. Клюев Г.И. и др. Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов. Ульяновск: УлГТУ, 2005. 509 с.
6. Макаров Н.Н., Солдаткин В.М. Средства информационной поддержки экипажа воздушного судна. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2011. 440 с.
7. Солдаткин В.М. и др. Авиационные приборы, измерительно-вычислительные системы и комплексы: Принципы построения, алгоритмы обработки информации, характеристики и погрешности. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. 526 с.
8. Солдаткин В.М. и др. Особенности построения, формирование и обработка информации системы воздушных сигналов самолета с фюзеляжными приемниками параметров набегающего потока // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2023. № 3. С. 91–96.
9. Система измерения воздушных параметров движения летательного аппарата: пат. 2850144 Рос. Федерация, № 2023132396; заявл. 8.12.2023; опубл. 05.11.2025.
10. А. с. № 271140 РФ (СССР), МПК G01L 7/14, G01P 5/02. Фюзеляжный приемник статического давления с аэродинамическим компенсатором / Б.М. Абрамов, М.Н. Перова, Б.А. Смольцов (РФ). № 1241422/18-10; заявл. 14.05.1968; опубл. 12.05.1970.
11. Харин Е.Г., Копылов И.А. Технологии летных испытаний бортового оборудования летательных аппаратов с применением комплекса бортовых траекторных измерений. М.: МАИ-Принт, 2012. 360 с.
12. Zhu Y., Wang A. Miniature Fiber-Optic Pressure Sensor // IEEE Photonics Technology Letters. 2005. Vol. 17. № 2. P. 447–449.
13. Фадеев К.М. и др. Волоконно-оптический датчик одновременного измерения температуры и давления с использованием интерферометра Фабри – Перо и волоконной брэгговской решетки // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 4. С. 115–119.
14. Agliullin T.A. et al. Mathematical Modeling of the Optical Response from Addressed Fiber Bragg Structure Based on Lorentz Function // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering: Optical Technologies for Telecommunications, 2019, Nov. 19–21, 2019, Kazan, Russia. Vol. 11516. Article № 1151614.
15. Солдаткин В.М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001. 448 с.
16. Залманзон Л.А. Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 247 с.
17. Браславский Д.А. Приборы и датчики летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1970. 392 с.

Поступила в редколлегию 28.04.26

AIR SIGNAL SYSTEM WITH A FIXED NON-PROTRUDING RECEIVER OF THE INCIDENTAL FLOW AND FIBER-OPTIC CHANNELS FOR PERCEPTION AND CONVERSION OF PRIMARY INFORMATION

**V.M. Soldatkin, V.V. Soldatkin, E.S. Efremova,
A.A. Kuznetsov, A.Zh. Sakhabutdinov, and T.A. Agliullin**

The design principles and functional diagram of an aircraft air data system with a single integrated, non-protruding receiver for the incident airflow and fiber-optic channels for receiving, converting, and inputting information into the system's built-in computer are proposed. The features of the fiber-optic channels for converting the system's primary information signals and inputting them into the computer are described. Optical Fabry–Perot interferometers and fiber Bragg gratings are proposed for receiving and converting information about the pressures and stagnation temperatures of the incident airflow. The characteristics of the conversion of their information signals into electrical signals fed to the computer input are presented. Analytical models for processing and determining air data about the aircraft's movement relative to the surrounding environment are described.

Keywords: airborne signals, measurement system, integrated non-protruding receiver, fiber-optic channels, Fabry – Perot interferometer, circuit diagram, algorithms.

Солдаткин Владимир Михайлович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Солдаткин Вячеслав Владимирович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: w-soldatkin@kai.ru

Ефремова Елена Сергеевна – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: soldatkina1991@bk.ru

Кузнецов Артем Анатольевич – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: aakuznetsov@kai.ru

Сахабутдинов Айрат Жавдатович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: azhsakhabutdinov@kai.ru

Аглиуллин Тимур Артурович – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: taagliullin@kai.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН

А.Н. Цветков

Предложен универсальный подход к синтезу информационно-измерительного комплекса на основе аппарата логических схем алгоритмов Ляпунова, адаптированный для электро-механических объектов нефтедобычи. Получены аналитические выражения для минимизации числа контролируемых каналов при сохранении полноты контроля. Представлены логические схемы для контуров контроля электрических цепей постоянного и переменного тока, параметров изоляции, вибрации, усилия и управляющих воздействий. Разработанные алгоритмические решения являются основой для программной реализации информационно-измерительного комплекса, его интеграции в системы управления и могут быть непосредственно использованы при создании стендов для исследования и испытаний электроприводов.

Ключевые слова: информационно-измерительный комплекс, электропривод переменного тока, нефтедобывающая скважина, логическая схема алгоритма, функциональный оператор, контролируемый параметр.

Нефтедобывающая промышленность является энергоемкой отраслью, где значительная доля энергопотребления приходится на электро-механическое оборудование скважин – установки электро-центробежных насосов и глубинные штанговые насосы с приводом от станков-качалок. Эксплуатация этих механизмов в условиях переменных дебитов, высоких статических и динамических нагрузок, зашламованности и газовых пробок формирует повышенные требования к системам электропривода. Традиционные асинхронные электроприводы с частотным регулированием, построенные на базе классических законов управления (скалярного или векторного), не всегда обеспечивают требуемую адаптацию к быстро меняющимся условиям работы скважин, что приводит к снижению КПД насосного агрегата, преждевременному износу и неоправданным энергопотерям [1].

Современные технические объекты характеризуются множественностью взаимосвязанных параметров и необходимостью оперативного контроля. Настройка эффективного управления в процессе испытания невозможна без достоверной, полной и своевременной измерительной информации, что обуславливает ключевую роль информационно-измерительных комплексов в структуре автоматизированных систем управления процессами испытаний. Разработка информационно-измерительных комплексов предполагает не только выбор технических средств измерений, но и создание алгоритмического и программного обеспечения, обеспечивающего сбор, обработку, анализ данных и формирование управляющих воздействий. Отличительной особенностью предложенного описания объектов исследования является введение в состав контролируемых каналов набора средств формирования управляющего воздействия для получения возможности определения энергетических характеристик не только в номинальных режимах, но и в условиях имитации работы, приближенных к реальным [2–9].

Целью работы является разработка теоретических основ построения информационно-измерительных комплексов с перестраиваемой структурой для испытания и настройки электроприводов переменного тока нефтедобывающих скважин.

Электропривод как объект исследования представляет собой сложную систему, объединяющую силовые преобразователи, электрические двигатели, механические передачи и системы управления. Аналитическое описание электроприводов направлено на выявление энергетических, динамических и точностных характеристик. Испытания электроприводов нефтедобывающего оборудования являются критически важным этапом их разработки, производства и эксплуатации. Основной целью этих испытаний является максимально точное воспроизведение реальных рабочих нагрузок в лабораторных условиях для проверки характеристик, надежности и энергоэффективности.

Специфика теории построения информационно-измерительных комплексов для испытания электроприводов в нефтедобыче определяется жесткими условиями эксплуатации оборудования и требованиями промышленной безопасности. Эта теория базируется на создании высокоавтоматизированных стендов, создающих условия, максимально приближенные к реальным полевым, и направлена на обеспечение единства измерений в соответствии с нормативной базой.

Основная задача информационно-измерительных комплексов не просто измерение параметров, а создание управляемой испытательной среды. Теоретическое обоснование их построения базируется на следующих ключевых принципах.

1. Физическое и функциональное моделирование.

Теория выдвигает требование о необходимости интеграции силового нагрузочного оборудования с прецизионной измерительной системой и системой автоматического управления в единый комплекс, что позволяет с высокой точностью воспроизводить циклические и знакопеременные нагрузки в лабораторных условиях. В связи с этим такие испытания являются адекватной заменой дорогостоящим и сложным промышленным испытаниям [10, 11].

2. Иерархическая структура измерительных каналов.

Информационно-измерительный комплекс включает датчики различных физических величин, устройства аналогово-цифрового и цифроаналогового преобразования, а также быстродействующий аппаратно-программный комплекс. Эта многоуровневая архитектура является основой для обеспечения точности и синхронности измерений.

3. Единство информационного пространства.

Представляет собой интеграцию всей информации в единую базу данных в реальном времени. Это условие необходимо для эффективного управления испытаниями, их документирования и последующего анализа, что является краеугольным камнем современных подходов к автоматизации.

Связь теории с практической областью проявляется в способности предлагаемого информационно-измерительного комплекса адекватно отражать особенности различных типов скважинного оборудования. Для систем со штанговыми насосами (станки-качалки) теория реализуется в экспериментальных стендах, которые с высокой точностью имитируют нагрузку станка-качалки. При этом ключевой задачей становится управление электродвигателем в составе станции управления, что позволяет исследовать и подтверждать правильность конструктивных решений, заложенных в привод.

Нормативная база предъявляет четкие требования как к самому скважинному оборудованию, так и к средствам его испытания.

ГОСТ Р 51763-2001 устанавливает технические требования к приводам штанговых скважинных насосов, включая станки-качалки. Данные требования реализуются разработкой автоматизированных стендов с возможностью быстрой смены программ испытаний, что позволяет достичь универсальности, с возможностью проводить различные виды испытаний на одном стендовом оборудовании.

ГОСТ 12.2.136-98 регламентирует требования безопасности к конструкции наземного оборудования станков-качалок, что напрямую влияет на проектирование испытательных стендов с возможностью реализации сложных режимов испытаний и потенциально опасных алгоритмов управления для отработки автоматической защиты оборудования и персонала от аварийных ситуаций.

Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений», РД 34.11.202-95 (для информационно-измерительных систем) и РД 153-34.0-11.201-97 (для измерительных каналов) являются фундаментом для всей нормативной базы в области измерений и промышленной безопасности. Эти руководящие документы содержат детальные правила организации, проведения метрологической аттестации, а также методы расчета обобщенных метрологических характеристик измерительных каналов информационно-измерительных систем. Соответствие проектируемых испытательных стендов на основе универсального информационно-измерительного комплекса с применением поверенных датчиков, разработкой методик расчетного определения и аттестации метрологических характеристик информационно-измерительного комплекса позволяет получить документально подтвержденную точность и прослеживаемость результатов измерений.

Таким образом, предлагаемая теория построения информационно-измерительного комплекса, основанная на принципах физического моделирования и автоматизации, создает недостающее связующее звено между жесткими, но общими нормативными требованиями и практической реализацией конкретных, сложных и ресурсоемких испытательных процедур, решаемых инженером при разработке приборной и силовой частей стенда.

К рассматриваемым в статье объектам исследования, для которых разрабатывались имитационные модели, относятся следующие электроприводы и их составляющие: асинхронный двигатель, преобразователь частоты, электропривод станка-качалки нефти.

Для построения формализованной модели контролируемых параметров объектов исследования введены следующие определения:

- контролируемый параметр n – характеристика объекта, подлежащая измерению для оценки состояния или управления;
- контролируемый канал N – часть контура контроля, формирующая сигнал от датчика до измерительного устройства;
- измеряемая величина x – непосредственно измеряемый сигнал (ток, напряжение, перемещение и т.д.).

Имитационная модель параметров объекта контроля описана формулой $M(x, n, N)$, где x – количество измеряемых переменных; n – количество контролируемых параметров; N – количество контролируемых каналов.

Рассмотрим варианты аналитического описания электропривода на основе асинхронного двигателя и преобразователя частоты. Имитационная модель асинхронного электродвигателя показана на рис. 1, а.

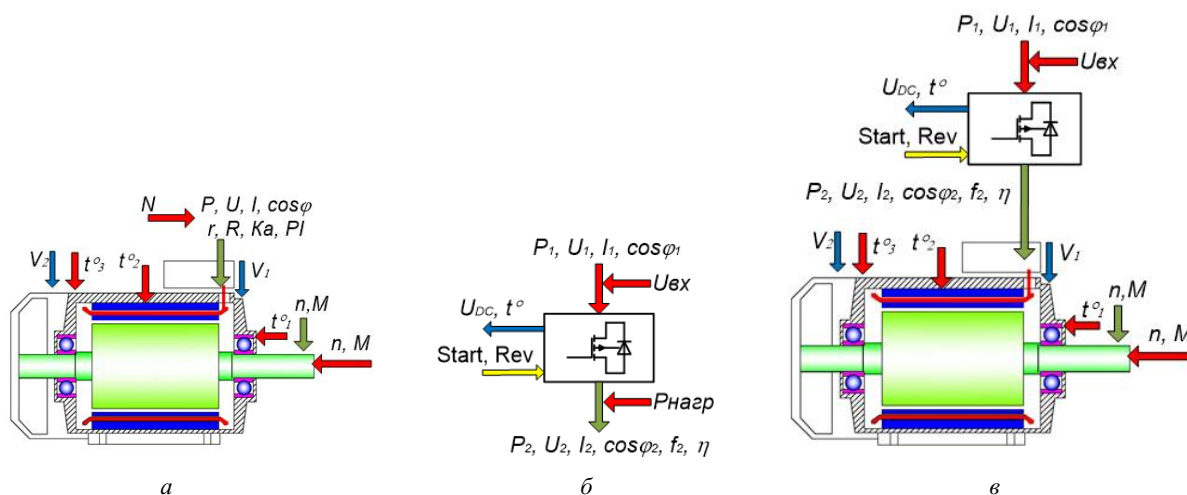


Рис. 1

К контролируемым параметрам асинхронного двигателя, оцениваемым при испытаниях, относятся энергетические характеристики, проверка которых устанавливается требованиями ГОСТ 7217-87. Для преобразователей частоты применяются требования ГОСТ 26567-85. Имитационная модель принимает вид, показанный на рис. 1, б. При проведении комплексных испытаний электропривода в целом имитационная модель принимает вид, показанный на рис. 1, в, при этом контролируются параметры как для асинхронного двигателя, так и для преобразователя частоты. Представленные на рис. 1 объекты имеют дополнительный канал контроля формирования нагружающего воздействия, предназначенного для создания режимов испытаний, отличных от номинальных, требуемых ГОСТами.

При анализе рассматриваемых объектов контроля наблюдается наличие повторяющихся контролируемых параметров. Данный факт свидетельствует о том, что при формировании структуры испытательного стенда можно использовать единый информационно-измерительный комплекс с гибкой структурой, в состав которого входит определенный набор контролируемых параметров, и при создании испытательного стенда под конкретную задачу можно активировать в алгоритме работы информационно-измерительного комплекса только необходимые компоненты.

Изначально формируются контролируемые параметры, например, контролируемый параметр n_1 – измерение температуры переднего подшипника асинхронного двигателя на основе измеряемого сигнала; x_1 – температура переднего подшипника. Затем формируются контролируемые каналы, например, контролируемый канал измерения температуры частей электрической машины на основе измеряемых параметров t_1, t_2, t_3 , град, который обозначим через N_1 . В итоге для испытания электроприводов нефтяных станков-качалок и их составных частей необходимо использовать тринадцать контролируемых каналов, входящих в состав информационно-измерительного комплекса.

Процесс формирования контролируемых параметров показан на рис. 2.

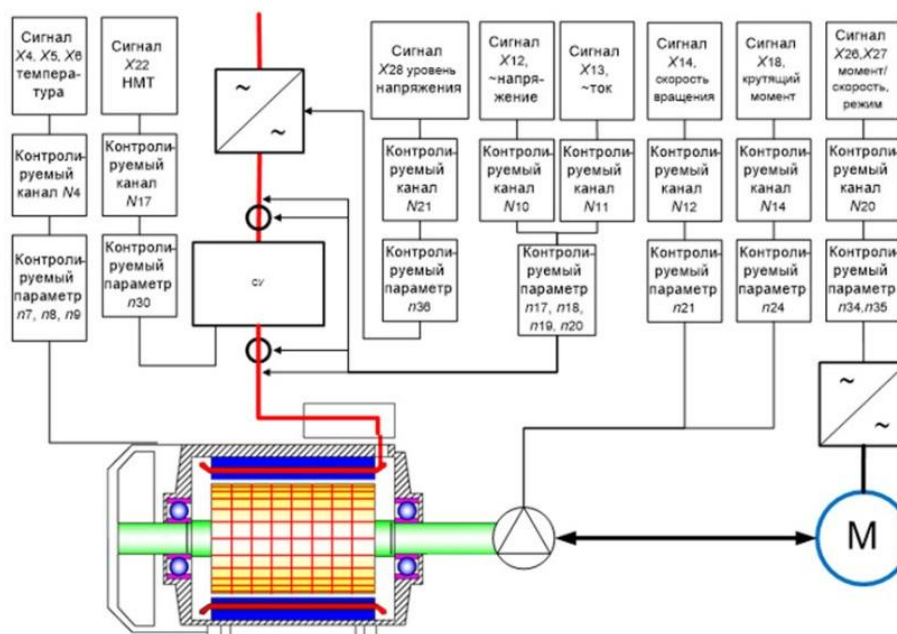


Рис. 2

Особенно важным звеном данной системы является контролируемый канал формирования переменной нагрузки на электропривод, имитирующий работу электропривода в режимах, отличающихся от номинальных.

Теоретическое обоснование выбора нагрузочного устройства и методов управления им строится на необходимости создания заданного закона изменения нагрузочного момента с высоким быстродействием и точностью, а также на минимизации дополнительных погрешностей, вносимых измерительными и силовыми элементами стенда.

Выбор типа нагрузочного устройства является ключевым этапом. В зависимости от решаемых задач и требуемой точности все методы подразделяются на два основных класса: традиционный метод (испытательная машина – генератор) и перспективный метод (специализированные нагрузочные устройства), ориентированный на создание универсальных и высокоточных систем. Перспективный метод подразумевает применение специализированных тормозных механизмов и систем измерения на основе тензометрических датчиков. Управление такими комплексами осуществляется с помощью микропроцессорного оборудования, что позволяет исследовать характеристики электродвигателей, значительно отличающихся по мощности и частоте вращения.

Специфика нефтедобывающей отрасли накладывает дополнительные требования. Нагрузочные устройства должны имитировать не только статические, но и сложные динамические нагрузки, характерные для работы станка-качалки (циклический знакопеременный момент). В связи с этим перспективным решением для нефтедобычи считается использование системы «преобразователь частоты – нагрузочный асинхронный электродвигатель» [12, 13]. Такая система позволяет гибко формировать требуемый закон изменения нагрузочного момента и является более эффективной по сравнению с традиционными схемами на двигателях постоянного тока [14].

Формирование требуемого закона изменения нагрузочного момента, например, синусоидального или циклического, обеспечивается системой автоматического управления нагрузочным устройством, функционирующей на основе информационно-измерительного комплекса. В теоретическом аспекте решение данной задачи базируется на применении ряда методов и принципов, к числу которых относятся управление по обратной связи как основной способ минимизации погрешности воспроизведения момента, использование регуляторов с интегральной составляющей, в частности ПИД-регуляторов, обеспечивающих формирование практически абсолютно жесткой механической характеристики и стремление ошибки воспроизведения момента к нулю, а также программное формирование задающих сигналов, предназначенное для реализации сложных законов изменения момента и генерации требуемого временного профиля нагрузки, что позволяет имитировать как реальные эксплуатационные, так и аварийные режимы работы.

С целью формирования структурного описания разрабатываемых испытательных стендов проанализированы объекты испытания (таблица). Для каждого определен минимальный набор контролируемых каналов на основе прямых и косвенных измерений. Данная систематизация способствует ограничению количества организуемых каналов контроля при формировании измерительной системы испытательного стенда для каждого вида электропривода или его элемента на основе информационно-измерительного комплекса с гибкой структурой. Следует отметить, что полнота каналов, требуемых для испытаний, определяется методиками, предлагаемыми соответствующими ГОСТами, применимыми к каждому элементу электропривода.

Объект	Измеряемые переменные x	Контролируемые параметры n	Контролируемые каналы N
Асинхронный двигатель	12	15	8
Преобразователь частоты	7	11	6
Электропривод	10	13	7

На основе изложенного имитационную модель параметров объекта контроля либо испытания асинхронного двигателя, преобразователя частоты и электропривода станка-качалки нефти можно описать следующими формулами:

$$M_{\text{АД}} \begin{pmatrix} x_4 & n_7 & N_4 \\ x_5 & n_8 & N_8 \\ x_6 & n_9 & \\ x_{10} & n_{13} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \\ x_{17} & n_{23} & N_{13} \\ x_{29} & n_{37} & N_{22} \end{pmatrix} = M_{\text{АД}}(12,15,8);$$

$$M_{\text{ПЧ}} \begin{pmatrix} & n_{11} & \\ x_8 & n_{17} & N_6 \\ x_{12} & \vdots & N_{10} \\ x_{13} & n_{20} & \\ x_{19} & n_{25} & N_{11} \\ x_{20} & \vdots & N_{15} \\ x_{21} & n_{29} & N_{16} \\ x_{28} & n_{36} & N_{21} \end{pmatrix} = M_{\text{ПЧ}}(7,6,11); \quad M_{\text{ЭПСН}} \begin{pmatrix} x_4 & n_7 & N_4 \\ \vdots & \vdots & \\ x_6 & n_9 & N_{10} \\ x_{12} & n_{17} & \vdots \\ \vdots & \vdots & N_{12} \\ x_{14} & n_{21} & N_{14} \\ x_{18} & n_{24} & N_{17} \\ x_{22} & n_{30} & N_{20} \\ x_{26} & n_{34} & \\ \vdots & \vdots & \\ x_{28} & n_{36} & N_{21} \end{pmatrix} = M_{\text{ЭПСН}}(10,13,7).$$

Такое представление объектов исследования позволяет упростить процесс формирования алгоритмического обеспечения процессов испытания элементов электропривода на программном уровне. Различное количество контролируемых каналов при проведении испытаний составных частей и электропривода в целом объясняется различием программ и методик испытаний для каждого элемента. Например, состояние обмотки статора в процессе испытания электропривода не проверяется, а проверяется только при испытании его составной части – электродвигателя, а также в зависимости от вида проводимого испытания (приемо-сдаточные испытания или испытания на правильность функционирования программного обеспечения станции управления электропривода).

Применительно к нефтяной промышленности процесс испытания электроприводов заключается не в получении энергетических характеристик при работе на номинальных режимах, а при работе в условиях, максимально приближенных к реальным, т. е. при изменяющейся нагрузке в течение периода качания (как правило составляющего 10–60 с), и в течение времени, при котором происходят изменения свойств добываемой жидкости. Данный вид испытаний необходим для правильной настройки встроенных алгоритмов управления электроприводом и защиты, реагирующих на возникновение аварийных ситуаций.

Приведем графики изменения нагрузки в течение одного качания (рис. 3, а) и запуска процесса добычи (рис. 3, б). Данные графики получены в ходе проведения измерений на действующей скважине. Мгновенные мощности за один период качания (сформированные в массиве) складываются, и формируется итоговая мощность за одно качание, из которой формируется массив мощностей во времени.

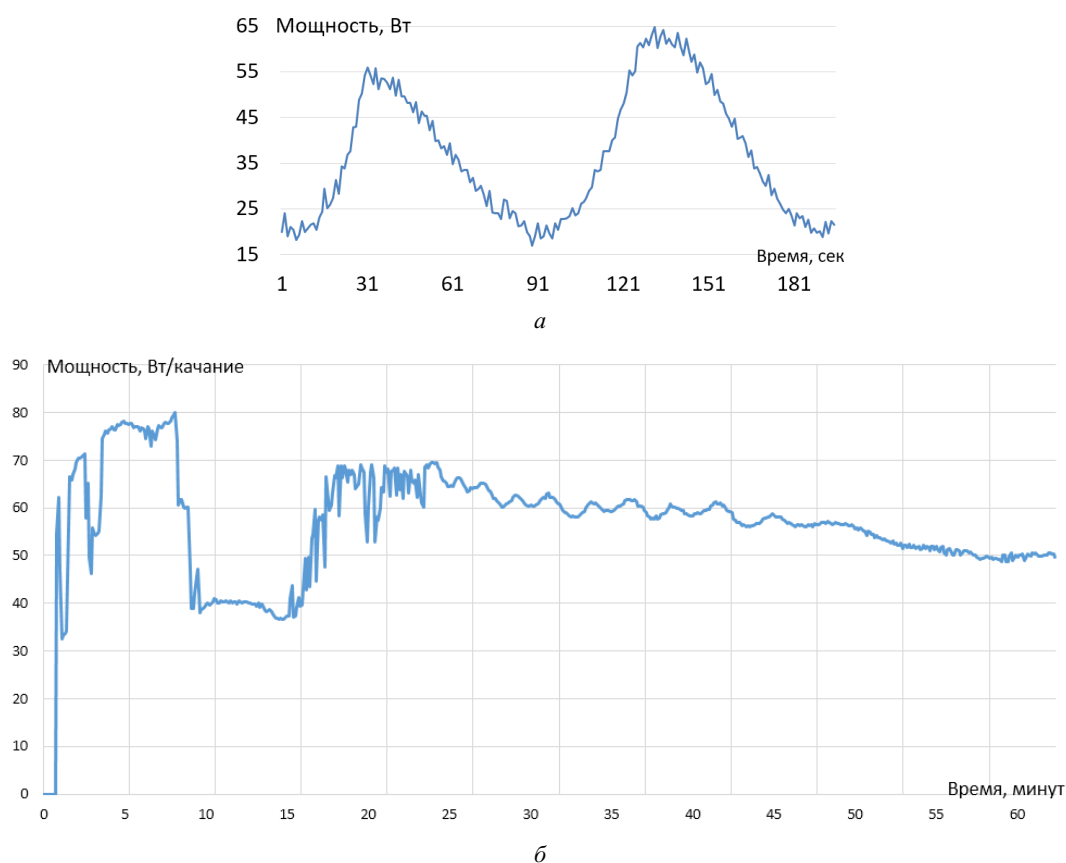


Рис. 3

Сформированные массивы данных переносятся в систему управления испытательного стенда и с использованием канала контроля величины нагрузки на испытываемом асинхронном двигателе формируют требуемую нагрузку, изменяемую во времени. При этом за стандартную нагрузку качания принимается массив мощностей за одно качание с последующим пересчетом амплитуды на суммарную мощность, хранимую в массиве мощностей во времени. Благодаря наличию данного канала контроля условия испытаний максимально приближаются к реальным условиям эксплуатации электропривода.

Под функциональным оператором A будем понимать элемент, выполняющий определенные действия с данными или устройствами, под логическим оператором P – условие, принимающее значение 1 (истина) или 0 (ложь). Логическая схема алгоритма, удовлетворяющая правилам Ляпунова, записывается в виде строки из символов A и P со стрелками переходов [15].

Для упрощения применения предложенной методики формирования структуры информационно-измерительного комплекса испытательного стенда контролируемые параметры целесообразно объединить в контуры контроля. Обозначим контуры контроля символом AN . В этом случае контур контроля «электрическая цепь переменного тока» формируется на основе контролируемых каналов N_4 (измерение напряжения переменного тока) и N_5 (измерение переменного тока). Результатом функционирования данного контура являются значения напряжения, тока, частоты, мощности и коэффициента мощности. По способу получения и виду информации о контролируемом параметре такой контур относится к количественному контролю, по характеру взаимодействия с объектом контроля – к контактным методам, а по степени автоматизации – к автоматизированному контролю.

Приведем пример формирования контура контроля «электрическая цепь переменного тока». Логическая схема алгоритма данного контура имеет вид:

$$\begin{array}{ccccccc} 3 & 1 & 1 & 2 & 2 & 3 & \\ A_0 \downarrow A_1 A_2 P_1 \uparrow A_3 \downarrow A_4 A_5 A_6 P_2 \uparrow A_7 \downarrow A_8 A_9 A_{10} A_{11} P_3 \uparrow A_{12} A_{13} A_{14} A_{15} A_{16} A_K \end{array}$$

Граф-схема алгоритма представлена на рис. 4.

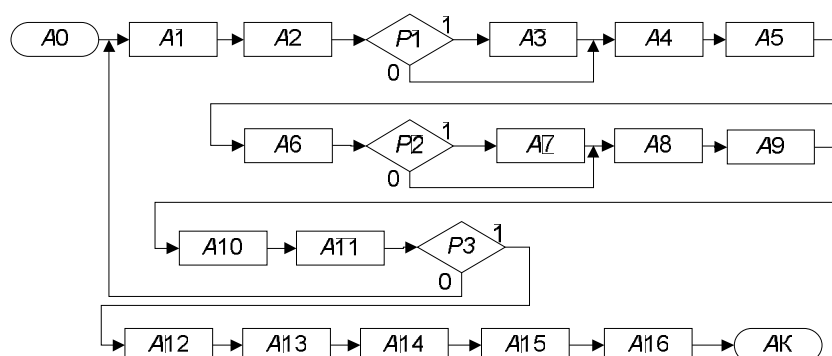


Рис. 4

В данном алгоритме выполняется программное обеспечение работы контура контроля параметров переменного напряжения. Процесс построен на быстром измерении мгновенных значений тока и напряжения с накоплением и последующим определением среднеквадратичного значения тока и напряжения (операторы $A_1 \dots A_{13}$), частоты (оператор A_{14} на основе детектирования перехода напряжения через ноль оператором P_1), коэффициента мощности (оператор A_{15} на основе детектирования перехода через ноль тока и напряжения операторами P_1 и P_2 с вычислением смещения тока относительно напряжения) и активной мощности (оператор A_{16}).

Управляющие контуры контроля предназначены для формирования выходных воздействий на исполнительные устройства; в качестве примера может быть приведен канал контроля AN_{10} , обеспечивающий управление нагрузочным устройством. По способу получения и виду информации о контролируемом параметре данный контур относится к количественному контролю, по характеру взаимодействия с объектом контроля – к бесконтактным методам, а по степени автоматизации – к автоматическому контролю.

Логическая схема алгоритма контура имеет вид

$$\begin{array}{ccccccc} 1 & 1 & 2 & 2 & & & \\ A_0 A_1 A_2 A_3 P_1 \uparrow A_4 \downarrow P_2 \uparrow A_5 \downarrow A_6 A_K \end{array}$$

Далее выстраивается граф-схема алгоритма (рис. 5).

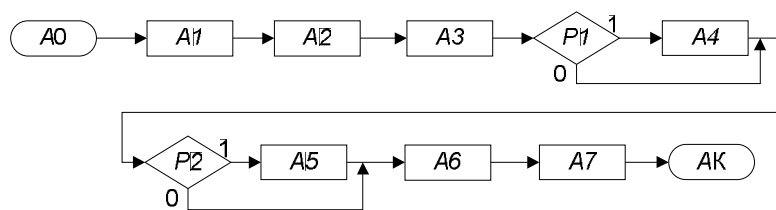


Рис. 5

В данном алгоритме реализовано управление нагрузочным устройством испытательного стенда, выполненным на базе управляемого преобразователя частоты и нагрузочного асинхронного электродвигателя. Нагрузочный электропривод может функционировать в одном из двух режимов: в режиме противовключения при отключенной обратной связи либо в режиме прямого управления моментом. Алгоритм предусматривает возможность оперативного переключения, по команде оператора, между режимом управления скоростью вращения и режимом управления нагрузочным моментом. При этом обеспечивается задание и изменение требуемого значения управляющего параметра, определяющего величину формируемого нагрузочного воздействия на испытываемый электродвигатель или электропривод.

Изменение величины нагрузочного параметра, воздействующего на испытываемый электродвигатель или электропривод, позволяет имитировать условия функционирования реального станка-качалки в нефтедобыче за счет изменения нагрузочного момента во времени. Реализация такого режима обеспечивается посредством многократного обращения к представленному алгоритму с новым значением нагрузки, выбираемым из соответствующего массива данных (см. рис. 3).

Обеспечение надежности и отказоустойчивости испытательного комплекса, построенного на базе предлагаемого информационно-измерительного комплекса, основывается на принципе резервирования. Реализация данного принципа предполагает введение структурной избыточности, при которой в состав системы включаются дополнительные элементы сверх минимально необходимого набора, обеспечивающего выполнение ее функционального назначения. Такой подход превращает комплекс в избыточную техническую систему на основе информационно-измерительного комплекса, которая способна сохранять работоспособность даже при отказе одного или нескольких компонентов.

В теории надежности при проектировании сложных систем используют два основных понятия, тесно связанных с резервированием, – надежность и избыточность. Надежность характеризуется такими показателями, как наработка на отказ и отказоустойчивость (живучесть), обеспечение которой возможно за счет микроконтроллерного управления с реализацией алгоритмов восстановления работоспособности на основе резервных элементов. Избыточность – это введение в систему дополнительных (сверх минимально необходимых) средств, ресурсов, времени или информации. Для реализации этих принципов на практике применяются два основных подхода, дополняющих друг друга: структурное и информационное резервирование.

Структурное (аппаратное) резервирование представляет собой способ повышения надежности системы за счет создания физической избыточности оборудования. В зависимости от уровня резервирования выделяют общее резервирование, предусматривающее наличие резерва на случай отказа устройства в целом, и раздельное резервирование, при котором резервируются отдельные составные элементы.

Информационное и временное резервирование – это методы повышения надежности без дублирования «железа» с использованием интеллектуальных алгоритмов и избыточности во времени.

Информационное резервирование реализуется добавлением избыточной информации в управляющие сигналы для обнаружения и исправления ошибок. Включает алгоритмы контроля и диагностики (сбор данных с датчиков тока, температуры и вибрации для мониторинга состояния и предотвращения отказов) и алгоритмы восстановления, позволяющие системе адаптировать структуру управления при отказе элементов.

Временное резервирование (алгоритмическая избыточность) реализуется за счет использования резерва времени для повторного выполнения операций, если первая попытка была неудачной из-за сбоя или помех.

Примером реализации структурного и информационного резервирования в составе информационно-измерительного комплекса может служить система измерения трехфазного переменного тока, напряжения, мощности и других электрических параметров с учетом симметричного характера нагрузки. В рассматриваемом случае преобразователь частоты, питаемый от трехфазной сети, содержит на входе мостовой выпрямитель, преобразующий переменное напряжение в напряжение общей шины постоянного тока, а асинхронный двигатель характеризуется симметрией статорной обмотки. При отказе одного из измерительных каналов, например, канала фазы А, значения контролируемых параметров могут быть определены расчетным путем на основе показаний одного из оставшихся фазных каналов. С точки зрения структурного резервирования отказ измерительной подсистемы одного из каналов может привести к тому, что соответствующая фаза окажется незащищенной от аварийного режима. Однако данная проблема компенсируется наличием в силовой части испытательного стенда устройств защиты от перегрузок и сверхтоков. Реализация остальных защитных функций в этом случае возлагается на автономно функционирующую систему защиты преобразователя частоты, входящего в состав станции управления.

Предложенная совокупность логических схем алгоритмов образует завершенную теоретическую основу для построения информационно-измерительного комплекса с перестраиваемой структурой. Новизна предлагаемого подхода определяется рядом положений.

Во-первых, обеспечивается универсальность формализации, поскольку единая модель $M(x, n, N)$ позволяет описывать широкий круг электротехнических объектов – от простейших датчиков до многодвигательных систем. Во-вторых, достигается сокращение числа измерительных каналов за счет применения косвенных методов определения параметров; в частности, такие величины, как коэффициент мощности и частота, могут быть рассчитаны на основе измерений напряжения и тока, что позволяет снизить количество физических каналов в среднем на 30–40 %. В-третьих, разработанные логические схемы алгоритмов обеспечивают полноту контроля, охватывая как измерительные функции, включая определение среднеквадратических значений, коэффициентов абсорбции, виброскорости и усилия, так и управляющие функции, связанные с работой преобразователя частоты, нагрузочного устройства и коммутационного оборудования. В-четвертых, предложенный подход создает предпосылки для автоматической генерации программного кода, поскольку логические схемы алгоритмов могут быть непосредственно транслированы в программную реализацию для программируемых логических контроллеров и микроконтроллерных систем.

Сравнение с известными работами показывает, что традиционные подходы к построению информационно-измерительного комплекса для электроприводов используют либо жестко заданные конфигурации каналов, либо сложные экспертные системы. Предлагаемый метод занимает промежуточное положение, обеспечивая адаптивность через перестраиваемую логику при сохранении детерминированности и верифицируемости. Примерами реализации предложенной методики могут служить испытательные стенды, разработанные для различных систем электроприводов [11–14], основой которых является аппаратно-программный комплекс, построенный на информационно-измерительном комплексе с перестраиваемой структурой с расширенным функционалом и набором контуров контроля для выполнения измерений энергетических характеристик объектов испытания и формирования нагрузочных воздействий с целью имитации условий работы, приближенных к реальным, включая нормальные и аварийные режимы работы.

В результате проведенных теоретических исследований получены следующие основные результаты.

Выполнено аналитическое описание двух типов электротехнических объектов (асинхронный двигатель, преобразователь частоты) и сложного электропривода. Установлены перечни контролируемых параметров, каналов и переменных, их характеристики.

Разработана методология синтеза логических схем алгоритмов для информационно-измерительного комплекса на основе функциональных и логических операторов с использованием граф-схем.

Построены логические схемы для измерительных контуров (температура, параметры изоляции, переменный ток, скорость вращения, виброскорость, крутящий момент, усилие) и управляющих контуров (задание скорости, нагрузки, команд преобразователя частоты, управления нагрузочным устройством, регулятором напряжения).

Предложена единая формализованная модель $M(x, n, N)$, позволяющая количественно оценивать сложность информационно-измерительного комплекса и сравнивать варианты его построения.

Разработанные алгоритмические решения являются основой для последующей программной реализации информационно-измерительного комплекса, а также для его интеграции в системы более высокого уровня (SCADA, MES, ERP). Представленные материалы имеют как теоретическое значение (формализация процедур контроля и управления), так и практическую ценность (возможность непосредственного использования при создании прикладного программного обеспечения для испытательных стендов электроприводов нефтедобывающих скважин) [16].

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Енекеева Э.Р. и др. Принцип построения автоматизированной системы управления электроприводом механизмов добычи нефти // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2013. № 7. С. 116–126.
2. Давыдов Д.А., Пыльская Е.К. Информационно-измерительные системы электротехнологических установок и комплексов. Вологда: Инфра-инженерия, 2024. 168 с.
3. Федотов М.М. и др. Разработка экспериментального стенда для изучения характеристик ступени осевой турбины // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2022. № 2 (96). С. 93–104.
4. Столыга И.А., Комарова С.Г. Процедура создания испытательного стенда на предприятии // Успехи в химии и химической технологии. 2017. № 5 (186). С. 25–27.
5. Ленеvский Г.С., Синюкович А.А., Шнип Д.В. Разработка нового испытательного оборудования для продукции LLC «Novusindustry» на электрооборудовании ПО «ОВЕН» // Вестник Белорусско-Российского университета. 2023. № 3 (80). С. 134–143.
6. Сорокин А.В., Леоненко А.С. Система управления испытательного стенда тяговых двигателей постоянного тока // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 6 (65). С. 133–137.
7. Морозов А.Л. Статистическая методика и алгоритм диагностики асинхронных двигателей на основе вибросигналов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2021. № 2. С. 60–67.
8. Омельченко Е.Я. др. Энергоэффективные испытательные стенды для электродвигателей // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 3 (40). С. 12–19.
9. Карпенко С.С., Батраков Р.В. Особенности конструирования испытательного оборудования с учетом применяемых средств измерений и автоматизации процесса испытаний // Мир измерений. 2021. № 1. С. 10–13.
10. Цветков А.Н. и др. Управляющая измерительно-информационная система экспериментального стенда // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2020. № 4. С. 88–98.
11. Гибадуллин Р.Р. и др. Система привода и нагружения испытательного стенда для электрических машин возвратно-поступательного действия // Энергетика Татарстана. 2016. № 1 (41). С. 22–25.
12. Владимиров О.В. и др. Стенд для послеремонтных испытаний асинхронных двигателей напряжением до 1000 В // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2019. № 3-4. С. 58–66.
13. Гибадуллин Р.Р. и др. Стенд для исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2022. № 1. С. 164–175.
14. Цветков А.Н. и др. Разработка стенда для исследования электроприводов станков-качалок // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2020. № 4. С. 364–375.
15. Ляпунов А.А. О логических схемах алгоритмов // Проблемы кибернетики. 1955. № 2. С. 10–45.
16. Tsvetkov A.N. et al. Adaptive Control System of the Pumping Unit // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). 2019. Vol. 8. Iss. 5S3. P. 289–291.

Поступила в редколлегию 13.05.26

THEORETICAL BASIS FOR CONSTRUCTING AN INFORMATION AND MEASUREMENT COMPLEX FOR TESTING ELECTRIC DRIVES OF OIL-PRODUCING WELLS

A.N. Tsvetkov

A universal approach to synthesizing an information-measuring system based on the logic circuits of Lyapunov algorithms, adapted for electromechanical oil production facilities, is proposed. Analytical expressions are derived for minimizing the number of controlled channels while maintaining completeness of control. Logic circuits are presented for control loops for the position of the translator, DC and AC electrical circuits, insulation parameters, vibration, force, and control actions. The developed algorithmic solutions are the basis for the software implementation of the information-measuring complex, its integration into control systems and can be directly used in the creation of stands for research and testing of electric drives.

Keywords: information-measuring system, AC electric drive, oil well, algorithm logic diagram, functional operator, monitored parameter.

Цветков Алексей Николаевич – канд. техн. наук (КГЭУ, Казань)
E-mail: tsvetkov9@mail.ru

АНАЛИЗ ФОРМЫ И ДИНАМИКИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ДЕФЕКТЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИЗОЛЯТОРА

М.А. Шакирзянов, А.В. Голенищев-Кутузов

На изоляторе ПС70Е с искусственным дефектом экспериментально исследованы коэффициент формы пятна и коэффициент пульсаций ультрафиолетового излучения для двух величин воздушного зазора. Установлено, что с ростом напряжения коэффициент формы снижается, а коэффициент пульсаций в режиме насыщения не превышает 0,2 %. Показано, что форма пятна изменяется во времени. Предложенные параметры применимы для количественной классификации дефектов изоляции.

Ключевые слова: частичные разряды, ультрафиолетовая диагностика, коэффициент формы, пульсации, стабильность разряда, CoroCAM 7, ПС70Е.

Согласно данным работы [1] существенная часть аварийных отключений в электрических сетях связана с дефектами высоковольтной изоляции. При проведении диагностики с использованием ультрафиолетовых камер оператор наблюдает светящуюся область, однако по ее геометрическим характеристикам не представляется возможным достоверно идентифицировать тип разряда и разграничить опасный поверхностный разряд и коронный разряд, не представляющий существенной угрозы для работоспособности оборудования. Количественные параметры – коэффициент формы пятна K и коэффициент пульсаций K_n – позволяют перейти от субъективной визуальной оценки к объективным критериям классификации дефектов. На ранних стадиях дефекты сопровождаются частичными разрядами, которые генерируют ультрафиолетовое излучение. Фундаментальные положения физики частичных разрядов, включая механизмы стримерного пробоя и роль поверхностных зарядов, подробно представлены в монографии [2]. Ультрафиолетовый метод позволяет визуализировать частичные разряды дистанционно, без отключения оборудования [3]. В работе [4] анализируется использование ультрафиолетовых камер семейства CoroCAM применительно к диагностике подвесной изоляции, эксплуатируемой на распределительных подстанциях и воздушных линиях электропередачи. Поверхностные частичные разряды являются достаточно надежными индикаторами опасных уровней загрязнения изоляции и могут обнаруживаться различными способами, включая акустические, электромагнитные и оптические методы, в том числе с использованием дистанционной регистрации электромагнитных и акустических сигналов [5]. Методы измерений частичных разрядов, включая кажущийся заряд, частоту повторения и фазовое распределение, стандартизованы в ГОСТ Р 55191-2012 [6].

Развитие ультрафиолетовых дефектоскопов достигло уровня, позволяющего выполнять инспекцию в дневное время. Как показано в работе [3], приборы серии «Филин» российского производства способны формировать детализированное изображение разрядных процессов с различимостью отдельных ветвей стримерной короны. Результаты апробации двухспектральной версии дефектоскопа «Филин-7» в реальных условиях [7] подтвердили его эффективность для проведения ультрафиолетовой инспекции электрооборудования в светлое время суток. Следует отметить, что задача установления количественных связей между характеристиками разрядной активности и степенью загрязнения изоляции остается сложной и до конца не решенной. Сложность обусловлена комплексным характером физико-химических процессов и влиянием внешних факторов, а также недостаточной изученностью метрологических характеристик применяемой аппаратуры.

Цель работы – количественный анализ формы и временной динамики ультрафиолетового излучения частичных разрядов в искусственном дефекте изолятора ПС70Е для двух величин воздушного зазора, позволяющий получить числовые параметры (коэффициент формы и коэффициент пульсаций) для сравнения поведения разряда при разных напряжениях, выявления различий в разветвленности разряда между зазорами 0,5 и 2 мм и выявления изменения формы пятна во времени.

Задачи исследования – определить коэффициент формы K для обоих зазоров при различных значениях напряжения, рассчитать коэффициент пульсаций K_n для каждого зазора в режиме насыщения, выполнить анализ динамики формы пятна во времени, сравнить полученные параметры для двух зазоров.

Научная новизна заключается в следующем. В работе для стеклянного изолятора ПС70Е получены количественные значения коэффициента формы K (в диапазоне 0,42...0,89) для двух величин воздушного зазора (0,5 и 2 мм) при напряжениях в диапазоне 5...25 кВ. Установлено, что в режиме насыщения коэффициент пульсаций K_n не превышает 0,2 %, что свидетельствует о высокой стабильности разряда. Показано, что форма пятна изменяется во времени, что необходимо учитывать при интерпретации результатов ультрафиолетовой диагностики.

Экспериментальная установка включала источник высокого напряжения АИД-70М, гирлянду из трех подвесных стеклянных изоляторов ПС70Е (диаметр тарелки – 255 мм, высота – 146 мм, путь утечки – 320 мм) и регистрирующую ультрафиолетовую камеру CoroCAM 7.

На поверхности второго изолятора создано протяженное проводящее включение из металлизированного скотча, соединенное с верхней арматурой и доходящее почти до нижней. В средней части созданного проводящего контура была зафиксирована металлическая пластина, которая совместно с перемещаемым острым электродом формирует искровой воздушный промежуток.

Смоделированный дефект на втором изоляторе – металлизированная лента, контактная пластина, перемещаемый игольчатый электрод. В ходе эксперимента фиксировались два положения острейного электрода, соответствующие зазорам 0,5 и 2 мм.

Напряжение подавалось от испытательного аппарата АИД-70М (переменный ток – 50 Гц, 0–50 кВ). Погрешность установки напряжения составляла ± 3 %. Фиксация ультрафиолетовых сигналов осуществлялась камерой CoroCAM 7 в спектральном интервале 240...280 нм (солнечно-слепой режим) при удалении 2,5 м от объекта. Аппаратно-программный комплекс для бесконтактного дистанционного контроля состояния высоковольтных изоляторов, включающий электромагнитный и акустический датчики, описан в работе [8]. Аналогичные принципы дистанционной диагностики дефектов изоляции изложены в патенте [9]. Коэффициент усиления камеры (Gain) составлял 85 %, расстояние до гирлянды – 2,5 м. В работе [10] показано, что число регистрируемых ультрафиолетовых фотонов обратно пропорционально расстоянию до объекта. Такое значение выбрано для улучшения видимости слабых ветвей разряда, что ограничивает анализ абсолютных значений интенсивности.

Для анализа формы выбраны кадры ультрафиолетовых изображений при напряжениях, соответствующих устойчивому разряду, режиму почти насыщения и насыщению (табл. 1).

Таблица 1

Зазор, мм	Напряжение U , кВ	Площадь S , пикс	Периметр P , пикс	Коэффициент формы K
0,5	5	25833	604,644	0,888
0,5	7,5	42775	784,54	0,873
0,5	10	58878	983,457	0,765
0,5	15	54217	981,07	0,708
0,5	20	62999	1089,532	0,667
0,5	25	66337	1146,62	0,634
2	10	65710	1265,323	0,516
2	12,5	91683	1569,011	0,468
2	15	68478	1435,456	0,418
2	20	70078	1507,817	0,387
2	30	70771	1432,815	0,433

Обработка выполнена в программе ImageJ. Контур наиболее интенсивного светящегося пятна выделялся вручную опытным оператором. Для минимизации субъективности каждый кадр был обработан дважды. Расхождение между двумя последовательными измерениями не превысило 3 %, что подтверждает приемлемую воспроизводимость метода. Далее для каждого кадра выделялся контур наиболее интенсивного светящегося пятна, вычислялись площадь S (пиксели) и периметр P (пиксели). Методы циф-

ровой обработки ультрафиолетовых изображений для выделения площади светящегося пятна и количественной оценки интенсивности разряда предложены в работе [11]. Коэффициент формы рассчитывался по формуле

$$K = \frac{4\pi S}{P^2}. \quad (1)$$

Для проверки постоянства условий съемки проводилась калибровка с использованием диаметра тарелки ПС70Е (255 мм). Установленный коэффициент пересчета составил 2,2 пикс/мм. Расчет коэффициента формы K , являющегося безразмерной величиной, производился в пикселях, а калибровка осуществлялась для подтверждения неизменности условий регистрации. Разница между двумя повторными ручными обработками одного кадра составила не более 3 %.

Для анализа пульсаций использованы видеозаписи при фиксированных напряжениях: 30 кВ (зазор – 0,5 мм, 20 точек, шаг – 3 с) и 35 кВ (зазор – 2 мм, 20 точек, шаг – 1,5 с). Выбор напряжений обусловлен физическими режимами разряда: 5 кВ (устойчивый разряд для зазора 0,5 мм), 10 кВ (почти насыщение), 20 кВ (насыщение). Для зазора 2 мм первое появление разряда зафиксировано при 10 кВ, поэтому выбраны напряжения 10 кВ (первое появление), 15 кВ (рост) и 25 кВ (насыщение). Выбранные величины зазора (0,5 и 2 мм) являются характерными: первый обеспечивает стабильное горение разряда в диапазоне 5...20 кВ, второй требует более высоких напряжений (10...25 кВ) для поддержания разряда. Рассчитывались средняя интенсивность $N_{\text{ср}}$, стандартное отклонение σ и коэффициент пульсаций по формуле

$$K_{\text{п}} = \frac{\sigma}{N_{\text{ср}}}. \quad (2)$$

Для зазора 0,5 мм (30 кВ) выполнен покадровый анализ: на 11 кадрах (интервал – 1 с, длительность – 10 с) выделялся контур пятна и вычислялся K для каждого кадра.

Во всех случаях наблюдается эволюция формы пятна: с ростом напряжения пятно становится более разветвленным.

Результаты измерений площади, периметра и расчета коэффициента формы K ультрафиолетового излучения для разных зазоров и напряжений сведены в табл. 1.

Значения S и P приведены с точностью, полученной в программе ImageJ, округление до целых пикселей не проводилось для сохранения точности последующих расчетов K .

На рис. 1 представлена зависимость $K(U)$ для двух зазоров.

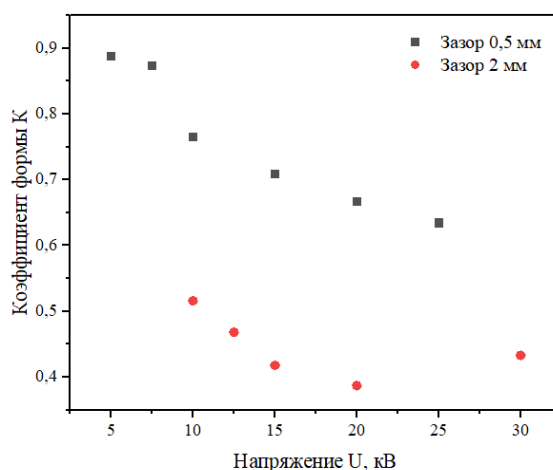


Рис. 1

На рис. 2 представлены пульсации интенсивности ультрафиолетового излучения: a – зазор – 0,5 мм, $U = 30$ кВ; b – зазор 2 мм, $U = 35$ кВ.

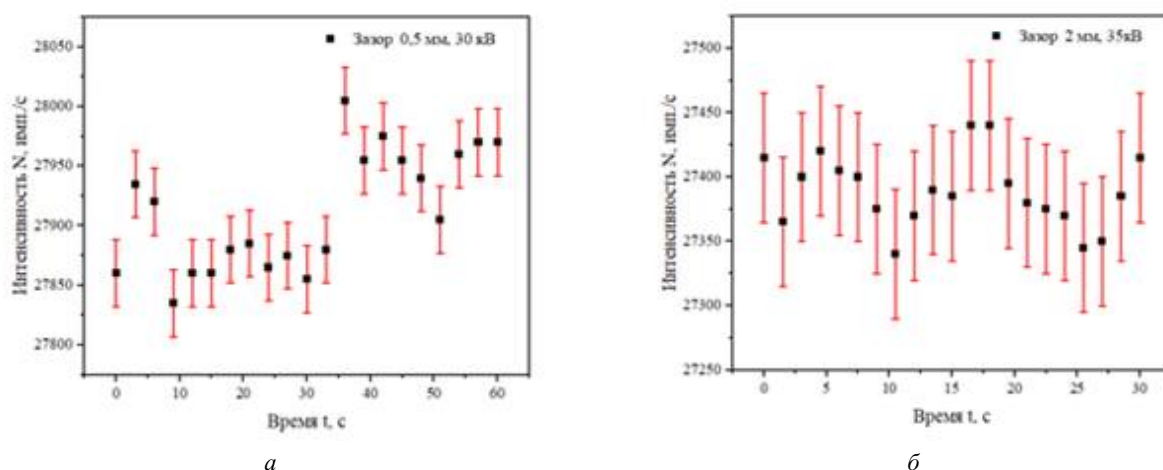


Рис. 2

На графиках (см. рис. 2) планками погрешностей отмечена величина стандартного отклонения σ , характеризующая разброс измеренных значений интенсивности от времени.

Полученные сводные статистические данные характеристик приведены в табл. 2.

Таблица 2

Зазор, мм	Напряжение U , кВ	Интенсивность $N_{\text{ср}}$, имп./с	Стандартное отклонение σ , имп./с	Коэффициент пульсации $K_{\text{п}}$
0,5	30	27388,6	28,0	0,0010
2	35	27911,7	50,2	0,0018

На рис. 3 представлен график изменения интенсивности излучения N от приложенного напряжения U .

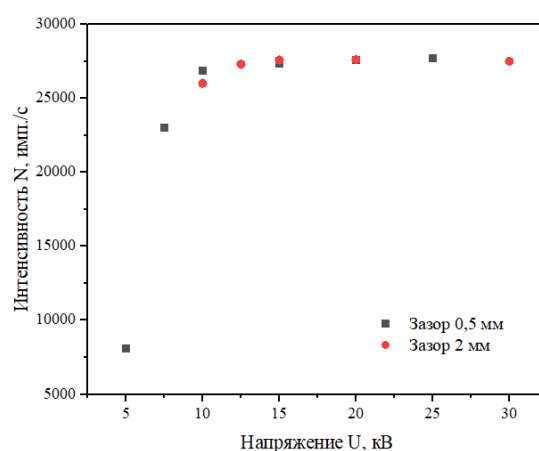


Рис. 3

При межэлектродном зазоре 0,5 мм с увеличением напряжения до 10 кВ наблюдается рост интенсивности разряда, тогда как при дальнейшем повышении напряжения среднее значение интенсивности стабилизируется на уровне около 27000 имп./с. В другом случае, когда зазор зафиксирован в положении 2 мм, интенсивность достигает максимума в значении 27625 имп./с при 20 кВ, и при дальнейшем увеличении напряжения до 30 кВ интенсивность незначительно снижается до 27510 имп./с. Отсутствие дальнейшего роста сигнала интенсивности N после напряжения 20 кВ позволяет обозначить интервал 20...30 кВ как область насыщения.

Для оценки временной изменчивости размеров и формы пятна разряда на рис. 4 приведена эволюция коэффициента формы K при заданном напряжении 30 кВ и установленном зазоре 0,5 мм.

Результаты, полученные на основании анализа графика $K(t)$ (рис. 4), приведены в табл. 3.

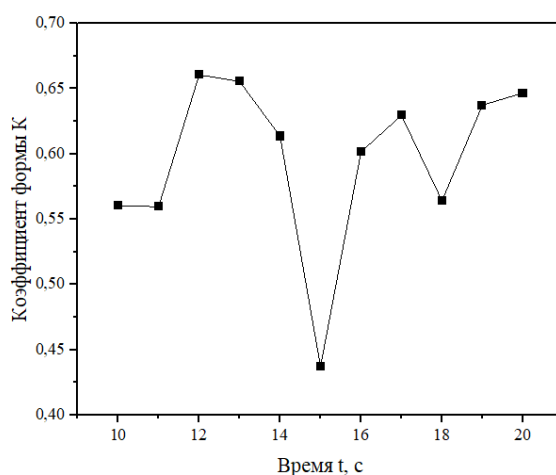


Рис. 4

Таблица 3

Время t , с	Коэффициент формы K
10	0,560
11	0,560
12	0,661
13	0,656
14	0,614
15	0,437
16	0,602
17	0,630
18	0,564
19	0,637
20	0,647
-	-

Параметр – коэффициент формы K пятна частичного разряда – позволяет количественно описать степень разветвленности разряда: чем меньше значение K , тем более разветвленным является пятно. Представленная на рис. 3 зависимость $N(U)$ показывает, что при зазоре 0,5 мм интенсивность стабилизируется при напряжении $U \geq 10$ кВ, а в случае установленного зазора 2 мм увеличение интенсивности замедляется после 20 кВ. В выбранном диапазоне напряжений это объясняет малые значения коэффициента пульсаций K_n (менее 0,2 %). При зазоре 0,5 мм параметр K постепенно снижается с ростом напряжения: от значения 0,888 (при 5 кВ) до 0,634 (при 25 кВ), что свидетельствует о постепенном усилении разветвленности частичного разряда. В другом случае, когда зазор в положении 2 мм, коэффициент формы K также снижается от значения 0,516 (при 10 кВ) до 0,387 (при 20 кВ), а затем незначительно возрастает до 0,433 при 30 кВ. Такой рост можно объяснить как физическими эффектами (изменениями геометрии разрядного промежутка, сменой формы разряда), так и естественным стохастическим разбросом, характерным для частичных разрядов. Несмотря на указанное отклонение, полученные результаты подтверждают, что при зазоре 2 мм формируется более разветвленная структура пятна частичного разряда по сравнению с зазором 0,5 мм. Это подтверждается сравнением коэффициента формы при одинаковом напряжении 10 кВ: для зазора 2 мм его значение составляет 0,516, тогда как для зазора 0,5 мм – 0,765.

Полученные результаты соответствуют результатам работы [12], в которой также установлена зависимость параметров ультрафиолетовых изображений от степени разряда для загрязненных изоляторов. Кроме того, в работе [13] описан алгоритм сегментации ультрафиолетовых изображений, который позволяет выделить площадь светящейся области для последующего количественного анализа, что подкрепляет полученные результаты о чувствительности коэффициента формы K к условиям разряда.

Как следует из данных табл. 2, значения коэффициента пульсаций K_n составляют 0,0010 и 0,0018, что более чем на порядок ниже типичных значений для частичных разрядов (0,05–0,15). Столь низкие

значения обусловлены проведением экспериментов при напряжениях 30 и 35 кВ, соответствующих режиму насыщения, в котором частичный разряд характеризуется непрерывным и стабильным протеканием. Под состоянием «режим насыщения» подразумевается диапазон напряжений, при котором дальнейшее повышение напряжения не приводит к существенному росту интенсивности ультрафиолетового излучения частичного разряда. В установленном режиме насыщения стохастическая природа частичных разрядов проявляется слабо: разброс интенсивности не превышает значения 0,2 % от среднего значения из табл. 2. Такой разброс стандартного отклонения $\sigma = 28 \div 50$ имп./с может быть связан с шумом квантования камеры CoroCAM 7, однако он сопоставим с физическими флуктуациями разряда. Так, в работе [7] установлено, что показания счетчика фотонов ультрафиолетовых дефектоскопов нелинейно зависят от коэффициента усиления. Кроме того, выявлено, что присутствующие в воздухе водяной пар и частицы пыли могут вызывать ложное увеличение регистрируемой интенсивности частичных разрядов вследствие отражения ультрафиолетового излучения.

В работе [14] показано, что мощные частичные разряды возникают за счет накопления зарядов на диэлектрических поверхностях дефектов, создавая индуцированные поля, которые могут превышать приложенное напряжение.

Из рис. 4 видно, что K изменяется во времени в пределах 0,44...0,66. Наблюдаются быстрые изменения коэффициента формы, что свидетельствует о нестационарности геометрии разряда даже при стабильной интегральной интенсивности (см. рис. 2). При $t = 15$ с зафиксировано резкое снижение K до 0,437, сопровождавшееся кратковременным увеличением площади пятна (см. табл. 3). Подобные изменения могут быть связаны с перестройкой стримерных каналов в полости дефекта [15, 16]. Следует отметить, что резкое падение $K(t)$ до 0,437 на 15-й секунде (см. табл. 3, рис. 4) может быть частично обусловлено субъективностью ручной сегментации. Тем не менее сам факт флуктуации коэффициента формы в диапазоне 0,44...0,66 подтверждает нестационарность процесса. В работе [17] предложена математическая модель для идентификации отдельных источников частичных разрядов по временным меткам импульсов. В данной работе используются другие диагностические признаки – форма и динамика ультрафиолетового излучения, что позволяет оценивать разряд по иным, дополнительным параметрам (K , K_n , $K(t)$).

Классификация [18] выделяет три уровня состояния изолятора по ультрафиолетовому излучению: отсутствие разрядов, наличие частичных разрядов, наличие дуги. В настоящей работе для обоих зазоров зафиксирован второй уровень – наличие частичных разрядов. При этом для зазора 2 мм коэффициент пульсаций K_n выше, чем для 0,5 мм, что указывает на меньшую стабильность разряда. Полученные результаты согласуются с данными [19] о влиянии величины зазора на ультрафиолетовое излучение.

Работа выполнена с целью перехода от качественной визуальной оценки ультрафиолетового излучения к количественным критериям диагностики дефектов изоляции. Значения параметров K , K_n позволяют различать два состояния дефекта. Для межэлектродного зазора 0,5 мм значение коэффициента K превышает 0,63, что соответствует менее развитому дефекту, тогда как при зазоре 2 мм значение K не превышает 0,52, что характерно для более развитого дефекта.

Коэффициент пульсаций K_n в режиме насыщения не превышает 0,2 %, что на порядок ниже типичных значений для частичных разрядов и подтверждает стабильность разряда. Предложенные параметры (K , K_n) позволяют различать не конкретные типы дефектов, а стадии развития разряда и степень его разветвленности, что согласуется с подходами, предложенными в работах [17, 18], и может быть учтено при оценке опасности дефекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овсянников А.Г. Частичные разряды и диагностирование оборудования высокого напряжения. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. 256 с.
2. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия, 1979. 224 с.
3. Арбузов Р.С. и др. Повышение эффективности контроля высоковольтного оборудования с помощью УФ-дефектоскопов // Энергия единой сети. 2023. № 2 (69). С. 32–39.

4. Мирзаабдуллаев А.О. Об особенностях контроля подвесной изоляции распределительных устройств и воздушных линий электропередачи // Энергетик. 2025. № 8. С. 11–15.
5. Голенищев-Кутузов А.В. и др. Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах в процессе эксплуатации // Дефектоскопия. 2018. № 10. С. 10–14.
6. ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000). Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов. М.: Стандартинформ, 2012.
7. Овсянников А.Г., Жарич Д.С., Швец Н.А. Сравнительный анализ метода контроля состояния изоляции по ультрафиолетовому излучению поверхностных частичных разрядов // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2025. № 4. С. 82–93.
8. Хуснутдинов Р.А. Аппаратно-программный комплекс и методика дистанционного контроля состояния высоковольтных изоляторов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2017. 16 с.
9. Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов: пат. 2679759 Рос. Федерация, № 2018110016; заявл. 21.03.2018; опубл. 12.02.2019, Бюл. № 5.
10. Chunyan Z. *et al.* Study on Application of Ultra-Violet Instrument in External Insulation Detection of Electric Device // International Conference on High Voltage Engineering and Application, Nov. 9–13, 2008, Chongqing, China. P. 391–393.
11. Wang S. *et al.* Research on the Extraction Method of Quantitative Parameters for Discharge Ultraviolet Imaging Detection of Polluted Insulators Based on Digital Image Processing // Journal of Physics: Conference Series, Jan. 17–20, 2025, Wuhan, China. Vol. 3012. № 1. P. 12–28.
12. Wang S., Zhou M., Li N. Discharge Ultraviolet Image Characteristics and Insulation State Evaluation of Polluted and Wet Suspension Porcelain Insulator Strings // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2024. Vol. 73. P. 1–10.
13. Chen J. *et al.* Accurate Ultraviolet Image Detection of Electrical Equipment Based on Gaussian Color Mapping Image Segmentation Algorithm // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. № 5. Article № 2837.
14. Иванов Д.А. Исследование электрофизических процессов и старения материала высоковольтных изоляторов для определения их рабочего ресурса // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2022. № 2. С. 132–146.
15. Pan C. *et al.* Numerical Modeling of Partial Discharges in a Solid Dielectric-Bounded Cavity: A Review // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2019. Vol. 26. Iss. 3. P. 981–1000.
16. Голенищев-Кутузов А.В. и др. Контроль текущего рабочего состояния и прогнозирование остаточного ресурса высоковольтных изоляторов // Известия Российской академии наук. Сер. физическая. 2023. № 12. С. 1823–1827.
17. Кинит Н.В., Петрунько Н.Н. Дискретная диагностическая модель множества дефектов изоляции высоковольтного оборудования // Автометрия. 2021. № 2. С. 93–100.
18. Dewanto F.A. *et al.* An Approach to Assess the 500 kV Insulator String Condition Using Ultraviolet Imager // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. № 23. Article № 12054.
19. Frącz P. *et al.* Results of Optical Signals Analyses Emitted by Electrical Discharges Recorded with UV Camera // Acta Physica Polonica A. 2012. Vol. 122. № 5-6. P. 814–817.

Поступила в редколлегию 9.06.26

ANALYSIS OF THE SHAPE AND DYNAMICS OF ULTRAVIOLET RADIATION FROM PARTIAL DISCHARGES IN A LOCAL DEFECT OF A HIGH-VOLTAGE INSULATOR

M.A. Shakirzyanov and A.V. Golenishchev-Kutuzov

In this work, we experimentally study the spot shape coefficient and the pulsation coefficient of UV radiation on a PS70E insulator with an artificial defect for two air gap values. We find that the shape coefficient decreases with increasing voltage, while the pulsation coefficient in saturation mode does not exceed 0.2 %. The spot shape also varies over time. The proposed parameters provide quantitative classification of insulation defects.

Keywords: partial discharges, ultraviolet diagnostics, shape coefficient, pulsation, discharge stability, CoroCAM 7, PS70E.

Шакирзянов Марат Альбертович – аспирант (КГЭУ, Казань)

E-mail: maratlol2@mail.ru

Голенищев-Кутузов Александр Вадимович – д-р физ.-мат. наук (КГЭУ, Казань)

E-mail: alex.kutuzov@mail.ru

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫХ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК КАЗАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМ. А.Н. ТУПОЛЕВА»

В журнале «Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева» публикуются результаты фундаментальных и прикладных исследований ученых КНИТУ-КАИ, других вузов и научных организаций. Кроме того, в журнале публикуются статьи информационного и дискуссионного характера.

Представленная в журнал работа должна быть законченным научным исследованием и содержать новые научные результаты.

Отправляя рукопись в журнал, автор гарантирует, что соответствующий материал (в оригинале или в переводе на другие языки или с других языков) ранее нигде не публиковался и не находится на рассмотрении для публикации в других издательствах.

Статья не должна превышать по объему 8 – 9 страниц с учетом рисунков и таблиц. Обзоры направляются в редакционную коллегию по предварительному согласованию.

В статьях должна быть использована международная система единиц измерения СИ.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в тексте, таблицах, графиках; сокращения допускаются только общепринятые.

Цитируемая литература нумеруется в порядке упоминания, в тексте порядковый номер ссылки заключается в квадратные скобки.

Нумерация и включение в список литературы всех упомянутых в статье источников обязательны. Ссылки на статьи, находящиеся в печати, не допускаются.

Статья, нуждающаяся в доработке, направляется авторам с замечаниями. Доработанная статья рецензируется повторно.

Материалы, представляемые к публикации, направляются в редакционную коллегию журнала по адресу 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д.10, КНИТУ-КАИ, ответственному секретарю журнала.

Материалы должны содержать:

- два экземпляра статьи на бумаге формата А4, подписанные всеми авторами, и ее компьютерный вариант;
- лист с расшифровкой индексов, образованных от русских слов;
- сопроводительное письмо на имя главного редактора;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати;
- выписку из протокола заседания кафедры (отдела) или НТС организации с рекомендацией к опубликованию и указанием раздела журнала;
- сведения об авторах: фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, должность, полное название учреждения с указанием факультета и кафедры (отдела, сектора и т.п.); e-mail; телефон для связи;
- название статьи на английском языке;
- аннотацию и ключевые слова на русском и английском языках.

Обязательные структурные элементы статьи и их оформление

1. УДК: размер шрифта – 10 пт, светлый курсив, выравнивание по левому краю, интервал перед абзацем и после абзаца 0 пт.

2. Название статьи: размер шрифта – 14 пт, жирный прямой прописной, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 12 пт, после – 0 пт, межстрочный интервал одинарный.

3. Инициалы и фамилии авторов: размер шрифта – 12 пт, жирный прямой, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 8 пт, после – 12 пт;

4. Аннотация на русском языке: размер шрифта – 10 пт, светлый прямой, выравнивание по ширине, перед абзацем – 0 пт, после – 4 пт, отступ слева – 2 см, отступ справа – 2 см, межстрочный интервал – множитель 1,1.

5. Ключевые слова на русском языке: размер шрифта – 10 пт, жирный прямой, выравнивание по ширине, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 6 пт, межстрочный интервал – множитель 1,1.

6. Текст статьи основной: размер шрифта – 11 пт, светлый прямой, выравнивание по ширине, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 0 пт, межстрочный интервал – множитель 1,1, первая строка – отступ 0,6 см; подзаголовок: размер шрифта – 12 пт, жирный прямой, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 6 пт, после – 3 пт, межстрочный интервал – множитель 1,1.

7. Список литературы заголовков: размер шрифта – 11 пт, светлый прямой прописной, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 9 пт, после – 6 пт; текст списка: размер шрифта – 10 пт, светлый прямой, выравнивание по ширине, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 0 пт, отступ слева – 1 см, отступ справа – 1 см, первая строка – выступ 0,35 см, межстрочный интервал одинарный, фамилии авторов выполняются курсивом.

8. Дата отправки статьи в редакцию: размер шрифта – 10 пт, светлый прямой, выравнивание по правому краю, интервал перед абзацем – 6 пт, после – 0 пт.

9. Название статьи на английском языке: размер шрифта – 14 пт, жирный прямой прописной, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 12 пт, после – 0 пт, межстрочный интервал одинарный.

10. Инициалы и фамилии авторов по-английски: размер шрифта – 12 пт, жирный прямой, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 8 пт, после – 12 пт.

11. Аннотация на английском языке: размер шрифта – 10 пт, светлый прямой, выравнивание по ширине, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 4 пт, отступ слева – 2 см, отступ справа – 2 см, межстрочный интервал – множитель 1,1.

12. Ключевые слова на английском языке: размер шрифта – 10 пт, жирный прямой, выравнивание по ширине, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 6 пт, межстрочный интервал – множитель 1,1.

13. Сведения об авторах (Ф.И.О., звание, должность, структурное подразделение, организация, e-mail): размер шрифта – 11 пт, светлый прямой, выравнивание по левому краю, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 5 пт.

Требования к оформлению статей

Компьютерный вариант статьи оформляется в виде единого файла, включающего полный текст статьи, формулы, таблицы, рисунки, список литературы и сведения об авторах. Файл именуется по фамилии первого автора. Файл должен быть представлен в редакторе Microsoft Word.

Параметры страницы:

- размер бумаги – А4;
- поля – зеркальные;
- верхнее поле – 1,8 см;
- нижнее поле – 2,9 см;
- внутреннее поле – 1,4;
- наружное поле – по 2,0 см;
- расстояние до верхнего колонтитула – 0 см;
- расстояние до нижнего колонтитула – 2,2 см.

Шрифт текста статьи – Times New Roman.

Таблицы и иллюстрации. На все помещаемые в статью таблицы и иллюстрации (чертежи, графики, схемы, компьютерные распечатки, диаграммы, фотоснимки, рисунки) в тексте должны присутствовать ссылки. Каждая иллюстрация и таблица должна иметь содержательное наименование и номер. Следует использовать сквозную нумерацию (арабскими цифрами) в пределах статьи отдельно для иллюстраций и таблиц. Таблицы и иллюстрации располагаются непосредственно после абзаца, в котором содержится ссылка на них.

Таблицы представляются по следующей форме.

Слово «Таблица»: размер шрифта – 9 пт, светлый, курсив, выравнивается по правому краю таблицы.

Название таблицы: размер шрифта – 9 пт, полужирный, располагать по центру. Содержимое ячеек следует располагать по центру.

Содержательная часть таблицы: размер шрифта – 9 пт, светлый, прямой.

Толщина линий в таблицах – 0,5 пт.

Пропуски в столбцах при отсутствии данных заполняют тире.

Размерности числовых данных в таблицах выносят в текст головки или название таблицы.

Иллюстрации должны быть тщательно подготовлены для печати в электронном виде (сканированы или выполнены в графическом редакторе) и вставлены в текст. Сканирование должно быть выполнено с разрешением не менее 300 dpi с расширением .tif или .jpg. Допускается представление иллюстраций в формате .cdr. Иллюстрации, выполненные при помощи средств рисования MS Office, не принимаются.

Графики должны иметь полную систему указателей в подрисуночных подписях или в тексте статьи. Внутрисуночные обозначения: размер символов – 9 пт, латинские символы – шрифт Times New Roman светлый курсив, символы кириллицы – шрифт Times New Roman светлый прямой, греческие символы – шрифт Symbol светлый прямой.

Оси координат и кривые должны быть изображены линиями одинаковой толщины 0,25 мм. Координатная сетка – линиями толщиной 0,18 мм. Подрисуночная подпись: размер шрифта – 9 пт, пояснение к подрисуночным подписям: размер шрифта – 8 пт.

Формулы набирать в редакторе формул MathType.

Латинские символы: шрифт Times New Roman светлый курсив.

Символы кириллицы – шрифт Times New Roman светлый прямой.

Греческие символы – шрифт Symbol светлый прямой.

Размер символов в формулах:

- обычный – 11 пт;
- индекс – 65 % от обычного;
- символ – 150 % от обычного.

Формулы, на которые имеются ссылки в тексте, нумеруются и располагаются по центру строки, номер формулы должен совпадать с правым краем границы текста. После каждой формулы в соответствии с контекстом должен стоять знак пунктуации (запятая, точка и т.п.). Используется сквозная нумерация формул.

Статьи, не удовлетворяющие указанным правилам оформления, будут возвращены авторам без рассмотрения.

За справками обращаться к ответственному секретарю журнала.

Тел.: 231-97-84

E-mail: at-secretary@yandex.ru

**ВЕСТНИК
КАЗАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА им. А.Н. ТУПОЛЕВА**

2026, № 2 (124)

Ответственный за выпуск *Е.М. Зиннатуллина*
Компьютерная верстка – *А.А. Золина*

Подписано в печать 20.06.26. Выход в свет 25.06.26
Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 16.
Тираж 200. Заказ А69. Цена 200 руб.

Адрес издателя, редакции, типографии: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, КНИТУ-КАИ,
редакция журнала «Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева».
Тел. (843) 238-58-10; факс (843) 236-60-32; www.kai.ru/vestnik/ E-mail: vestnik.kstu-kai@yandex.ru
Address: KNRTU-KAI, 10 Karl Marx Str., Kazan, 420111, Russia

Подписной индекс – 18040

Издательство КНИТУ-КАИ