

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Захарова А.Д., Тимеркаев Б.А., Байрамгулов А.А., Андреева Н.Г., Минибаева А.Р., Шакиров Б.Р.</i> Электродуговой синтез углеродных наноструктур в газообразных углеводородах.....	3
<i>Мршид М., Митюшкин А.Д., Ермаков А.М., Салахов Р.Р.</i> Тепловое управление и системы охлаждения водородных топливных элементов	9
<i>Мякочин А.С., Глевцежес В.В.</i> Теоретические исследования возможности моделирования процесса заправки бака криогенным топливом.....	17
<i>Садыков А.В.</i> Влияние конструкционных параметров на тепловые и аэродинамические характеристики трубчатой печи.....	31

МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Галимов Э.Р., Шарафутдинова Э.Э., Галимова Н.Я., Кузьмина И.А.</i> Комплексная оценка структуры и эксплуатационных свойств углеродных пен, полученных различными способами	37
<i>Рахматуллина Р.Г., Маскова А.Р., Гарайшин А.И.</i> Изучение магнитных характеристик стали	41
<i>Субаева А.К., Замальдинов М.М., Глуценко А.А., Салахутдинов И.Р., Айнуллин И.И.</i> Исследование содержания продуктов износа и металлов присадок в моторных маслах.....	45
<i>Шафигуллин Л.Н., Габдрахманов А.Т., Башмаков Д.А., Галиакбаров А.Т., Романова Н.В.</i> Изготовление целевых изделий автомобилестроения SLA-печатью.....	49

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

<i>Азов М.С., Колпаков П.Н., Маркелов В.К., Чикрин Д.Е., Ямщиков Д.В.</i> Методика построения цифрового двойника промышленного робота-манипулятора на основе OPL и программируемого логического контроллера	54
<i>Арутюнов С.Д., Байдаров А.А., Кокоулин А.Н., Кокоулин Р.А., Сторожес С.А., Южаков А.А., Мустафаев М.Ш., Онискиев В.Д.</i> Реализация аватара робота-андроида стоматологического симулятора с использованием образовательной технологии 4.0	62
<i>Данилаев Д.П., Денисов А.Е., Хайруллин Н.Г.</i> Оценка параметров радиофотонного приемного тракта с большим динамическим диапазоном	71
<i>Ефремова Е.С., Солдаткин В.В., Солдаткин В.М., Зайцева Р.Р.</i> Модели движения флюгерного чувствительного элемента при работе датчика аэродинамических углов	81
<i>Козлов В.К., Минегалиев И.М., Валиуллина Д.М., Сабитов А.Х.</i> Способ измерения влагосодержания трансформаторного масла на основе регистрации температуры фазового перехода	92
<i>Соколов А., Веженкова И.В., Семенова М.И.</i> Разработка аппаратно-программного метода биотестирования водных проб на основе анализа вертикального распределения и двигательной активности инфузорий <i>Paramecium caudatum</i>	97
<i>Шиндор О.В., Чикрин Д.Е., Азов М.С., Кокунин П.А., Пашин Д.М.</i> Анализ вибрационных сигналов на основе обобщенного вейвлета Морзе	106

CONTENTS

PHYSICAL SCIENCE

<i>Zakharova A.D., Timerkaev B.A., Bairamgulov A.A., Andreeva N.G., Minibaeva A.R., and Shakirov B.R.</i> Electric arc synthesis of carbon nanostructures in gaseous hydrocarbons	3
<i>Mrshd M., Mityushkin A.D., Ermakov A.M., and Salakhov R.R.</i> Thermal management and cooling of proton exchange membrane fuel cells	9
<i>Myakochin A.S. and Tlevtsezhev V.V.</i> Theoretical studies of the possibility of modeling the process of filling a tank with cryogenic fuel	17
<i>Sadykov A.V.</i> Influence of structural parameters on thermal and aerodynamic characteristics of tube furnace	31

MECHANICAL ENGINEERING

<i>Galimov E.R., Sharafutdinova E.E., Galimova N.Ya., and Kuzmina I.A.</i> Comprehensive assessment of the structure and performance properties of carbon foam obtained by various methods	37
<i>Rakhmatullina R.G., Maskova A.R., and Garaishin A.I.</i> Study of the magnetic properties of steel	41
<i>Subaeva A.K., Zamaldinov M.M., Glushchenko A.A., Salakhutdinov I.R., and Ainullin I.I.</i> Research of the content of wear products and additive metals in motor oils	45
<i>Shafigullin L.N., Gabdrakhmanov A.T., Bashmakov D.A., Galiakbarov A.T., and Romanova N.V.</i> Manufacturing of target automotive products using SLA printing	49

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT MAKING AND COMMUNICATIONS

<i>Azov M.S., Kolpakov P.N., Markelov V.K., Chikrin D.E., and Yamshchikov D.V.</i> Methodology for building a digital twin of an industrial robot manipulator using offline programming and programmable logic controller	54
<i>Arutyunov S.D., Baidarov A.A., Kokoulin A.N., Kokoulin R.A., Storozhev S.A., Yuzhakov A.A., Mustafaev M.Sh., and Oniskiv V.D.</i> Implementation of an android robot avatar for a dental simulator using educational technology 4.0	62
<i>Danilaev D.P., Denisov A.E., and Khairullin N.G.</i> The parameters evaluation of a high-dynamic-range radio-photonic receiving path	71
<i>Efremova E.S., Soldatkin V.V., Soldatkin V.M., and Zaitseva R.R.</i> Models of movement of a weather vane sensing element during operation of an aerodynamic angle sensor	81
<i>Kozlov V.K., Minegaliev I.M., Valiullina D.M., and Sabitov A.Kh.</i> Method for measuring the moisture content of transformer oil based on the recording of the phase transition temperature	92
<i>Sokolov A., Vezhenkova I.V., and Semenova M.I.</i> Development of a hardware and software method for biotesting water samples based on the analysis of vertical distribution and motor activity of Paramecium caudatum ciliates	97
<i>Shindor O.V., Chickrin D.E., Azov M.S., Kokunin P.A., and Pashin D.M.</i> Analysis of vibration signals based on the generalized Morse wavelet	106

ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СИНТЕЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР В ГАЗООБРАЗНЫХ УГЛЕВОДОРОДАХ

А.Д. Захарова, Б.А. Тимеркаев, А.А. Байрамгулов, Н.Г. Андреева,
А.Р. Минибаева, Б.Р. Шакиров

Проведено исследование возможностей синтеза углеродных наноструктур в электрическом разряде в пропан-бутановой смеси. Изучены зависимости образования углеродных нанотрубок и наноалмазов от величины тока и времени разряда, давления плазмообразующего газа, наличия катализатора. Установлено, что морфология продуктов синтеза определяется силой тока, источником паров углерода, наличием катализатора и продолжительностью процесса синтеза.

Ключевые слова: дуговой разряд, электродуговой синтез, газообразные углеводороды, углеродные нанотрубки, наноалмазы.

Введение

В последнее время наблюдается устойчивый исследовательский интерес к различным углеродным наноструктурам – фуллеренам, углеродным нанотрубкам, графену, наноалмазам. Уникальное сочетание физико-химических характеристик данных структур, включая предельно высокие механическую прочность и износостойкость, стабильную флуоресценцию, а также выраженную биосовместимость, обуславливает их широкое применение в разнообразных областях. Перспективы дальнейшего использования этих материалов представляются чрезвычайно масштабными [1, 2]. В связи с этим ключевое внимание в научном сообществе сфокусировано на разработке методов синтеза указанных наноструктур. Критериями эффективности таких методов выступают простота и экономическая целесообразность технологического процесса, его масштабируемость, а также повторяемость результатов. Метод синтеза в значительной степени определяет размеры, морфологию, структурное совершенство наночастиц. Наиболее известные технологии синтеза углеродных наноструктур связаны с созданием паров углерода с последующим осаждением на подложку.

В настоящей работе для получения углеродных наноструктур был использован плазмохимический метод, основанный на электродуговом разряде в углеводородной среде. По сравнению с традиционными подходами, в частности с методами высоких давлений и температур, данный способ имеет ряд принципиальных преимуществ. Процесс синтеза может быть реализован при давлениях, близких к атмосферному, не требует применения инертных газов и использования затравочных кристаллов, а также отличается большей технологической гибкостью.

Результаты ранее опубликованных исследований [3–9] показывают, что при плазмохимическом разложении углеводородов энергетические затраты на образование свободного углерода оказываются существенно ниже по сравнению с процессами, основанными на испарении или сублимации графита. Кроме того, установлено, что элементы IV группы периодической системы способны эффективно влиять на формирование алмазной фазы, выполняя функцию катализаторов зарождения и роста алмазных структур [10]. В этом контексте использование кремния представляется особенно перспективным, поскольку его присутствие в зоне плазменного разряда способствует получению углеродных наноматериалов с более контролируемой морфологией, улучшенными структурными характеристиками и заданными свойствами [11]. При осаждении паров углерода и кремния на подложку преимущественно образовывается карбид кремния. Однако в случае достаточного количества атомов углерода при соответствующих условиях атомы углерода начинают замещать атомы кремния, превращая карбид в алмаз. Такое явление особенно важно, так как оставшиеся в структуре алмаза атомы кремния становятся центрами окраски.

При размерах порядка нескольких нанометров подобные наноалмазы могут использоваться в качестве элементов квантовой памяти.

Методика эксперимента

Реакционная камера представляла собой водоохлаждаемую вакуумную камеру с подвижными, расположенными вдоль вертикальной линии электродами. Катодом в данной работе выступал стержень из молибдена диаметром 10 мм. Такой материал катода с достаточно высокой теплопроводностью способен обеспечить длительное поддержание необходимых условий синтеза углеродных наноструктур. В качестве анода был выбран графитовый стержень диаметром 18 мм, который одновременно выполнял роль тигля. Перед тем как запустить установку, в тигель засыпали мелкодисперсный порошок, состоящий из равных долей графита и кремния. Кремний в данном эксперименте использовался в качестве катализатора. Данный выбор обусловлен его фундаментальным свойством выступать в роли структурообразующего элемента, так как его валентные электроны обращены в сторону вершин тетраэдра.

Базовым плазмообразующим газом в данном эксперименте является пропан-бутановая смесь. Газообразные углеводороды выполняют две функции: способствуют росту наноструктур и помогают формировать более чистые углеродные структуры с минимальным содержанием примесей. В электрическом разряде в углеводородных газах образуется много водорода, в том числе атомарного. Атомарный водород с поверхности новообразований эффективно уносит невстроенные атомы кремния и углерода. В связи с этим поверхности как наноалмазов, так и карбидов, образованных в электрическом разряде в углеводородных газах, либо исключительно гладкие, либо на этих поверхностях формируются новые алмазоподобные структуры.

Основной задачей данной работы является определение соответствующих давлений газа, приемлемых значений силы тока, межэлектродных расстояний, времени синтеза, при которых происходит синтез наноструктур. Были исследованы различные значения силы тока дугового разряда и межэлектродного расстояния. Наиболее рациональными оказались значения сила тока около 100–150 А и давления плазмообразующего газа в камере приблизительно 46 кПа. Вместе с тем указанные параметры еще не являются оптимальными.

Электродуговой разряд имеет существенные преимущества по сравнению с другими способами испарения вещества, так как высокие температуры в дуговом разряде достигаются достаточно просто. Кроме того, для синтеза алмазов не требуется создание высоких давлений: процесс синтеза наноструктур осуществляется при атмосферном давлении, нет необходимости введения инертного газа и затравочных кристаллов.

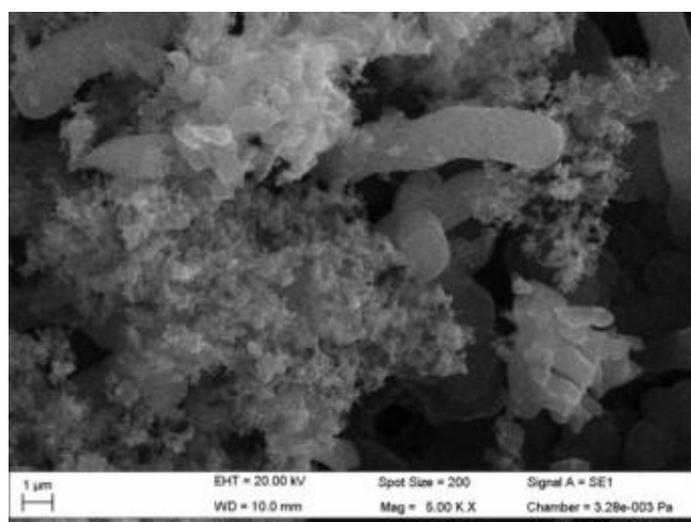
В условиях низкотемпературной плазмы (несколько тысяч градусов) молекулы углеводородных газов подвергаются диссоциации под воздействием электронных ударов и интенсивных столкновений. Этот процесс приводит к расщеплению исходных соединений с образованием атомарного углерода, димера углерода, водорода и реакционноспособных углеводородных радикалов. Свободные углеродные атомы, освобожденные из углеводородных молекул, а также испарившиеся с поверхности анода вместе с атомами кремния, в разрядной области заряжаются и устремляются к катоду. На поверхности анода происходит зародышеобразование и рост как карбидов кремния, так и наноалмазов. На разных участках поверхности анода реализовываются условия для роста различных наноструктур. Эти условия главным образом определяются температурой поверхности катода, наличием катализатора и структурных элементов.

В результате проведенных экспериментов, которые продолжались от нескольких десятков секунд до нескольких минут, на поверхности электродов сформировались наросты, причем на обоих электродах. Данные образования впоследствии были подвергнуты детальному исследованию с использованием оптической и сканирующей электронной микроскопии.

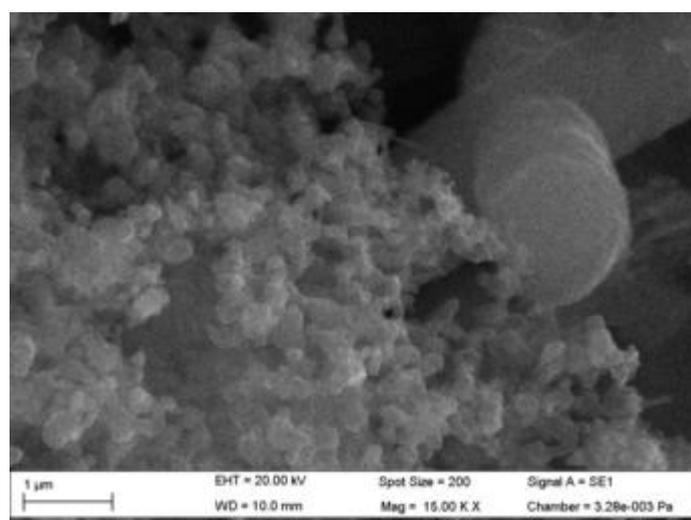
Как следует из проведенных опытов, на морфологию синтезированных образований значительное влияние оказывает материал электрода, давление газа, ток разряда, межэлектродное расстояние и дли-

тельность процесса синтеза. Во время экспериментов проводился визуальный контроль за процессом роста углеродных наноструктур. Особенно были заметны области, где реализовываются необходимые условия для их синтеза. Кроме поддержания соответствующей температуры важную роль играет наличие зародышей тех ли иных наноструктур, наличие паров углерода, атомов инертных газов и напряженности электрического поля. Преимущественное формирование наноструктур наблюдалось на поверхности молибденового катода, на его боковых гранях. Также наблюдались быстро увеличивающиеся наросты с боковой грани графитового анода. За 30 с горения дуги высота этих наростов достигла 10 мм. В дальнейшем отложения, сформированные на поверхности молибденового катода, и наросты с боковой грани графитового анода были изучены на оптическом и электронном микроскопах. Предположительно нанобразования на поверхности анода возникли преимущественно из атомов углерода графитового анода под действием электрического поля при более высоких температурах. Также здесь могли принимать участие атомы и ионы углерода, появившиеся в разрядной зоне за счет бомбардировки углеводородных молекул электронами разряда. При исследовании данных образований с использованием оптического микроскопа было установлено, что на их поверхности присутствуют частицы с зеркальным блеском. Способность этих образцов царапать стекло свидетельствует о наличии в их составе нанодiamondов.

На рис. 1 представлены электронно-микроскопические снимки образцов с катода электрической дуги после эксперимента.



a



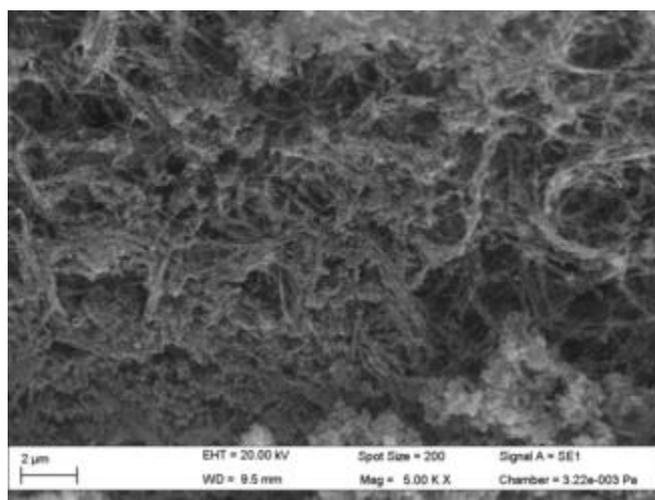
б

Рис. 1

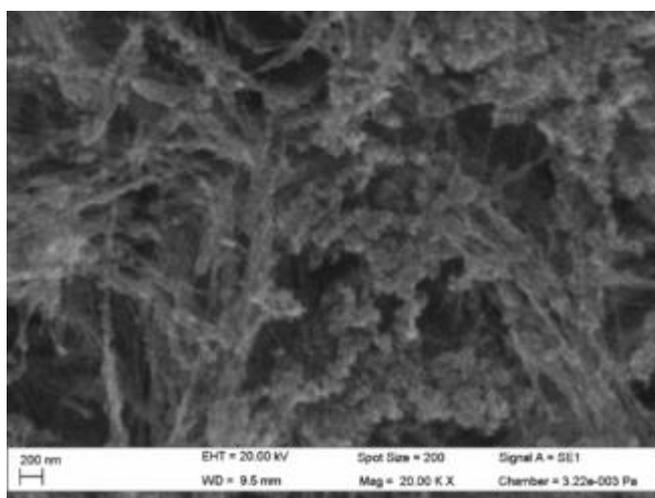
При увеличении $\times 5000$ обнаружено три вида наноалмазов, которые отличаются не только своими размерами, но и морфологией (рис. 1, *a*). Самые светлые наноалмазы в верхней части рис. 1, *a* и нижней части справа с размерами порядка 150–200 нм имеют острые грани. Предположительно, возникновение микроповреждений на поверхности стекла может быть обусловлено воздействием данных алмазов. На левой нижней части рис. 1, *a* наблюдается скопление наноалмазов меньшего размера.

На рис. 1, *б* приведен центральный фрагмент изображения, показанного на рис. 1, *a*, увеличенный в три раза. Размеры полученных наноалмазов порядка 150–200 нм и также имеют острые грани. На правой части рисунка показан достаточно крупный микроалмаз размером в поперечном сечении порядка 1,5 мкм. Структура данного микроалмаза характеризуется последовательным наложением алмазных дисков друг на друга.

На рис. 2 представлены электронно-микроскопические снимки образцов с периферийной части анода при увеличениях 5000 раз (рис. 2, *a*) и 20000 раз (рис. 2, *б*).



a



б

Рис. 2

Наноструктуры, приведенные на рис. 2, преимущественно представлены углеродными нанотрубками и наноалмазами. Составными элементами этих образцов являются атомы углерода, образованные в результате теплового разложения углеводородных молекул. Попадание углерода в эту область обеспечивается циркуляцией нагретых углеводородов, обусловленной архимедовой силой. Углеводороды, нагретые вблизи электродов и плазмы электрической дуги, подвергаются термическому крекингу и поднимаются вверх, тогда как на их место поступают менее нагретые углеводороды. По мере протекания

процесса значительная часть углеводородов разлагается, а высвобождающиеся атомы углерода участвуют в формировании углеродных нанотрубок. При этом поверхности нанотрубок не являются гладкими, несмотря на присутствие значительного количества атомарного и молекулярного водорода. На поверхности нанотрубок инициируется зарождение и рост наноалмазов. Согласно данным рис. 2, б размеры синтезированных наноалмазов находятся в диапазоне 20...50 нм.

Выводы

В работе осуществлен синтез углеродных наноструктур на электродах электрической дуги в среде пропан-бутановой смеси при давлении примерно 46 кПа. В качестве катализатора образования и роста наноструктур выступали атомы кремния. Осуществлен синтез наноалмазов на катоде размерами 150–200 нм и 1–1,5 мкм. На поверхности анода сформировались нанотрубки и наноалмазы с характерными размерами порядка 20–50 нм. Установлено, что морфология продуктов синтеза определяется силой тока, источником паров углерода, наличием катализатора и продолжительностью процесса синтеза. В частности, добавка кремния ускоряет образование наноалмазов, улучшая их структурное совершенство, и способствует контролю размеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долматов В.Ю. Детонационные наноалмазы: синтез, строение, свойства и применение // Успехи химии. 2007. № 4. С. 375–397.
2. Zhao N., Liu Y., Chen Z. Nanodiamond-Based Coatings for Energy and Engineering Applications // Small. 2024. Vol. 20. № 36. Article № 2401292.
3. Тимеркаев Б.А. и др. Плазмохимический синтез наноалмазов на поверхности катода микродугового разряда // Журнал инженерной физики и термофизики. 2022. № 5. С. 1201–1206.
4. Palyanov Y.N. et al. Germanium: A New Catalyst for Diamond Synthesis and a New Optically Active Impurity in Diamond // Scientific Report. 2015. Vol. 5. № 1. Article № 14789.
5. Timerkaev B. A. et al. Nanodiamonds from Fuel // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2270. №. 1. Article № 012008.
6. Gong Y. et al. Growth of Diamond in Liquid Metal at 1 Atm Pressure // Nature. 2024. № 629. P. 348–354.
7. Zhi T. et al. High Quality CVD Single Crystal Diamonds Grown on Nanorods Patterned Diamond Seed // Diamond and Related Materials. 2021. Vol. 119. Article № 108605.
8. Chen H.L. et al. Review of Plasma Catalysis on Hydrocarbon Reforming for Hydrogen Production–Interaction, Integration, and Prospects // Applied Catalysis B: Environmental. 2008. Vol. 85. №. 1-2. С. 1–9.
9. Siby A. et al. Nucleation of Nanodiamonds in H-Atom Rich Microplasma // Diamond and Related Materials. 2025. Vol. 152. Article № 111933.
10. Timerkaev B.A., Khusnutdinova A.A., Shakirov B.R. Synthesis of Hexagonal Nanodiamonds Catalyzed by Germanium Atoms in a Germanium–Argon Electric Arc Plasma // Technical Physics Letters. 2025. Vol. 51. № 3. P. 130–134.
11. Lakhonchai A., Kanjanaboos P., Charee W. Improvement of Corrosion Resistance and Mechanical Properties of Chrome Plating by Diamond-Like Carbon Coating with Different Silicon-Based Interlayers // Materials Research Express. 2022. Vol. 9. № 5. Article № 055604.

Поступила в редколлегию 19.12.25

ELECTRIC ARC SYNTHESIS OF CARBON NANOSTRUCTURES IN GASEOUS HYDROCARBONS

**A.D. Zakharova, B.A. Timerkaev, A.A. Bairamgulov, N.G. Andreeva,
A.R. Minibaeva, and B.R. Shakirov**

This paper explores the possibilities of synthesizing carbon nanostructures in an electric discharge in a propane-butane mixture. The formation of carbon nanotubes and nanodiamonds is studied as a function of discharge current and time, plasma gas pressure, and the presence of a catalyst. It was found that the morphology of the synthesis products is determined by

the current strength, the carbon vapor source, the presence of a catalyst, and the duration of the synthesis process.

Keywords: arc discharge, electric arc synthesis, gaseous hydrocarbons, carbon nanotubes, nanodiamonds.

Захарова Алена Дмитриевна – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: alenazah01@mail.ru

Тимеркаев Борис Ахунович – д-р физ.-мат. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: btimerkaev@gmail.com

Байрамгулов Артур Азатович – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: pezzoef@mail.ru

Андреева Наталья Геннадьевна – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: nataliandreeva88@mail.ru

Минибаева Альфия Рашитовна – канд. архитект. наук (КГАСУ, Казань)
E-mail: minibaeva-alfiya@mail.ru

Шакиров Булат Рузалевич – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: bulatshoker2000@gmail.com

ТЕПЛОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

М. Мршд, А.Д. Митюшкин, А.М. Ермаков, Р.Р. Салахов

Проведено численное исследование теплового состояния одиночного топливного элемента с протонообменной мембраной при использовании различных охлаждающих жидкостей. Рассмотрены особенности теплового распределения в активной зоне и влияние свойств теплоносителей на эффективность отвода тепла. Численное моделирование выполнено в программной среде ANSYS Fluent на трехмерной геометрии с учетом реальных конструктивных параметров биполярных пластин и каналов охлаждения. Исследованы деионизированная вода и смеси пропиленгликоля различной концентрации. Показано, что увеличение доли пропиленгликоля приводит к снижению максимальной температуры мембраны и повышению равномерности теплового поля. Установлено, что увеличение концентрации пропиленгликоля способствует снижению максимальной температуры мембраны и выравниванию температурного поля в активной зоне.

Ключевые слова: топливный элемент, протонообменная мембрана, тепловое управление, охлаждение, пропиленгликоль, численное моделирование.

Топливные элементы с протонообменной мембраной являются перспективным источником экологически чистой энергии благодаря высокой эффективности и минимальным выбросам [1–3]. Одной из ключевых проблем их эксплуатации является формирование неравномерного температурного поля в активной зоне, что приводит к деградации мембраны и снижению производительности [4].

Эффективное тепловое управление позволяет поддерживать оптимальную влажность и проводимость мембраны, предотвращать локальные перегревы и обеспечивать стабильность работы топливных элементов с протонообменной мембраной [5–7]. В последнее время значительное внимание уделяется исследованию процессов теплообмена в охлаждающих каналах, геометрии теплообменных структур и влиянию физических свойств теплоносителей [8–10].

Целью настоящей работы является анализ современных подходов к охлаждению топливных элементов с протонообменной мембраной и проведение численного исследования теплового состояния активной зоны с использованием различных жидкостных теплоносителей.

Тепловые процессы в топливных элементах с протонообменной мембраной формируются вследствие электрохимических реакций, омических потерь и массообмена [2–4]. Важнейшим фактором стабильной работы является поддержание равномерной температуры и оптимального влагосодержания мембраны: ее пересушивание повышает омическое сопротивление, а избыточное увлажнение ухудшает удаление продуктов реакции [4, 5].

В системах охлаждения топливных элементов с протонообменной мембраной применяются два основных подхода – воздушный и жидкостный. Воздушное охлаждение используется при малых плотностях тока и ограничено низкой теплопроводностью. [6] Жидкостные системы обеспечивают более высокий коэффициент теплоотдачи и применяются в большинстве промышленных и транспортных топливных элементах с протонообменной мембраной [1–7]. Эффективность охлаждения определяется физическими свойствами теплоносителя (вязкостью, плотностью, теплоемкостью), а также конструкцией и геометрией каналов [8–10].

Конструкция биполярных пластин и форма каналов охлаждения существенно влияют на распределение температуры и гидравлические потери [11–13]. Исследования показывают, что микроканальные структуры обеспечивают повышенную интенсивность конвекции и более равномерное температурное поле [13–16]. Использование высокотеплопроводных материалов (графит, алюминий, композиты) дополнительно способствует выравниванию температуры в активной зоне [13–14].

Таким образом, оптимизация теплового режима топливных элементов с протонообменной мембраной заключается в выборе подходящего теплоносителя и рациональной геометрии каналов, обеспечивающих эффективный отвод тепла без избыточных гидравлических потерь.

Для анализа теплового режима однокамерного топливного элемента с протонообменной мембраной была разработана трехмерная модель в ANSYS Fluent. Модель включает анод, катод, мембрану и две биполярные пластины с системой газовых и охлаждающих каналов (рис. 1). Газовые каналы ориентированы параллельно поверхности мембраны, а охлаждающие – перпендикулярно им, что обеспечивает перекрестный теплоотвод и повышает равномерность температурного поля в активной зоне.

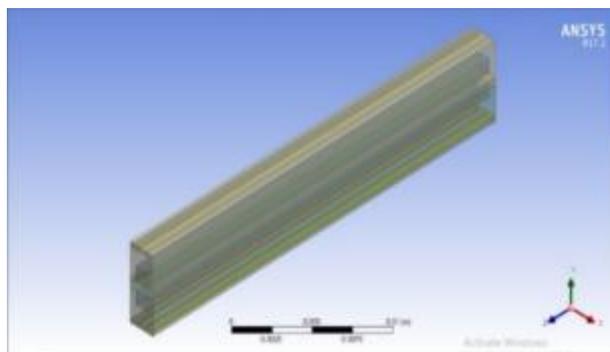


Рис. 1

Геометрические параметры соответствуют типовым конструкциям компактных топливных элементов с протонообменной мембраной. Толщина мембраны составляет 0,05 мм, газодиффузионных слоев – 0,26 мм, биполярных пластин – 0,5 мм; размеры газовых каналов – 1×1 мм, охлаждающих – 0,25×0,20 мм. Анод и катод заданы как пористые среды с эквивалентными термофизическими свойствами, обеспечивающими распределение реагентов и удаление воды.

Для снижения вычислительных затрат использована симметричная расчетная область, включающая один характерный элемент конструкции. Такой подход уменьшает размер расчетной сетки без потери корректности моделирования теплопередачи и распределения потоков.

Схема разработанной модели с указанием основных элементов и направлений движения потоков представлена на рис. 1.

В рамках данного исследования разработана численная модель охлаждаемого топливного элемента с протонообменной мембраной, в которой на каждой стороне биполярных пластин (со стороны анода и катода) предусмотрено по три поперечно расположенных канала охлаждения на равных расстояниях. Такой подход обеспечивает равномерное распределение теплового потока и эффективное удаление избыточного тепла из активной зоны.

Все остальные физико-химические параметры топливного элемента в ходе моделирования сохранялись постоянными.

Приведем геометрические параметры модели: токосъемник – 2×2,5×30 мм; газодиффузионный слой – 2×0,12×30 мм; каталитический слой 2×0,10×30 мм; мембрана – 2×0,20×30 мм; газовые каналы – 1×1 мм; каналы охлаждения – 0,25×0,20 мм.

Физико-химические свойства используемой модели топливного элемента с протонообменной мембраной: рабочая температура – 353,15 К; давление на входе воздуха и топлива – $3 \cdot 10^5$ Па; рабочее напряжение – 0,65 В; пористость газодиффузионного слоя – 0,6; абсолютная проницаемость газодиффузионного слоя – $3 \cdot 10^{-12}$ м²; пористость каталитического слоя – 0,2; абсолютная проницаемость каталитического слоя – $2 \cdot 10^{-13}$ м²; абсолютная проницаемость мембраны – $1 \cdot 10^{-21}$ м²; начальная температура теплоносителя – 26,85 °С; плотность теплоносителя – 998,2 кг/м³.

Геометрические размеры элементов (коллекторы, слои диффузии газа, каталитические слои, мембрана, каналы охлаждения) соответствуют данным литературных источников и адаптированы под условия текущего расчета.

В исследовании в качестве теплоносителя использовались деионизированная вода и ее смеси с пропиленгликолем в различных концентрациях: деионизированная вода (100 %), пропиленгликоль (10, 20, 30 %). Деионизированная вода характеризуется высокой теплоемкостью и теплопроводностью, что

делает ее эффективным охлаждающим агентом. Однако со временем ее электрическое сопротивление снижается из-за накопления ионов металлов, а при температуре ниже 0 °С вода замерзает.

Для повышения морозостойкости в состав добавлялся пропиленгликоль с более высокой вязкостью и температурой кипения, но несколько меньшей теплопроводностью.

Основные физико-химические свойства деионизированной воды и пропиленгликоля представлены в табл. 1, параметры их смесей – в табл. 2.

Таблица 1

Параметр	Деионизированная вода	Пропиленгликоль (100 %)
Плотность ρ , кг/м ³	998,2	1036
Вязкость μ , Па·с	0,001	0,052
Теплоемкость C_p , Дж/(кг·К)	4182	2385
Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	0,598	0,218
Температура кипения $T_{\text{кип}}$, °С	100	188
Температура замерзания $T_{\text{зам}}$, °С	0	-59

Таблица 2

Параметр	Пропиленгликоль, %		
	10	20	30
Плотность ρ , кг/м ³	1004	1010	1015
Вязкость μ , Па·с	0,0012	0,0016	0,0021
Теплоемкость C_p , Дж/(кг·К)	4120	4050	3960
Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	0,592	0,586	0,575
Температура замерзания $T_{\text{зам}}$, °С	-2	-5	-9

Расчетная модель решалась в стационарной постановке с использованием пакета ANSYS Fluent. Для описания движения потоков применялось уравнение нестационарной теплопроводности и уравнения Навье – Стокса в трехмерной форме.

Потоки воздуха (со стороны катода) и водорода (со стороны анода) подавались во встречных направлениях при входном давлении $3 \cdot 10^5$ Па и температуре 80 °С. Охлаждающая жидкость (вода или раствор пропиленгликоля) подавалась в каналы охлаждения при температуре 26,85 °С и различных скоростях течения в диапазоне 0,005...0,1 м/с.

На выходах газовых и охлаждающих каналов задавалось условие выходного давления. На внешних поверхностях биполярных пластин применялась тепловая изоляция.

Для характеристики теплофизических свойств теплоносителя применялись зависимости плотности, динамической вязкости и теплопроводности от температуры.

Численное решение осуществлялось с помощью метода SIMPLE с дискретизацией второго порядка по давлению и энергии. Сходимость решения достигалась при относительном критерии 10^{-6} .

Общий объем сеточной модели составлял порядка 0,8–1,2 млн элементов, что обеспечивало достаточную точность при умеренном времени расчета.

Эффективность теплового режима топливного элемента с протонообменной мембраной во многом определяется интенсивностью конвективного теплообмена, распределением температуры в активной зоне и согласованностью термодинамических процессов в мембране. Для оценки этих факторов были проведены численные исследования, включающие анализ корреляции Нуссельта – Пекле, температурных профилей при различных плотностях тока, а также сопоставление изменений внутренней энергии и энтропии.

Температурное распределение в активной зоне является одним из ключевых факторов, определяющих стабильность и эффективность работы топливного элемента с протонообменной мембраной.

Представим пространственные карты распределения температуры в одиночном элементе при использовании различных типов теплоносителя – деионизированной воды 100 % (рис. 2, а); пропиленгликоля 10 % (рис. 2, б); пропиленгликоля 20 %, (рис. 2, в); пропиленгликоля 30 % (рис. 2, г). Диапазон

рабочих температур варьируется в пределах 300...380 К, при этом наиболее равномерное поле наблюдается в диапазоне 357...362 К, что соответствует оптимальному режиму электродных реакций и снижению вероятности «затопления» мембраны.

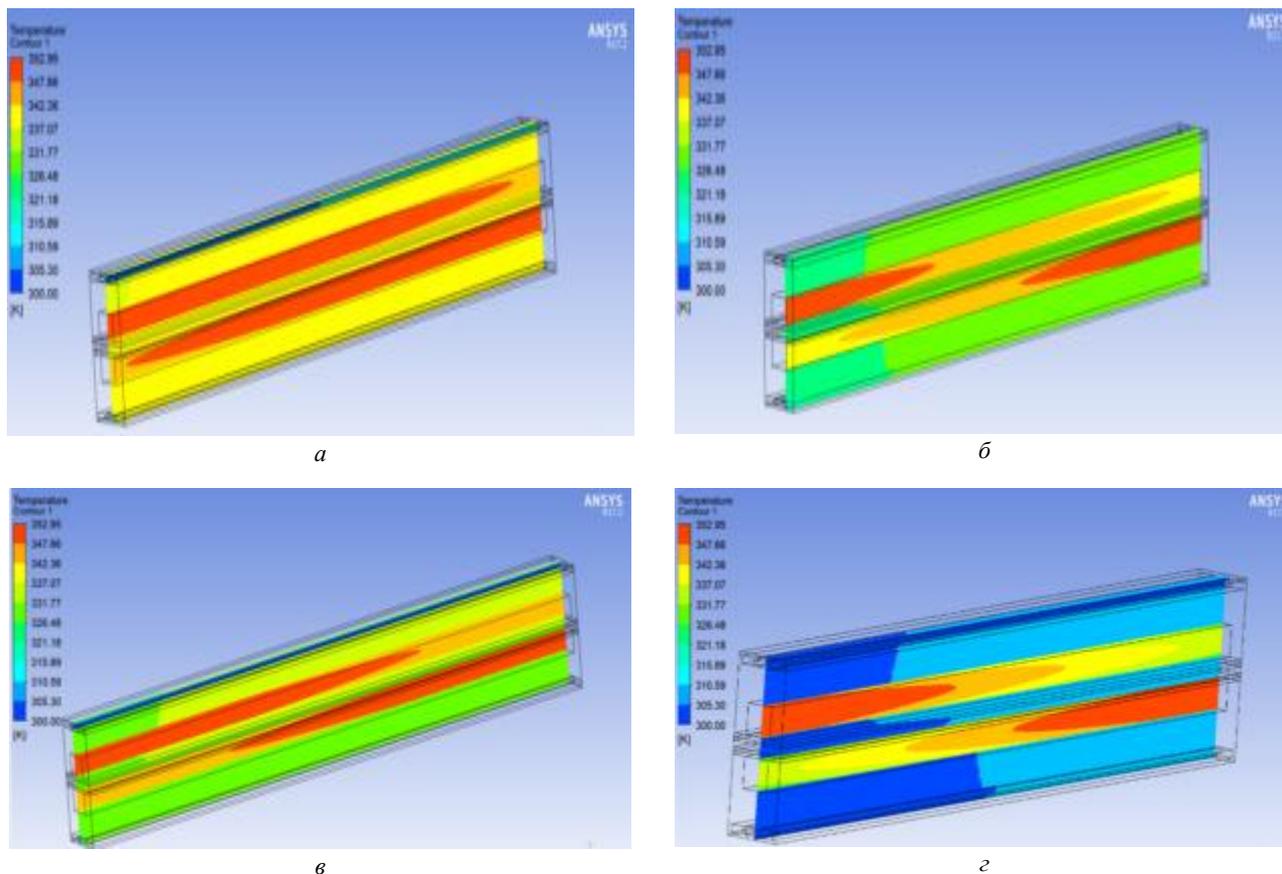


Рис. 2

Максимальные температуры на выходе из газовых каналов составили 371, 365, 361, 357 К для теплоносителей деионизированная вода (100 %), пропиленгликоль (10 %), пропиленгликоль (20 %), пропиленгликоль (30 %) при фиксированной номинальной температуре ячейки 353,15 К.

По результатам проведенного анализа установлено, что применение смеси пропиленгликоля (30 %) обеспечивает наименьшую температуру на выходе, что свидетельствует о его наибольшей охлаждающей эффективности по сравнению с другими рассмотренными теплоносителями. Это подтверждает эффективность применения гликолевых растворов для выравнивания температурного поля и предотвращения локального перегрева мембраны

На рис. 3 представлена зависимость между числом Нуссельта и числом Пекле, отражающая соотношение между конвективным и диффузионным переносом тепла в охлаждающих каналах одиночного топливного элемента.

С увеличением числа Пекле наблюдается рост числа Нуссельта, что соответствует усилению конвективного теплообмена при возрастании скорости потока теплоносителя.

Среди исследованных жидкостей наибольшие значения чисел Нуссельта и Пекле получены при использовании смеси пропиленгликоля (30 %), тогда как наименьшие – для деионизированной воды (100 %). Это указывает на то, что повышение вязкости и плотности гликолевых растворов способствует усилению теплоотвода за счет более развитого конвективного потока. Вместе с тем чрезмерное увеличение числа Нуссельта, наблюдаемое при использовании смеси пропиленгликоля (30 %), сопровождается избыточным охлаждением, что может привести к снижению рабочей температуры мембраны и, следовательно, к уменьшению эффективности электрохимических процессов.

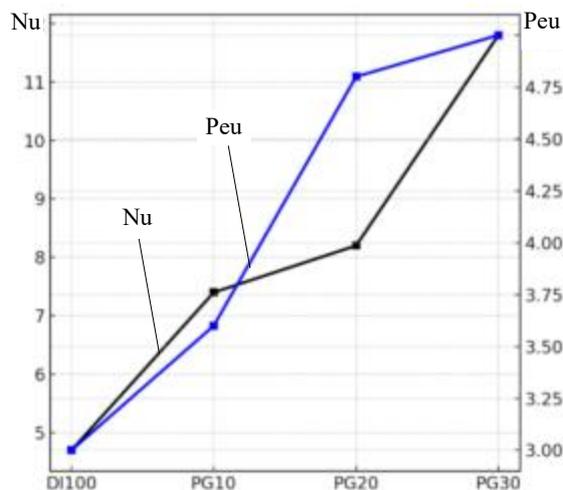


Рис. 3

Таким образом, наилучшие условия теплопередачи для одиночного топливного элемента обеспечиваются при использовании смеси пропиленгликоля (20 %), создающей оптимальный баланс между интенсивностью охлаждения и стабильностью температурного поля.

На рис. 4 представлена зависимость рабочей температуры одиночного топливного элемента от плотности тока, характеризующей интенсивность протекающих электрохимических реакций.

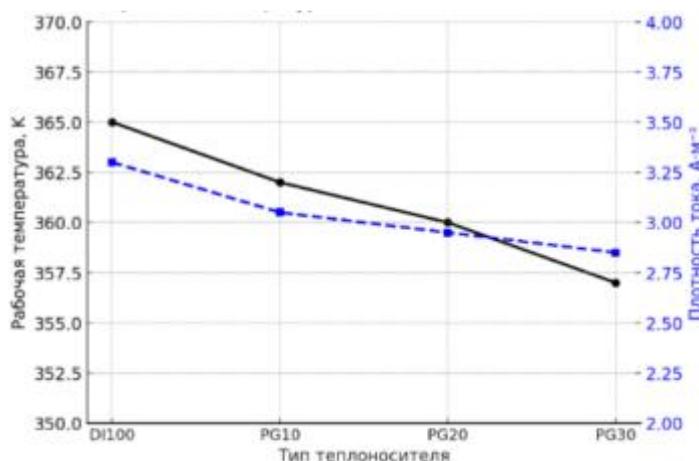


Рис. 4

Результаты численного моделирования показывают, что рабочая температура и плотность тока связаны прямо пропорционально: при увеличении плотности тока температура активной зоны возрастает вследствие роста омических потерь и тепловыделения. При снижении плотности тока, наоборот, температура уменьшается, что соответствует уменьшению тепловой мощности элемента.

Наиболее высокие значения температуры и плотности тока наблюдаются при использовании деионизированной воды в качестве теплоносителя. Однако чрезмерный нагрев при этом приводит к снижению относительной влажности и уменьшению содержания влаги в мембране, что негативно влияет на долговечность и эффективность работы элемента.

При применении смесей пропиленгликоля (10–30 %) наблюдается более равномерное температурное поле и меньшие колебания рабочей температуры. При использовании смеси пропиленгликоля (30 %) достигается оптимальное сочетание умеренной температуры и стабильной плотности тока, что обеспечивает более устойчивый тепловой режим без пересушивания мембраны.

Таким образом, использование смесей пропиленгликоля позволяет улучшить тепловую стабильность одиночного топливного элемента. При этом сохраняются удовлетворительные электрические характеристики.

На рис. 5 представлено распределение внутренней энергии U и энтальпии H в одиночном топливном элементе при различных режимах работы. Данные параметры используются как основа для оценки термодинамической эффективности системы охлаждения.

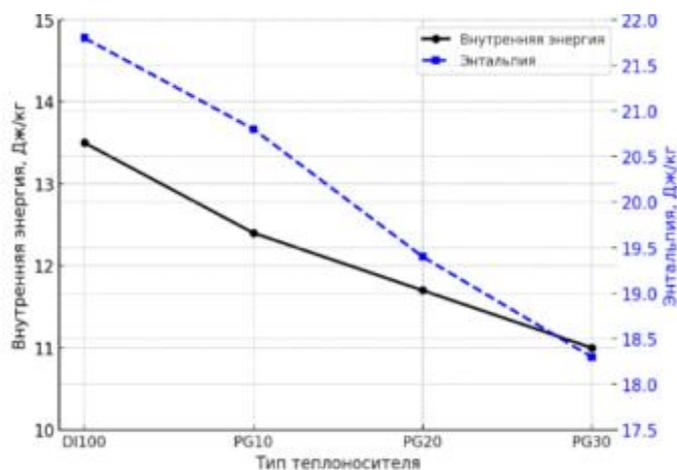


Рис. 5

Согласно результатам моделирования при использовании деионизированной воды отношение внутренней энергии к энтальпии (U/H) значительно выше, чем при применении смеси пропиленгликоля (30 %). Это свидетельствует о том, что при водяном охлаждении часть тепловой энергии аккумулируется внутри системы, что приводит к росту локальных температур и снижению эффективности теплоотвода. Напротив, при использовании теплоносителя пропиленгликоля (30 %) наблюдается меньшее значение отношения U/H , что указывает на более эффективное распределение тепла и пониженные внутренние потери энергии. Более низкое значение этого отношения соответствует лучшему теплообмену и стабильному тепловому режиму мембраны.

Таким образом, смесь пропиленгликоля (30 %) обеспечивает оптимальные условия теплового баланса для одиночного топливного элемента, уменьшая долю аккумулированной энергии и повышая общую термодинамическую эффективность системы.

Проведенное численное исследование одиночной ячейки топливного элемента с протонообменной мембраной позволило комплексно оценить влияние свойств охлаждающих жидкостей и режимных параметров на тепловой баланс и стабильность работы системы.

Согласно результатам моделирования эффективность отвода тепла и равномерность температурного поля напрямую зависят от выбора теплоносителя и интенсивности конвективного потока в каналах охлаждения.

По результатам расчетов установлено, что при базовой рабочей температуре 353,15 К наилучшие характеристики теплопередачи достигаются при использовании смеси пропиленгликоля (30 %), обеспечивающей минимальную выходную температуру (примерно 357 К), равномерное распределение тепла и стабильное влажосодержание мембраны. Для жидкостей пропиленгликоля (10, 20 %) эффективность охлаждения несколько ниже, а использование деионизированной воды приводит к избыточному нагреву и ухудшению теплового режима активной зоны.

Корреляционный анализ чисел Нуссельта и Пекле показал, что увеличение скорости потока приводит к интенсификации конвективного теплообмена. Вместе с тем чрезмерный рост числа Нуссельта может обуславливать избыточное охлаждение и приводить к смещению рабочего температурного диапазона.

Изучение энергетического баланса показало, что при использовании смеси пропиленгликоля (30 %) отношение внутренней энергии к энтальпии (U/H) минимально, что свидетельствует о более эффективном распределении тепла и меньшей доле аккумулированной энергии внутри ячейки.

Таким образом, при увеличении концентрации пропиленгликоля в теплоносителе наблюдается снижение максимальной температуры в активной зоне и повышение равномерности температурного поля. Наиболее выраженный эффект получен для смеси PG30, что позволяет рекомендовать ее для обеспечения устойчивого теплового режима одиночного топливного элемента с протонообменной мембраной в рамках рассмотренных условий моделирования.

Исследование выполнено за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского национального исследовательский технического университета имени А.Н. Туполева-КАИ («Приоритет-2030»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang G., Kandlikar S.G. A Critical Review of Cooling Techniques in Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stacks // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012. Vol. 37. P. 2412–2429.
2. Ju H. et al. Nonisothermal Modeling of Polymer Electrolyte Fuel Cells: I. Experimental Validation // *Journal of the Electrochemical Society*. 2005. Vol. 152. Article № A1645.
3. Wang C. Fundamental Models for Fuel Cell Engineering // *Chemical Reviews*. 2004. Vol. 104. P. 4727–4766.
4. Ramousse J. et al. Heat Sources in Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells // *Journal of Power Sources*. 2009. Vol. 192. P. 435–441.
5. Daud W.R.W. et al. PEM Fuel Cell System Control: A Review // *Renewable Energy*. 2017. Vol. 113. P. 620–638.
6. Faghri A., Guo Z. Challenges and Opportunities of Thermal Management Issues Related to Fuel Cell Technology and Modeling // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005. Vol. 48. P. 3891–3920.
7. Денисов Е.С., Евдокимов Ю.К. Построение систем контроля и диагностики водородного топливного элемента на основе наблюдения его электрических флуктуаций и шумов // *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*. 2011. № 1. С. 47–54.
8. Wang Y. et al. Materials, Technological Status, and Fundamentals of PEM Fuel Cells: A Review // *Materials Today*. 2020. Vol. 32. P. 178–203.
9. Rostami L. et al. A 3D CFD Model of Novel Flow Channel Designs Based on Serpentine and Parallel Configurations for PEMFC Performance Enhancement // *Energy*. 2022. Vol. 258. Article № 124726.
10. Zuo Q. et al. Optimization of Blocked Flow Field Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell with Auxiliary Channels // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47. P. 39943–39960.
11. Hamrang A. et al. Numerical Simulation of PEM Fuel Cell Performance Enhancement by Various Blockage Arrangements of the Cathode Serpentine Gas Flow Channel // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. Vol. 186. Article № 122475.
12. Ashrafi M., Kanani H., Shams M. Numerical and Experimental Study of Two-Phase Flow Uniformity in Parallel PEM Fuel Cells with Modified z-Type Flow Fields // *Energy*. 2018. Vol. 147. P. 317–328.
13. Liu Q. et al. Flow Field Structure Design Modification with Helical Baffle for PEM Fuel Cell // *Energy Conversion and Management*. 2022. Vol. 269. Article № 116175.
14. Chen Q. et al. Thermal Management of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: A Review of Cooling Methods, Material Properties, and Durability // *Applied Energy*. 2021. Vol. 286. Article № 116496.
15. Wang B. et al. A Quasi-2D Transient Model of Proton Exchange Membrane Fuel Cell with Anode Recirculation // *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 171. P. 1463–1475.
16. Zhao X. et al. Thermal Management System Modeling of a Water-Cooled Proton Exchange Membrane Fuel Cell // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. Vol. 40. P. 3048–3056.

Поступила в редколлегию 27.11.25

THERMAL MANAGEMENT AND COOLING OF PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELLS

M. Mrshd, A.D. Mityushkin, A.M. Ermakov, and R.R. Salakhov

The study presents a numerical investigation of the thermal behavior of a single proton exchange membrane fuel cell under various coolant conditions. The temperature distribution within the active region and the influence of coolant thermophysical properties on heat removal efficiency are analyzed. Three-dimensional numerical modeling was performed using ANSYS Fluent, incorporating realistic geometric parameters of bipolar plates and cooling channels. Deionized water and aqueous propylene glycol solutions of different concentrations were

considered as coolants. The results indicate that increasing the propylene glycol concentration contributes to a reduction in the maximum membrane temperature and improves the uniformity of the temperature field in the active region.

Keywords: fuel cell, proton exchange membrane, thermal management, cooling, propylene glycol, numerical simulation.

Мршд Махмуд – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: www.mrshdm21@gmail.com

Митюшкин Александр Дмитриевич – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: ADMityushkin@kai.ru

Ермаков Андрей Михайлович – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: amermakov@kai.ru

Салахов Ришат Ризович – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: RRSalakhov@kai.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАПРАВКИ БАКА КРИОГЕННЫМ ТОПЛИВОМ

А.С. Мякочин, В.В. Тлевцежев

Рассмотрены различные варианты моделирования процесса заправки бака криогенным топливом при использовании различных приближений. С целью упрощения экспериментальных исследований проанализирована возможность моделирования внутрибаковых процессов с применением модельной жидкости, отличной от натурального компонента, при условии нахождения жидкости в состоянии насыщения. С учетом разработанных методов получены безразмерные критерии подобия, характеризующие процессы протекания заправки баков в модельных и натуральных условиях. Модель заправки основана на приближении идеальной дренажной системы. На основе разработанной модели определены основные теплофизические параметры на этапе заправки баков криогенным топливом.

Ключевые слова: криогенный топливный бак, насыщенный пар, жидкий водород, тепловая защита, критерии подобия, кривая кипения, удельный тепловой поток, модельный расход подачи.

Введение

Для оптимизации процесса заправки криогенных баков большое значение имеет пропускная способность дренажной системы. В связи с этим целесообразно рассматривать два предельных случая – идеальную и реальную дренажную системы.

Под случаем идеальной дренажной системы понимается ситуация, когда давление в ходе заправки не повышается и равно давлению насыщения при температуре подаваемой жидкости. При идеальной дренажной системе температура жидкости не может повышаться. В этом случае все подводимое к жидкости тепло пойдет на парообразование, причем все образующиеся в ходе кипения пузыри будут всплывать на поверхность жидкости, и далее весь пар будет уходить из бака через дренажный клапан. Для воспроизведения в условиях модели процесса, физически подобного изучаемому натурному явлению, необходимо удовлетворить равенство безразмерных параметров, определяющих протекание процесса как в натуральных, так и в модельных условиях [1, 2]. Физическое моделирование внутрибаковых процессов подразумевает создание физической модели бака такого же или меньшего масштаба, чем натуральный бак. Введем коэффициент масштабирования

$$\lambda = \frac{R_m}{R_n},$$

где R_m , R_n – характерный размер (например, максимальный радиус бака) для масштабной и натурной моделей. Будем рассматривать модельные баки, геометрически подобные натурным.

При разработке масштабной модели для изучения внутрибаковых процессов следует учитывать возможность воспроизведения на ней условий, соответствующих трем основным этапам функционирования баков: 1) заправка компонента в бак; 2) бездренажное хранение компонента в баке; 3) отбор компонента из бака в двигатель.

В данной статье будут рассмотрены возможности моделирования процесса заправки при различных приближениях. Модель основана на приближении идеальной дренажной системы. Физико-математическая модель, описывающая сопряженные процессы заправки компонента и теплового состояния многослойной стенки бака, приведена к безразмерному виду. С учетом разработанной физико-математической модели заправки для рассматриваемых модельного и натурального баков были проведены расчеты и получены значения основных теплофизических параметров в процессе заправки.

Постановка задачи

Будем считать, что стенка бака состоит из металлической оболочки постоянной толщины h , на которую нанесен слой теплоизоляции (например, слой пенопласта) также постоянной толщины H . Будем также считать, что при расчете удельного теплового потока q из стенки бака в жидкость можно использовать приближение термически тонкой стенки для металлической оболочки.

Поскольку жидкость в баке находится в состоянии насыщения, то можно принять, что удельный тепловой поток в жидкость однозначно определяется перепадом температуры между стенкой и жидкостью (кривая кипения). С учетом изложенного примем, что удельный тепловой поток из стенки бака в жидкость описывается формулой

$$q = f(\Delta T), \quad \Delta T = T_W - T_L, \quad (1)$$

где T_W – температура оболочки (переменная во времени); T_L – температура жидкости (постоянная); f – функция, описывающая кривую кипения.

Рассмотрим какое-либо поперечное сечение стенки бака. Согласно сделанным предположениям тепло через стенку распространяется только в поперечном направлении. Будем считать, что толщина стенки намного меньше радиуса кривизны стенки в данном сечении. Удельную теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала теплоизоляции будем считать зависящими от температуры, а плотность – постоянной величиной. Тогда распространение тепла через слой теплоизоляции будет описываться следующим одномерным нестационарным уравнением теплопроводности:

$$\varphi_1 \frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial}{\partial x} \varphi_2 \frac{\partial T}{\partial x}; \quad (2)$$

$$\varphi_1(T) = \frac{c(T)}{c_*}; \quad c_* = c(T_*); \quad \varphi_2(T) = \frac{\lambda(T)}{\lambda_*}; \quad \lambda_* = \lambda(T_*),$$

где T – температура; t – время; x – поперечная координата, направленная от оболочки к внешней границе слоя теплоизоляции; φ_1, φ_2 – функции, введенные для учета температурных зависимостей удельной теплоемкости c и коэффициента теплопроводности λ ; $a = \lambda_*/(\rho c_*)$ – коэффициент температуропроводности материала теплоизоляции при некоторой реперной температуре T_* , ρ – плотность материала теплоизоляции.

Будем считать, что температура внешней поверхности теплоизоляции T_A не меняется в процессе заправки. Тогда на внешней поверхности теплоизоляции граничное условие для уравнения (2) будет следующим:

$$T|_{x=H} = T_A. \quad (3)$$

Граничное условие на внутренней поверхности теплоизоляции с учетом приближения термически тонкой стенки для металлической оболочки имеет вид

$$\lambda_* \varphi_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=h} = q + (\rho_{об} c_{об})_* h \varphi_3 \frac{\partial T_{об}}{\partial t}; \quad (4)$$

$$\varphi_3(T) = \frac{\rho_{об}(T_{об}) c_{об}(T_{об})}{(\rho_{об} c_{об})_*}; \quad (\rho_{об} c_{об})_* = \rho_{об}(T_*) c_{об}(T_*); \quad T_{об} = T|_{x=h} = T|_{x=0},$$

где $\rho_{об}, c_{об}$ – плотность и удельная теплоемкость материала оболочки; φ_3 – функция, учитывающая температурные зависимости плотности и удельной теплоемкости материала оболочки.

Рассмотрим вопрос о начальном условии для уравнения (2). Типичным является случай, когда перед началом заправки проводится предварительное захлаживание стенки бака продувкой через бак холодного газообразного компонента с температурой T_L на входе в бак. При достаточно большой длительности продувки в стенке устанавливается некоторое стационарное распределение температуры. Будем

предполагать, что в ходе продувки стенка охлаждается преимущественно за счет турбулентной естественной конвекции в газообразном компоненте, причем на внешней границе свободно-конвективного пограничного слоя температура везде равна T_L . При таких условиях в силу специфики турбулентной свободной конвекции коэффициент теплообмена между стенкой и газообразным компонентом будет постоянным вдоль стенки. Тогда для любого участка стенки скорость ее охлаждения будет одинакова, и стационарное распределение температуры поперек стенки $T_0(x)$ будет также одним и тем же для любого поперечного сечения стенки. Далее будем считать, что в процессе заправки это распределение не изменится вплоть до момента, когда до данного сечения доходит уровень жидкости. Тогда для любого поперечного сечения стенки начальное условие для уравнения (4) можно записать в виде

$$T|_{t=t_0} = T_0(x), \quad (5)$$

где t_0 – время, когда уровень жидкости доходит до рассматриваемого сечения. Оно будет различным для сечений, расположенных на различной высоте бака, поэтому поле температуры в стенке, описываемое рассматриваемой моделью, является не только нестационарным, но и двумерным. Специфика этой двумерности состоит в том, что поперечное распределение температуры в различных сечениях является решением одной и той же одномерной нестационарной задачи для различных моментов времени. Действительно, введем для каждого сечения стенки вместо общего времени t , отсчитываемого от момента начала заправки, «локальное» время τ , отсчитываемое от момента первого контакта данного сечения с жидкостью. Тогда изменение температуры в любом сечении стенки будет описываться одной и той же задачей:

$$\begin{aligned} \varphi_1 \frac{\partial T}{\partial \tau} &= a \frac{\partial}{\partial x} \left(\varphi_2 \frac{\partial T}{\partial x} \right); \\ T|_{x=H} &= T_A; \\ \lambda_* \varphi_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=h} &= q + (\rho_{об} c_{об})_* h \varphi_3 \frac{\partial T_{об}}{\partial \tau}; \\ T|_{\tau=0} &= T_0(x). \end{aligned}$$

Рассмотрим процесс заполнения бака. Обозначим через $m(t)$ массу жидкости в баке в момент времени t . Тогда интегральный баланс массы для жидкой фазы в баке будет иметь вид

$$\frac{dm}{dt} = G_L - G_V, \quad (6)$$

где G_L – массовый расход заправляемого в бак жидкого компонента; G_V – массовый расход паров компонента, образующихся из жидкой фазы за счет процессов парообразования. Заметим, что предположения, на которых основана данная модель заправки, «блокируют» фазовые переходы на свободной поверхности жидкости, поэтому единственным процессом парообразования является кипение на стенке бака. Обозначим через $F(t)$ площадь смоченной части стенки бака.

Тогда

$$Q_L = \int_F q dF; \quad G_V(t) = \frac{Q_L}{r} = \frac{1}{r} \int_F q dF, \quad (7)$$

где Q_L – интегральный тепловой поток из стенки бака в жидкость; r – удельная теплота парообразования.

Обозначим через $V(t)$ объем жидкости в баке в момент времени t , а через ρ_L – плотность жидкости. Тогда, используя формулу (7), преобразуем уравнение (6) к виду

$$\rho_L \frac{dV}{dt} = G_L - \frac{1}{r} \int_F q dF. \quad (8)$$

Рассмотрим теперь любое поперечное сечение стенки в тот момент времени, когда уровень жидкости дошел до данного сечения (рис. 1), т. е. в момент времени $t = t_0$ для данного сечения. Введем направленную вверх координату z , отсчитываемую от нижней точки полости бака.

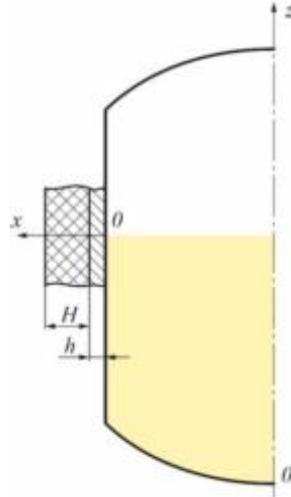


Рис. 1

Тогда каждому поперечному сечению стенки будет соответствовать свое значение координаты z . Далее для любого значения координаты z обозначим через Ω и S объем и площадь стенки той части бака, которая расположена ниже горизонтального уровня, соответствующего данному значению z . При заданных размерах и форме бака величины Ω , S , z однозначно связаны геометрическими соотношениями. Обозначим эти соотношения следующим образом:

$$\Omega = f_{\Omega Z}(z); z = f_{Z\Omega}(\Omega); S = f_{SZ}(z); z = f_{ZS}(S); \\ \Omega = f_{\Omega S}(S); S = f_{S\Omega}(\Omega).$$

Обозначим через $z_V(t)$ координату текущего уровня жидкости в баке. Используя введенные обозначения, можно записать:

$$z_V = f_{Z\Omega}(V); F = f_{SZ}(z_V).$$

Тогда интегральный тепловой поток в жидкость можно записать в виде

$$Q_L = \int_F q dF = \int_0^{z_V} q(z,t) f'_{SZ} dz; f'_{SZ} = \frac{df_{SZ}}{dz}.$$

При этом уравнение (8) принимает форму

$$\rho_L \frac{dV}{dt} = G_L - \int_0^{z_V} q(z,t) f'_{SZ} dz.$$

Для полного замыкания задачи математическую модель необходимо дополнить уравнением для определения времени $t_0(z)$. Используя введенные обозначения, это уравнение можно записать в виде

$$V|_{t=t_0} = f_{\Omega Z}(z).$$

Заметим, что в рамках рассматриваемой модели существует стационарный режим, когда поперечное распределение температуры по всей стенке является стационарным и прирост массы жидкости в баке отсутствует, поскольку расход подаваемой в бак жидкости равен расходу парообразования. Обозначим

через G_C , F_C , q_C расход заправки, смоченную площадь стенки и удельный тепловой поток из стенки в жидкость на стационарном режиме. Из формул (6), (7) следует

$$G_C = \frac{q_C F_C}{r}. \quad (9)$$

Поясним смысл соотношения (9). Если требуется заполнить бак настолько, чтобы смоченная площадь стенки была равна F_C , расход заправки должен быть не меньше, чем значение расхода заправки G_C , вычисляемое по формуле (9). В противном случае подъем уровня жидкости в баке прекратится раньше, чем требуется.

Формулу (9) можно трактовать иначе. Заметим, что величина q_C определяется характеристиками теплоизоляции. Для криогенных баков справедлива оценка:

$$q_C = \frac{\lambda_{\text{эфф}}}{H} (T_A - T_L). \quad (10)$$

Здесь $\lambda_{\text{эфф}}$ – некоторый эффективный (средний) коэффициент теплопроводности материала теплоизоляции. Предположим, что требуется заправить бак до смоченной площади стенки F_C при заданном расходе заправки G_C .

Тогда из формул (9), (10) следует, что данная задача разрешима только тогда, когда толщина теплоизоляции превышает предельную минимальную величину:

$$H_C = \frac{\lambda_{\text{эфф}} (T_A - T_L) F_C}{r G_C}. \quad (11)$$

Отметим, что в случае незначительных изменений температуры стенки в процессе заправки (например, когда проведено предварительное захлаживание стенки бака) зависимостями теплофизических свойств материалов теплоизоляции и оболочки от температуры (функции φ , φ_2 , φ_3 в выражениях (2), (4)) можно пренебречь. Тогда система всех уравнений, описывающая процесс заправки в приведенных допущениях, будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{тз}} c_{\text{тз}} \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \lambda_{\text{тз}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \\ T|_{x=H} &= T_A; \\ \lambda_{\text{тз}} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=h} &= q + \rho_{\text{об}} c_{\text{об}} h \frac{\partial T_{\text{об}}}{\partial \tau}; \\ T|_{\tau=0} &= T_0(x), \end{aligned} \quad (12)$$

где $\rho_{\text{тз}}$, $c_{\text{тз}}$, $\lambda_{\text{тз}}$ – плотность, теплоемкость и теплопроводность материала теплозащиты.

Если считать, что профиль температуры в слое теплозащиты линейный, то внешний теплоприток можно приближенно считать равным

$$q_{\text{вн}} = \frac{\lambda_{\text{тз}}}{H} (T_A - T_{\text{об}}). \quad (13)$$

Такое допущение справедливо при условии, что изменение теплосодержания материала теплозащиты мало в сравнении с величиной теплового потока в стенку. Тогда уравнения (12) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_{\text{тз}} (T_A - T_{\text{об}})}{H} &= q + \rho_{\text{об}} c_{\text{об}} h \frac{\partial T_{\text{об}}}{\partial \tau}; \\ T|_{\tau=0} &= T_0(x). \end{aligned} \quad (14)$$

Если пренебречь изменением температуры оболочки во времени и считать ее приблизительно равной температуре жидкого компонента, то получим выражение для теплового потока из стенки бака в жидкость в виде

$$q_{\text{вн}} = \frac{\lambda_{\text{тз}}(T_A - T_{\text{ж}})}{H}. \quad (15)$$

Уравнения, описывающие баланс тепла в стенке бака, дополняются уравнением динамики изменения уровня жидкости в баке типа (8).

Моделирование заправки в условиях линейного профиля температуры в теплозащите

Рассмотрим возможность моделирования процесса заправки бака после предварительного заохлаживания стенки. При этом будем считать, что справедливы следующие допущения: теплофизические свойства материалов теплозащиты и оболочки стенки бака постоянны из-за малых изменений температуры во время заправки; профиль температуры в материале теплозащиты линейный, а величина внешнего теплопритока определяется соотношением (13).

Уравнения, описывающие баланс тепла в стенке бака, будут иметь форму (14). Рассмотрим процесс моделирования на модели бака, форма которого геометрически подобна форме натурального бака.

Изменение массы жидкости в баке описывается уравнением (8), второе слагаемое в правой части которого характеризует процесс парообразования у стенки бака. Величина теплового потока $q_{\text{ж}}$ от стенки бака в жидкость целиком идет на испарение жидкого компонента. Величина этого теплового потока связана с перепадом температуры $\Delta T = T_{\text{об}} - T_L$ между силовой оболочкой бака и жидкостью кривой кипения, качественный вид которой представлен на рис. 2.

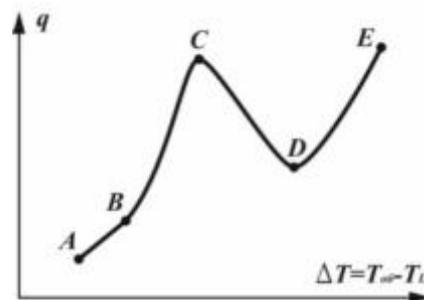


Рис. 2

Разные части данной кривой соответствуют различным режимам теплообмена. Так, участок AB описывает теплообмен при свободно-конвективном течении жидкости, участок BC – область пузырькового кипения, участок DE – область пленочного кипения, участок CD – переходную область. Кривая кипения представляет собой немонотонную зависимость, отдельные участки которой для разных жидкостей описываются различными функциональными зависимостями [3, 4].

Аппроксимация теплового потока в жидкость при малых перепадах температуры между стенкой и насыщенной жидкостью внутри бака может быть выполнена для различных сред с помощью функциональной зависимости одного вида, например линейной функции. В этом случае соотношение (8) может быть переписано в виде

$$\rho_L \frac{dV}{dt} = G_L - \frac{1}{r} \int_{F(t)} q_L dF \approx G_L - \frac{C^*}{r} \int_{F(t)} (T_{\text{об}} - T_L) dF, \quad (16)$$

где $F(t)$ – поверхность бака, контактирующая с жидкостью; C^* – константа пропорциональности в аппроксимирующей участок кривой кипения зависимости (разная для разных жидкостей) [3, 4].

Уравнения (14), (16) полностью описывают процесс заправки в указанных допущениях. Приведем эти уравнения к безразмерному виду.

Введем безразмерное время

$$Fo = \frac{\lambda_{т3} t}{R^2 \rho_{об} c_{об}},$$

где R – характерный размер бака.

Если форма бака фиксирована, то вне зависимости от линейного размера бака при одном и том же безразмерном уровне жидкости $\tilde{z} = z/R$ безразмерный объем жидкости $\tilde{V} = V/R^3$ и площадь поверхности бака $\tilde{S} = S/R^2$, контактирующей с жидкостью, будут одинаковыми для модельных и натуральных условий.

Если ввести безразмерную температуру в форме

$$\theta = \frac{T - T_L}{T_A - T_L} = \frac{T - T_L}{\Delta T_0},$$

то уравнение (16) можно привести к следующему безразмерному виду:

$$\frac{d\tilde{V}}{dFo} = \frac{G_L \rho_{об} c_{об}}{\rho_L \lambda_{т3} R} - \frac{C^* \Delta T_0 R \rho_{об} c_{об}}{r \rho_L \lambda_{т3}} \int_{\tilde{F}(Fo)} \theta_{об} d\tilde{F}, \quad (17)$$

где $\theta_{об} = (T_{об} - T_L)/(T_A - T_L)$ – относительная температура силовой оболочки бака.

Уравнение (14) приводится к следующему безразмерному виду

$$\frac{\partial \theta_{об}}{\partial Fo} = (\theta_{об} - 1) \frac{R^2}{hH} - \frac{C^* R^2}{\lambda_{т3} h} \theta_{об}. \quad (18)$$

Уравнения (17), (18) описывают подобные процессы заправки, если соблюдено равенство безразмерных критериев подобия:

$$\Pi_1 = \frac{G_L \rho_{об} c_{об}}{\rho_L \lambda_{т3} R}; \quad (19)$$

$$\Pi_2 = \frac{C^* \Delta T_0 \rho_{об} c_{об} R}{r \lambda_{т3} \rho_L}; \quad (20)$$

$$\Pi_3 = \frac{R^2}{hH}; \quad (21)$$

$$\Pi_4 = \frac{C^* R^2}{\lambda_{т3} h}. \quad (22)$$

Рассмотрим пример моделирования для случая, когда натурная жидкость – водород – моделируется другой криогенной жидкостью, например азотом [4, 5]. Силовая оболочка бака и теплозащита модельного бака выполнены из тех же самых материалов, что и в натурном баке. Тогда для выполнения равенства критериев подобия (19) – (22) необходимо, чтобы выполнялись равенства [4, 5]:

$$\Pi_{1(м)} = \Pi_{1(н)} \Rightarrow G_{L(м)} = G_{L(н)} \frac{\rho_{L(м)}}{\rho_{L(н)}} \lambda = 11,54 \lambda G_{L(н)}; \quad (23)$$

$$\Pi_{2(м)} = \Pi_{2(н)} \Rightarrow \Delta T_{0(м)} \approx \frac{5 C_{(н)}^*}{\lambda C_{(м)}^*} \Delta T_{0(н)} \approx \frac{193,77}{\lambda} \Delta T_{0(н)}; \quad (24)$$

$$\Pi_{3(м)} = \Pi_{3(н)} \Rightarrow (hH)_{(м)} = \lambda^2 (hH)_{(н)}; \quad (25)$$

$$\Pi_{4(м)} = \Pi_{4(н)} \Rightarrow h_{м} = 0,0258 \lambda h_{н}. \quad (26)$$

Здесь, как и ранее, индекс «м» относится к модельному, а индекс «н» – к натурному бакам. Приняты следующие константы пропорциональности в зависимостях, аппроксимирующих кривые кипения для модельной и натурной жидкостей [4]: $C_{(м)}^* = 163,44$; $C_{(н)}^* = 6333,9$.

Предположим, что модель бака имеет линейный размер, в 10 раз меньший, чем натурный бак, т. е. $\lambda = 0,1$. Тогда из (23) – (26) следует, что

$$G_{L(м)} = 1,154G_{L(н)}; \quad (27)$$

$$\Delta T_{0(м)} = 1937,7\Delta T_{0(н)}; \quad (28)$$

$$(hH)_{м} = 0,01(hH)_{н}; \quad (29)$$

$$h_{м} = 0,00258h_{н}. \quad (30)$$

Соотношение (27) требует обеспечения в эксперименте расхода жидкого компонента, близкого к натурному расходу, что довольно просто реализовать. Соотношения (28) – (30) удовлетворить на лабораторной модели масштабом 1:10 не получается из-за невозможности создания в эксперименте температурного перепада, на три порядка отличающегося от натурального перепада, составляющего 150–250 К в зависимости от компонента, а также невозможности создания силовой оболочки бака микронной толщины, рассчитанного на работу с давлением внутри около $3 \cdot 10^5$ Па.

Моделирование заправки с воспроизведением теплового состояния стенки

Рассмотрим процесс заправки в более общей постановке, описываемой системой уравнений (2) – (5), (8).

Обозначим через t^* время заправки бака, а через V^* и F^* – объем жидкости и смоченную площадь стенки на конец заправки, т. е. в момент времени $t = t^*$. Введем следующие безразмерные переменные:

$$\tilde{t} = \frac{t}{t^*}; \quad \tilde{t}_0 = \frac{t_0}{t^*}; \quad y = \frac{x}{H}; \quad \theta = \frac{T - T_L}{T_A - T_L}. \quad (31)$$

Рассмотрим сначала задачу без учета зависимости теплофизических свойств от температуры. Тогда уравнение теплопроводности для слоя теплоизоляции (2) и граничное условие (3) примут следующий безразмерный вид:

$$A_1 \frac{\partial \theta}{\partial \tilde{t}} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2}; \quad A_1 = \frac{t_1}{t^*}; \quad t_1 = \frac{H^2}{a}; \quad (32)$$

$$\theta|_{y=1} = 1. \quad (33)$$

Отметим, что параметр t_1 представляет собой характерное время (по порядку величины) установления стационарного распределения температуры в слое теплоизоляции при отсутствии теплообмена между теплоизоляцией и оболочкой бака.

Возьмем какую-нибудь точку на кривой кипения и обозначим температурный перепад в этой точке через ΔT^* , а тепловой поток – через q^* . Тогда кривую кипения можно представить в следующей безразмерной форме:

$$\frac{q}{q^*} = \tilde{f}(\theta_w); \quad \theta_w = \frac{T_w - T_L}{T_A - T_L} = \theta|_{y=0}; \quad q^* = q(\Delta T^*). \quad (34)$$

Примем величину q^* за масштаб теплового потока. Тогда граничное условие (4) преобразуется к следующему безразмерному виду:

$$A_2 \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=0} = \tilde{f}(\theta|_{y=0}) + A_3 \frac{\partial \theta}{\partial \tilde{t}} \Big|_{y=0}; \quad (35)$$

$$A_2 = \frac{\lambda(T_A - T_L)}{Hq_*} = \frac{q_C}{q_*}; A_3 = \frac{t_2}{t_*}; t_2 = \frac{\rho_W c_W h(T_A - T_L)}{q_*}. \quad (36)$$

Отметим, что параметр t_2 представляет собой время охлаждения оболочки постоянным тепловым потоком q_* от температуры T_A до температуры T_L при отсутствии теплообмена между оболочкой и теплоизоляцией.

Начальное условие для уравнения (32)

$$\theta|_{\tilde{t}=\tilde{t}_0} = \theta_0; \theta_0(y) = \frac{T_0(y) - T_L}{T_A - T_L}. \quad (37)$$

Введем безразмерную площадь смоченной поверхности стенки по формуле

$$\tilde{F} = \frac{F}{F_*}. \quad (38)$$

Тогда безразмерный интегральный тепловой поток из стенки в жидкость принимает вид

$$\tilde{Q}_L = \frac{Q_L}{q_* F_*} = \int_{\tilde{F}} \tilde{q} d\tilde{F}. \quad (39)$$

В качестве масштаба для массовых расходов будем использовать расход заправляемого компонента G_L . Тогда безразмерный расход парообразования запишется в виде

$$\tilde{G}_V = \frac{q_* F_*}{r G_L} \int_{\tilde{F}} \tilde{q} d\tilde{F}. \quad (40)$$

Введем безразмерный объем жидкости в баке по формуле

$$\tilde{V} = \frac{V}{V_*}. \quad (41)$$

При этом уравнение (8) преобразуется в следующее безразмерное уравнение:

$$A_4 \frac{d\tilde{V}}{d\tilde{t}} = 1 - A_5 \int_{\tilde{F}} \tilde{q} d\tilde{F}, \quad A_4 = \frac{\rho_L V_*}{G_L t_*}, \quad A_5 = \frac{q_* F_*}{G_L r}. \quad (42)$$

Предположим, что имеются два бака одинаковой формы, но разных размеров (большой (натурный) и меньшего размера – модельный), у которых одинаковы материалы оболочки и теплоизоляции. Предположим также, что распределения температуры в стенках обоих баков перед началом заправки одинаковы. В оба бака проводится заправка одинакового компонента. Рассмотрим вопрос о возможности экспериментального моделирования в модельном баке физических процессов, протекающих в натурном баке, при условии, что и в том, и в другом случае изложенная физико-математическая модель адекватно описывает эти процессы.

Применительно к рассматриваемой задаче экспериментальное моделирование означает проведение заправки модельного бака при таких условиях, чтобы зависимости всех искомых безразмерных величин от их безразмерных аргументов совпадали с соответствующими зависимостями для натурного бака. Будем исходить из того, что для создания условий моделирования имеется возможность варьирования в модельном эксперименте времени и расхода заправки, а также толщин оболочки и теплоизоляции.

Безразмерные характеристики процесса для модельного и натурного баков будут совпадать, если они описываются одной и той же системой уравнений. Отсюда возникает требование равенства безразмерных определяющих параметров (критериев подобия) для модельного и натурного баков.

Из равенства $A_{2(м)} = A_{2(н)}$ следует, что $H_{(м)} = H_{(н)}$, т. е. толщина слоя теплоизоляции в модельном баке должна быть такой же, как в натурном баке. С учетом этого обстоятельства из равенства $A_{1(м)} = A_{1(н)}$

следует, что размерное время заправки t^* для модельного бака должно быть таким же, как в натуральных условиях. Тогда из равенства $A_{3(м)} = A_{3(н)}$ следует, что толщина оболочки модельного бака должна быть такой же, как у натурального бака.

Рассмотрим некоторое поперечное сечение стенки натурального бака и геометрически подобное ему сечение в модельном баке. Предположим далее, что $\tilde{t}_{0(м)} = \tilde{t}_{0(н)}$. Тогда, если все перечисленные условия выполнены, то зависимость безразмерной температуры стенки от безразмерного времени для обоих баков будет одной и той же, т. е. тепловое состояние стенки будет воспроизводиться. Отметим, что масштабы времени, координаты и температуры в рассматриваемых условиях одинаковы для обоих баков. Это означает, что динамика изменения размерной температуры $T(x, t)$ в рассматриваемом сечении стенки модельного бака будет такой же, как в соответствующем сечении натурального бака, т. е. температурное поле не только моделируется, но и прямо копируется. Отсюда следует, что любые зависимости теплофизических свойств материалов оболочки и теплоизоляции от температуры будут автоматически воспроизводиться в модельном эксперименте. Таким образом, если в геометрически подобных сечениях стенки выполнены условия $H_м = H_н$, $h_м = h_н$, $t_{*м} = t_{*н}$, то температурное поле в модельном эксперименте будет автоматически воспроизводиться даже при значительной зависимости теплофизических свойств от температуры.

Полученные результаты относятся к геометрически подобным сечениям стенки натурального и модельного баков при условии, что $\tilde{t}_{0(м)} = \tilde{t}_{0(н)}$. Для выполнения этого условия необходимо, очевидно, чтобы скорость заполнения модельного бака была геометрически подобна скорости заполнения натурального бака, т. е. чтобы выполнялось условие

$$\tilde{V}_м(\tilde{t}) = \tilde{V}_н(\tilde{t}). \quad (43)$$

Предположим, что это условие выполнено. Тогда с учетом полученных результатов в любой момент безразмерного времени наблюдается равенство безразмерных интегральных тепловых потоков в жидкости:

$$\left(\int_{\tilde{F}} \tilde{q} d\tilde{F} \right)_м = \left(\int_{\tilde{F}} \tilde{q} d\tilde{F} \right)_н. \quad (44)$$

С учетом (44) из уравнения (42) следует, что равенство (43) будет выполнено, если выполняются дополнительные условия

$$A_{4(м)} = A_{4(н)}; \quad A_{5(м)} = A_{5(н)}. \quad (45)$$

Заметим, что варьируя модельный расход заправки, можно добиться выполнения либо первого условия (45), либо второго, но не одновременного выполнения обоих. В связи с этим строгое моделирование невозможно. Исключение составляет случай, когда вторым слагаемым в правой части уравнения (42) можно пренебречь, т. е. когда парообразование незначительно сказывается на скорости повышения уровня жидкости, причем как в натурном, так и в модельном баках. В этом случае необходимо подобрать модельный расход заправки, исходя из первого равенства (45), и по измеренной в модельном эксперименте скорости парообразования $G_{V(м)}$ можно пересчитать скорость парообразования в натурном баке $G_{V(н)}$. Поскольку в рассматриваемом случае равенство (45) будет выполнено, то из (40) можно получить следующую формулу пересчета:

$$G_{V(н)} = G_{V(м)} \frac{F_{*(н)}}{F_{*(м)}}. \quad (46)$$

Таким образом, соотношение (46) позволяет определять значение расхода в натурном баке по имеющимся исходным данным.

Исходные данные и результаты расчета

Согласно изложенным методикам расчета проанализируем различные варианты моделирования процесса заправки бака после предварительного захлаживания стенки. Рассмотрим сначала моделирование заправки в условиях линейного профиля температуры в теплозащите. Предположим, что модель бака имеет линейный размер, в два раза меньший, чем размер натурального бака, т. е. $\lambda = 0,5$. В данных исследованиях в качестве натурной жидкости будем применять водород. В качестве модельных жидкостей будем использовать жидкий азот и жидкий водород. Теплофизические свойства жидкого водорода будем выбирать при температуре $T_{L(H_2)} = 20,5 \text{ К}$, теплофизические свойства азота – при температуре $T_{L(N_2)} = 77 \text{ К}$. Оболочка и теплозащита модельного бака выполнены из тех же самых материалов, что и в натурном баке.

Для проведения расчетов будем иметь следующий набор исходных данных по геометрическим параметрам натурального бака и теплофизическим свойствам модельных жидкости [5]: $\rho_{L(M)H_2} = 70 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{L(M)N_2} = 810 \text{ кг/м}^3$; $r_{(H)} = 444 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$. Радиус натурального бака $R_{(H)} = 2 \text{ м}$. Натурный расход подачи жидкого водорода в бак составляет $G_{L(H)} = 1 \text{ кг/с}$. Температурный перепад между теплоизоляцией и средой $\Delta T_{0(H)} = 0,5 \div 1 \text{ К}$. Толщины металлической оболочки натурального и модельного баков $h_{(H)} = h_{(M)} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Толщины теплоизоляции натурального и модельного баков $H_{(H)} = H_{(M)} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. С учетом формул (23) – (26) получим значения параметров для модельного бака на азоте и водороде.

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Модельная жидкость	Модельный расход подачи $G_{L(M)}$, кг/с	Толщина оболочки модельного бака h_m , мм	Толщина теплоизоляции модельного бака H_m , мм	Температурный перепад между теплоизоляцией и средой в модельном баке $\Delta T_{0(M)} = T_A - T_L$, К
Водород	0,5	0,5	7,5	5÷10
Азот	5,78	0,0129	290	200÷350

Проанализируем моделирование заправки бака с воспроизведением теплового состояния стенки. Рассмотрим модельный бак, характерный размер которого в пять раз меньше размера натурального бака, т. е. $\lambda = 0,2$. Тогда отношение смоченных объемов для натурального и модельного бака будет $F_{*(H)}/F_{*(M)} = 125$. В качестве модельной жидкости также будем использовать жидкий водород. Также будем считать, что оболочка и теплозащита модельного бака выполнены из тех же самых материалов, что и в натурном баке. Предположим также, что степени заполнения модельного и натурального баков одинаковы и составляют $\varphi = 90 \%$. Для проведения расчетов используется следующий набор исходных данных по геометрическим параметрам модельного и натурального баков и теплофизическим свойствам водорода: $G_{L(H)} = 1 \text{ кг/с}$; $\rho_L = 70 \text{ кг/м}^3$; $\rho_V = 1,26 \text{ кг/м}^3$; $h_H = h_M = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $H_H = H_M = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $r = 444 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$. Площадь смоченной поверхности натурального бака составляет $F_{*(H)} = 49,965 \text{ м}^2$, площадь смоченной поверхности для модельного бака $F_{*(M)} = 1,96 \text{ м}^2$. В работе [6] было получено, что значение удельного теплового потока для натурального бака на стационарном режиме заправки составляет $q_{*H} = 344 \text{ Вт/м}^2$. В соответствии с соотношением (9) массовый расход пара на испарение на стационарном режиме заправки для натурального бака равен $G_{V(H)} = 3,875 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с}$. Очевидно, что при выполнении условия $A_{4(M)} = A_{4(H)}$ будет выполняться равенство $t_{*(M)} = t_{*(H)}$. При этом из второго равенства (42) следует, что отношение расходов подачи в модельном и натурном баках должно быть $G_{L(H)}/G_{L(M)} = 125$. Следовательно, расход подачи в модельный бак будет составлять r . Из соотношения (46) можно получить значение массового расхода на испарение для модельного бака: $G_{V(M)} = 1,39 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$. Результаты полученных расчетов приведены в табл. 2.

Рассмотрим случай, когда $A_{5(м)} = A_{5(н)}$. Посредством вариаций модельный расход заправки жидкости в бак подбирался таким образом, чтобы $G_{L(н)}/G_{L(м)} = 25$. Его значение составляет $G_{L(м)} = 4 \cdot 10^{-2}$ кг/с. Из третьего соотношения (42) следует, что значение удельного теплового потока для модельного бака составляет $q_{*(м)} = 382$ Вт/м². Тогда с учетом соотношения (9) массовый расход пара на испарение на стационарном режиме заправки для модельного бака равен $G_{V(м)} = 1,5410^{-3}$ кг/с. Однако при этом равенство $t_{*(м)} = t_{*(н)}$ не выполняется. Массовый расход пара на испарение для натурального бака с учетом равенства (46) будет равен $G_{V(н)} = 3,9 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Используя уравнение (8), можно определить характерные времена заправки модельного и натурального баков криогенным компонентом с учетом испарения и без него.

Используя полученные расчетные данные, нетрудно убедиться в равенстве всех остальных критериев подобия, используемых в данной постановке: $A_{2(м)} = A_{2(н)}$, $A_{3(м)} = A_{3(н)}$, $A_{4(м)} = A_{4(н)}$. В случае когда $A_{4(м)} = A_{4(н)}$, характерные времена заправки модельного и натурального баков совпадают. Без учета испарения эта величина составляет $t_{1*(м)} = t_{1*(н)} = 0,881$ ч, с учетом испарения $t_{2*(м)} = t_{2*(н)} = 0,917$ ч. Результаты расчетов различаются не более чем на 4%. В работе [7] было получено соотношение для определения объемного расхода пара ψ_D , дренируемого из бака на конец заправки:

$$\psi_D = \frac{G_L}{\rho_L} + \frac{Q_L}{r} \left(\frac{1}{\rho_{VS}} - \frac{1}{\rho_L} \right) + Q_V \frac{\gamma_V - 1}{\gamma_V p}, \quad (47)$$

где G_L – массовый расход заправляемого в бак жидкого компонента; ρ_{VS} – плотность паров криогенного компонента на межфазной поверхности; ρ_L – плотность жидкого криогенного компонента; Q_L , Q_V – интегральные тепловые потоки к жидкой и паровой фазам компонента. Тогда массовый расход пара, дренируемого из натурального водородного бака на конец заправки, составляет $G_{DH_2(н)} = 0,276$ кг/с. При $A_{4(м)} = A_{4(н)}$ с учетом соотношения (47) значение массового расхода пара, дренируемого из модельного бака на конец заправки, составляет $G_{DH_2(м)} = 3,16 \cdot 10^3$ кг/с.

При $A_{5(м)} = A_{5(н)}$ для модельного бака время $t_{1*(м)} = 0,176$ ч и $t_{2*(м)} = 0,183$ ч. При этом массовый расход пара, дренируемого из бака на конец заправки, составляет $G_{DH_2(м)} = 3,61 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Модельная жидкость	Натурный расход подачи $G_{L(н)}$, кг/с	Модельный расход подачи $G_{L(м)}$, кг/с	Модельный расход парообразования $G_{V(м)}$, кг/с	Натурный расход парообразования $G_{V(н)}$, кг/с	Время заправки модельного бака без учета испарения $t_{1*(м)}$, ч	Время заправки модельного бака с учетом испарения $t_{2*(м)}$, ч
Водород	$A_{4(м)} = A_{4(н)}$					
	1	$8 \cdot 10^{-3}$	$1,3959 \cdot 10^{-3}$	$3,875 \cdot 10^{-2}$	0,881	0,917
$A_{5(м)} = A_{5(н)}$						
	1	$4 \cdot 10^{-2}$	$1,54 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	0,176	0,183

Согласно расчетам в натурном и модельных баках парообразование незначительно влияет на скорость повышения уровня жидкости, так как время заправки бака с учетом испарения $t_{1*(н)}$ и без него $t_{2*(н)}$ в обоих случаях примерно одинаково. Результаты расчетов различаются не более чем на 4%.

Таким образом, рассмотрен анализ возможностей моделирования внутрибаковых процессов на этапе заправки компонента в бак. Математическая модель, описывающая сопряженные процессы заправки компонента и теплового состояния многослойной стенки бака, приведена к безразмерному виду.

В различных приближениях получены безразмерные критерии подобия, характеризующие ход протекающей заправки в модельных и натуральных условиях.

Моделирование заправки в условиях линейного профиля температуры может быть реализовано при рассмотрении модели бака, размер которого в два раза меньше размера натурального изделия. В качестве заправляемой жидкости целесообразно использовать водород. Применение в качестве модельной жидкости азота затрудняет точное моделирование процесса заправки из-за невозможности создания силовой оболочки бака толщиной $h_m = 1,29 \cdot 10^{-5}$ м, а также невозможности создания в эксперименте температурного перепада между оболочкой и жидкостью $\Delta T_{0(m)} = 100 \div 150$ К.

Моделирование процесса заправки с воспроизведением теплового состояния стенки было рассмотрено на модельном баке с жидким водородом, характерный линейный размер которого в пять раз меньше размера натурального бака. Для выполнения равенства критериев подобия $A_{4(m)} = A_{4(n)}$ отношение расходов подачи в модельном и натурном баках составляет $G_{L(n)}/G_{L(m)} = 125$. При этом характерные значения времени заправки модельного и натурального баков совпадают. Без учета испарения время заправки натурального и модельного баков равно $t_{1*(m)} = t_{1*(n)} = 0,881$ ч, с учетом испарения – $t_{2*(m)} = t_{2*(n)} = 0,917$ ч. Массовый расход пара, дренируемого из бака на конец заправки, в этом случае равен $G_{DH_2(m)} = 3,1610^{-3}$ кг/с. При условии $A_{5(m)} = A_{5(n)}$ модельный расход подачи жидкого водорода в бак подбирался таким образом, чтобы $G_{L(n)}/G_{L(m)} = 25$. Его значение равно $G_{L(m)} = 4 \cdot 10^{-2}$ кг/с. При этом характерное время заправки модельного бака с учетом испарения компонента составляет $t_{1*(m)} = 0,183$ ч, без испарения компонента – $t_{2*(m)} = 0,176$ ч. Массовый расход пара на дренаж составляет $G_{DH_2(m)} = 3,61 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Массовые расходы пара, дренируемого из бака в обоих случаях, различаются не более чем на 12 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977. 268 с.
2. Кутателадзе С.С. Анализ подобия и физические модели. Новосибирск: Наука, 1986. 324 с.
3. Веркин Б.И., Кириченко Ю.А., Русанов К.В. Теплообмен при кипении криогенных жидкостей. Киев: Наукова думка, 1987. 264 с.
4. Ярхо С.А. Теплообмен в дисперсном режиме кипения криогенных жидкостей // Инженерно-физический журнал в криогенных магистралях / Исследование теплообмена в летательных аппаратах. 1978. № 1. С. 68–74.
5. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
6. Мякочин А.С., Тлевцежев В.В. Определение параметров теплообмена в водородных баках на стационарном режиме заправки // Тепловые процессы в технике. 2024. № 9. С. 399–411.
7. Тлевцежев В.В., Мякочин А.С. Разработка методики расчета теплофизических процессов, протекающих при заправке топливных баков криогенным топливом // Авиация и космонавтика: Сб. тез. 22-й Междунар. конф., г. Москва, 20–24 нояб. 2023. М.: Перо, 2023. С. 108–109.

Поступила в редколлегию 15.12.25

THEORETICAL STUDIES OF THE POSSIBILITY OF MODELING THE PROCESS OF FILLING A TANK WITH CRYOGENIC FUEL

A.S. Myakochin and V.V. Tlevtsezhev

The article discusses various options for modeling the process of refueling a tank with cryogenic fuel under various approximations. To simplify experimental studies, the possibility of modeling in-tank processes on a model liquid other than the full-scale component was considered.

The liquid in the tank is in a state of saturation. Taking into account the developed methods, dimensionless similarity criteria have been obtained that characterize the processes of tank refueling under model and field conditions. The refueling model is based on an approximation of an ideal drainage system. Based on the developed model, the main thermophysical parameters were obtained at the stage of refueling tanks with cryogenic fuel.

Keywords: cryogenic fuel tank, saturated steam, liquid hydrogen, thermal protection, similarity criteria, boiling curve, specific heat flux, model flow rate.

Мякочин Александр Сергеевич – д-р техн. наук (МАИ, Москва)
E-mail: amyakochin@gmail.com

Тлевцежев Вадим Владимирович – аспирант (МАИ, Москва)
E-mail: tlevcejev@mail.ru

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ТЕПЛОВЫЕ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРУБЧАТОЙ ПЕЧИ

А.В. Садыков

Исследовано влияние расположения ярусов веерных горелок на тепловые и аэродинамические характеристики трубчатой печи коробчатого типа. Сложный теплообмен в печи моделируется двумерными дифференциальными уравнениями энергии, переноса излучения, движения, неразрывности, k - ϵ -модели турбулентности, двухшаговой модели горения метана. Лучистый теплообмен рассматривается в рамках S_4 -приближения метода дискретных ординат с учетом селективности излучения дымовых газов.

Ключевые слова: излучение, теплообмен, трубчатая печь, горение, температура, дымовые газы.

В сфере промышленного нефтехимического производства технологические процессы в основном осуществляются при высоких температурах. В нефтехимической промышленности для реализации процессов нагрева, проведения высокотемпературных технологических операций широко используются трубчатые печи. Для осуществления технологических процессов в реакционных трубах должна быть обеспечена определенная теплонапряженность труб по их длине. Для этого обычно используются горелки настольного сжигания топлива с многоярусным расположением на боковых стенах камеры радиации трубчатой печи. В работе использованы газовые веерные горелки типа ГВН, предназначенные для сжигания газообразного топлива в трубчатых печах на предприятиях нефтеперерабатывающей, нефтехимической промышленности.

Исследования проведены на примере трубчатой печи типа БПК-6К с использованием дифференциального метода, подробно описанного в работе [1]. Печь коробчатого типа БПК-6К используется для паровой конверсии природного газа.

Схема печи и система координат приведены на рис. 1, а. Моделирование работы веерной горелки иллюстрирует рис. 1, б.

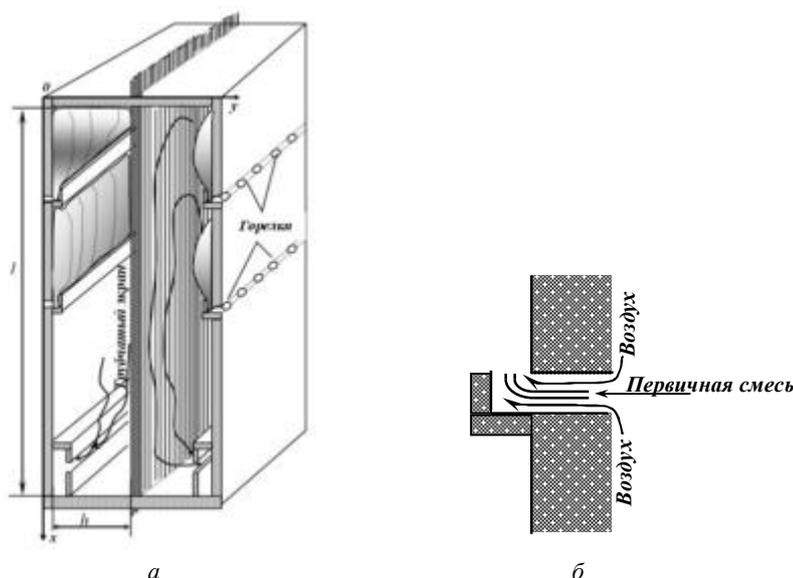


Рис. 1

Камера радиации печи состоит из двух секций, расположенных симметрично относительно однорядного трубчатого змеевика с вертикальным расположением труб. По центру печи в один ряд расположены трубчатые реакторы, по которым сверху вниз движется парогазовая смесь. В змеевике 28 труб

диаметром 134×12 мм, шаг между ними – 300 мм, обогреваемая длина труб – 10 м. Верхний ярус горелок расположен на расстоянии 1,5 м от свода, нижний – на расстоянии 4 м от свода. В численных исследованиях рассмотрены разные возможные варианты расположения ярусов горелок.

Наличие плоскости симметрии, а также симметричное расположение горелок позволяют рассматривать задачу в двумерной постановке для одной половины печи. Ряд труб заменим сплошной непрозрачной для теплового излучения лучевоспринимающей поверхностью с эффективной степенью черноты. Эффективная степень черноты $\varepsilon_{эф}$ и отражательная способность $r_{эф}$ такого трубчатого экрана вычисляются по формулам [2]

$$\varepsilon_{эф} = \frac{\varphi_{пз}(2 - \varphi_{пз})\varepsilon}{\varepsilon + n\varphi_{пз}(2 - \varphi_{пз})r}; r_{эф} = 1 - \varepsilon_{эф}, \quad (1)$$

где ε , r – степень черноты и отражательная способность наружной поверхности реакционных труб; $\varphi_{пз}$ – угловой коэффициент, зависящий от внешнего диаметра труб d и шага между ними S_s :

$$\varphi_{пз} = 1 + \frac{d}{S_s} \operatorname{arctg} \sqrt{\left(\frac{S_s}{d}\right)^2 - 1} - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{S_s}\right)^2}, \quad n = \frac{S_s}{\pi d}.$$

Двумерная математическая модель задачи содержит стационарные уравнения энергии, переноса энергии излучением, движения, неразрывности, k - ε -модели турбулентности, двухшаговой модели горения.

Распределение температур находится в результате численного решения уравнения энергии

$$c_p \rho u \frac{\partial T}{\partial x} + c_p \rho v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(\lambda + \lambda_t) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\lambda + \lambda_t) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + Q_V - \operatorname{div} \bar{q}_p, \quad (2)$$

где $c_p = c_p(T)$ – изобарная теплоемкость; u , v – составляющие вектора скорости \bar{V} по осям $0x$, $0y$; ρ – плотность дымовых газов; λ , λ_t – коэффициенты молекулярной и турбулентной теплопроводности; $T = T(x, y)$ – температура в точке с координатами x , y ; \bar{q}_p – вектор плотности интегрального по спектру лучистого потока тепла; Q_V – объемная плотность тепловыделения в результате горения газообразного топлива. Мощность плотности лучистых потоков ($\operatorname{div} \bar{q}_p$) в формуле (2) находится решением уравнения переноса излучения.

В камере радиации в основном излучают и поглощают энергию диоксид углерода, вода и сажистые частицы. Селективность излучения дымовых газов рассматривается в рамках модели широкой полосы, параметры которой приведены в работах [1, 3].

Лучистый теплообмен рассматривается в рамках S_4 -приближения метода дискретных ординат. Вопросы численной реализации S_n -приближения метода для прямоугольной геометрии рассмотрены в работах [4, 5]. В рамках модели широкой полосы для S_n -приближения система дифференциальных уравнений относительно интенсивности излучения имеет вид

$$\mu_m \frac{\partial I_m^k}{\partial x} + \xi_m \frac{\partial I_m^k}{\partial y} = \alpha_k \int_{\lambda_{k-1}}^{\lambda_k} I_{b\lambda} d\lambda - (\alpha_k + \beta_k) I_m^k + \frac{\beta_k}{4\pi} \sum_{m'=1}^{N_0} w_{m'} \varphi_{m'm} I_{m'}^k, \quad (3)$$

$$m = 1, 2, 3, \dots, N_0; k = 1, 2, 3, \dots, N_s,$$

где $I_{b\lambda}$ – функция Планка; I_m^k – интенсивность излучения в k -м спектральном диапазоне $[\lambda_{k-1}, \lambda_k]$ вдоль направления $\bar{\Omega}_m$; α_k , β_k – осредненные спектральные коэффициенты поглощения и рассеяния в k -м спектральном диапазоне; $w_{m'}$ – угловые весовые коэффициенты; μ_m , ξ_m – направляющие косинусы для дискретного направления $\bar{\Omega}_m$; $N_0 = n(n+2)$, где n – порядок приближения; N_s – количество спектральных полос. Индексы m' , m обозначают направления падающего и испускаемого излучения. В расчетах использованы приведенные в работе [6] весовые множители и угловые координаты. Коэффициент $\varphi_{m'm}$

учитывает анизотропию рассеяния при квадратурном представлении интегрального члена и задается выражением

$$\Phi_{m'm} = 1 + g_1 (\mu_m \mu_{m'} + \xi_m \xi_{m'}).$$

Здесь коэффициент g_1 является показателем асимметрии и находится в диапазоне $-1 \leq g_1 \leq 1$.

В рамках модели широкой полосы уравнение переноса излучения решается многократно – по числу выделенных спектральных полос.

Поле скоростей находится решением осредненных уравнений движения и неразрывности совместно с уравнением состояния

$$\left. \begin{aligned} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{эф}} \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \vec{V} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{эф}} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + f_1; \\ \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{эф}} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{эф}} \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \vec{V} \right) \right) + f_2; \\ \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} &= 0; \quad p = \frac{\rho}{\mu_{\text{см}}} RT, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

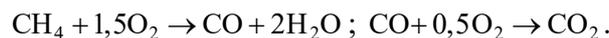
где p – давление дымовых газов в радиантной камере; $\mu_{\text{эф}} = \mu + \mu_{\tau}$ – коэффициент эффективной вязкости, μ , μ_{τ} – коэффициенты молекулярной и турбулентной вязкости; $\mu_{\text{см}}$ – молярная масса дымовых газов; f_1, f_2 – массовые силы. Состояние дымовых газов рассматривается в приближении идеального газа.

Для замыкания уравнений движения используется двухпараметрическая диссипативная k - ε -модель турбулентности. Уравнения для кинетической энергии турбулентных пульсаций k и скорости ее диссипации ε запишем в обобщенном виде:

$$\rho u \frac{\partial \phi}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_{\phi}, \quad (5)$$

где обобщенная переменная $\phi = \{k, \varepsilon\}$; Γ_{ϕ} – коэффициент переноса; S_{ϕ} – источниковый член уравнения.

В качестве топлива используется природный газ, состоящий в основном из метана. Горение метана рассматривается в рамках двухшаговой модели



В модели горения имеем два уравнения вида (5), где обобщенная переменная ϕ заменяется на m_{CH_4} , m_{CO} – массовые концентрации метана и оксида углерода. Скорости реакций определяются по модели распада вихрей.

Граничные условия для интенсивности излучения на поверхности нагрева имеют вид

$$I(M, \psi, \theta) = \varepsilon I_b(T_w) + \frac{r}{\pi} q_n$$

при $\vec{\Omega} \cdot \vec{n} < 0$ на границе. Здесь ε , r – степень черноты и отражательная способности стенок; \vec{n} – внешняя нормаль к границе; T_w – температура поверхности стенки со стороны топки; q_n – поверхностная плотность теплового излучения в направлении внешней нормали. Вопросы аппроксимации граничных условий в методе дискретных ординат, вывода дискретных аналогов уравнений рассмотрены в работах [1, 3].

Для уравнения энергии, уравнений модели турбулентности, модели горения на входном участке ставится граничное условие первого рода. Для уравнений движения на твердой границе ставятся условия прилипания и непроницаемости. На жесткой стенке для уравнений модели горения задается условие отсутствия потока. Для уравнения энергии на жесткой стенке ставятся граничные условия первого или третьего рода в зависимости от стенки. На твердой границе диффузионный поток кинетической энергии турбулентности полагается равным нулю. На оси потока задается условие симметрии. На выходе из печи для параметров задается условие нулевого градиента.

Дискретные аналоги уравнений сохранения получены методом контрольных объемов в сочетании с методом конечных разностей. Для алгебраической аппроксимации уравнений (2), (4), (5) применена разностная сетка «шахматного» типа. Узлы, в которых определяются продольная u и поперечная v составляющие скорости, сдвинуты относительно «основных» узлов на полшага в продольном и поперечном направлениях. Подробно эти вопросы рассмотрены в работе [1]. Около футерованной стенки, где расположены в два ряда горелки, использована более мелкая сетка. Алгоритм расчета турбулентного течения дымовых газов основан на процедуре SIMPLE и подробно описан в работе [1].

Решение задачи сложного теплообмена проводится по итерационной схеме. В каждой итерации последовательно решаются газодинамическая и тепловая задачи. В ходе итерационного процесса совместного решения уравнений энергии и переноса излучения в первых внешних итерациях поле температуры сильно «осциллирует». Для уменьшения величины «осцилляций» применяется нижняя релаксация и линеаризация источников членов.

В расчетах в качестве топливного газа использовался метан. Расход газа на половину камеры радиации составлял $V_T = 0,198 \text{ м}^3/\text{с}$, низшая теплота сгорания $Q_H^p = 35818 \text{ кДж/м}^3$. Температура топливной смеси на входе в горелки – 323 К. Воздух, подаваемый на горение, имеет идентичную температуру. Коэффициент избытка воздуха $\alpha_v = 1,1$. Расчеты выполнены при равномерном распределении топливного газа по ярусам горелок. Для расчета теплофизических свойств продуктов сгорания использованы известные эмпирические зависимости [7].

Эффективная степень черноты поверхности нагрева, определенная по формуле (1), равна 0,79. Температура наружной поверхности труб линейно менялась в диапазоне 1150...1200 К. Предполагается, что твердые поверхности диффузно испускают собственное излучение и отражают падающее. Степень черноты футерованных боковых стенок $\varepsilon = 0,42$; коэффициент теплопроводности с учетом многослойности стенок $\lambda = 0,35 \text{ Вт/(м·К)}$. Учитывалась потеря теплоты через стенки за счет теплопроводности. Наружная температура стенок печи принята равной 300 К. Толщина стенок – 0,45 м. Степень черноты свода принята равной 0,67, пода – 0,69.

В проведенных параметрических исследованиях рассмотрено шесть вариантов расположения ярусов веерных горелок. В первом варианте верхний ярус расположен на расстоянии 1 м от свода, а нижний ярус – в 2,5 м от свода. Во втором варианте верхний и нижний ярусы расположены на расстояниях 2 и 3,5 м от свода. В каждом следующем варианте расстояние от свода увеличивается на 1 м. Расстояние между ярусами горелок во всех вариантах – 1,5 м.

Приведем результаты расчетов.

На рис. 2 показаны изотермы при двух вариантах расположения ярусов горелок (верхняя часть – первый вариант, нижняя часть – шестой вариант).

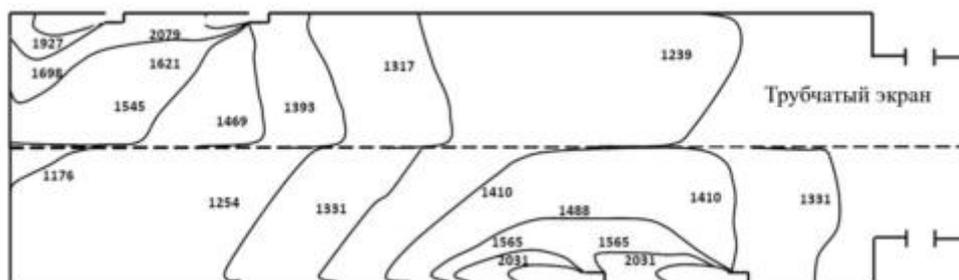


Рис. 2

Рис. 2 приведен с поворотом на 90° , в действительности ось x ориентирована вниз. Высота камеры радиации вдоль оси x уменьшена по сравнению с шириной камеры. В первом варианте область высоких температур расположена в верхней части камеры радиации. При смещении ярусов горелок к полу область высоких температур смещается к полу, и, как следствие, возрастает температура дымовых газов, покидающих камеру радиации. Разность температур в зоне, расположенной около свода, между первым

и шестым вариантами достигает 450 К. Во всех вариантах область высоких температур расположена у боковой стенки и прилегающей к ней области, расположенной выше горелок.

Изолинии функции тока при двух вариантах расположения ярусов горелок (первый и шестой варианты) показаны на рис. 3.

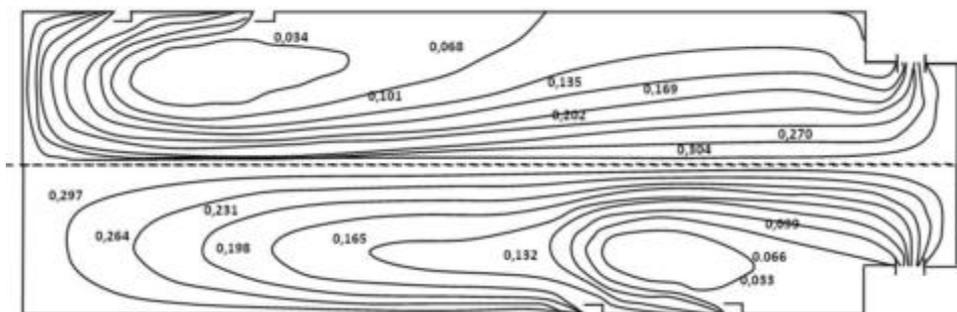


Рис. 3

При смещении ярусов горелок картина течения существенно меняется. В первом варианте зона обратного тока расположена в верхней части камеры радиации и ближе к поверхности нагрева. В этом случае поверхность нагрева по длине реакционных труб омывается более горячими продуктами сгорания от факелов по ходу прямого тока. При смещении ярусов горелок в сторону пода зона обратных токов перемещается к поду.

Рис. 4 иллюстрирует распределение поверхностных плотностей суммарных (лучистых и конвективных) тепловых потоков q при всех шести вариантах (номер кривой соответствует номеру варианта) расположения ярусов веерных горелок. В первом варианте максимум в распределении q находится на расстоянии 1 м от свода. В каждом следующем варианте максимум в распределении q смещается от свода примерно на 1 м, при этом распределение q становится более равномерным.

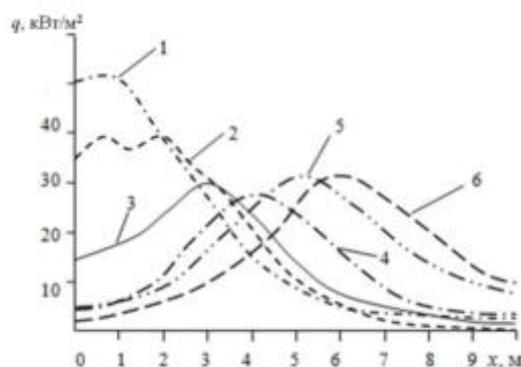


Рис. 4

Таким образом, согласно результатам исследования расположение ярусов веерных горелок значительно влияет на тепловые и аэродинамические характеристики трубчатых печей коробчатого типа. При смещении ярусов горелок значительно меняется поле температур в топочной камере, что, в свою очередь, влияет на распределение плотностей тепловых потоков к поверхности нагрева. При смещении ярусов горелок существенно меняется картина течения. Изменяются размеры зоны обратных токов, область ее расположения, поле скоростей.

Полученные результаты можно использовать при проектировании и реконструкции трубчатых печей рассмотренного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садыков А.В., Вафин Д.Б. Сложный теплообмен в камерах радиации трубчатых печей. Казань: Школа, 2019. 186 с.

2. Гориславец С.П. Пиролиз углеводородного сырья. Киев: Наукова думка, 1977. 305 с.
3. Антонов В.И., Здорова Л.И. Определение обобщенных угловых коэффициентов с учетом селективности поглощения среды // Инженерно-физический журнал. 1986. № 1. С. 98–104.
4. Садыков А.В. К расчету лучистых тепловых потоков в прямоугольных областях методом дискретных ординат // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 3–4. С. 13–21.
5. Садыков А.В. Неравномерности распределений температуры топочных газов по глубине трубчатой печи // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2023. № 4. С. 13–17.
6. Truelove J.S. Discrete-Ordinate Solutions of the Radiation Transport Equation // Journal of Heat Transfer. 1987. Vol. 109. № 4. P. 1048–1051.
7. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива. М.: Недра, 1987. 336 с.

Поступила в редколлегию 1.12.25

INFLUENCE OF STRUCTURAL PARAMETERS ON THERMAL AND AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF TUBE FURNACE

A.V. Sadykov

The influence of arrangement of fan burner tiers on thermal and aerodynamic characteristics of box-type tube furnace is investigated. The complex heat exchange in the furnace is modeled by two-dimensional differential equations of energy, radiation transfer, motion, continuity, k - ε -turbulence models, a two-step model of methane combustion. Radiant heat exchange is considered within S_4 -approach the discrete ordinate method taking into account the selectivity of flue gas emission.

Keywords: radiation, heat transfer, tube furnace, burning, temperature, flue gases.

Садыков Айдар Вагизович – д-р техн. наук (КГАСУ, Казань)

E-mail: sadykov_av@mail.ru

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ УГЛЕРОДНЫХ ПЕН, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ

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

Проведены комплексные исследования структуры, теплофизических и физико-механических свойств углеродных пен, полученных с использованием смеси различных исходных компонентов, подвергнутых последовательной многоступенчатой высокотемпературной термической обработке. Обобщена информация о формируемой структуре и эксплуатационных свойствах углеродных пен, показаны возможные области их практического применения.

Ключевые слова: фенолоформальдегидная смола, пеки, микросферы, летучий порообразователь, углеродные пены, технологии получения, термическая обработка, структура, свойства, применение.

Углеродные материалы, в том числе углеродные пены, в настоящее время широко используются во многих отраслях промышленности для создания ответственных изделий конструкционного и различного функционального назначения. Уникальное сочетание свойств данного класса материалов обуславливает их востребованность в авиакосмической технике, металлургии, энергетике, машиностроении, а также при изготовлении химических источников тока и топливных элементов, различных адсорбентов, медицинских изделий и т. п. [1, 2].

Исследования, направленные на разработку технологий синтеза, анализ структуры, а также изучение физико-механических, теплофизических и иных эксплуатационных свойств углеродных пен, полученных различными методами [3–7], продемонстрировали зависимость формирования их структуры от природы и соотношения исходных компонентов, параметров режима смешивания и условий высокотемпературной обработки композиций. В данных работах рассматривались технологии формования, структура и свойства теплоизолирующих пен, полученных с использованием фенолоформальдегидной смолы и углеродных микросфер; технологии формования и свойства теплопроводных пен, полученных карбонизацией пеков под давлением и с использованием летучего порообразователя.

Для комплексной оценки структуры и эксплуатационных свойств углеродных пен были проведены комплексные экспериментальные исследования, методики определения которых подробно описаны в работах [3, 4]. В таблице представлены результаты исследований структуры, физико-механических и теплофизических свойств углеродных пен, полученных с использованием пеков и углеродных микросфер, карбонизацией пеков под давлением, карбонизацией пеков в присутствии летучего порообразователя, с использованием фенолоформальдегидной смолы и углеродных микросфер.

Приведем снимки структуры пен, полученные с использованием сканирующей электронной микроскопии. Пена (рис. 1), полученная с использованием пека и углеродных микросфер, состоит из микросфер с отверстиями или частично разрушенных за счет выхода летучих веществ в процессе карбонизации. Микросферы связаны прослойками связующего (конечного продукта карбонизации пеков).

Структура углеродной пены, полученной карбонизацией пека под давлением, отличается уменьшенным содержанием пустот, что может быть связано с большим содержанием углерода в пеке по сравнению с фенолоформальдегидной смолой. Прослойки полимерного связующего заметно текстурированы, что указывает на существенную графитацию связующего с формированием графита струйчатой структуры (рис. 2).

Характеристики	Пены на основе пеков и микросфер	Пены, полученные карбонизацией пеков	Пены, полученные с преобразователем	Пены на основе фенолоформальдегидной смолы и микросфер
Плотность, г/см ³	0,25–0,67	0,88–1,08	0,21–0,39	0,07–0,80
Пористость, %	69,5–89	51–60	82–91	64–99
Средний размер ячеек, мкм	150–300	250–300	15–20	150–300
Содержание углерода, мас. %	99,1	99,8	99,4	99,2
Прочность при сжатии, МПа	5,2–23	26–33	5,4–12,6	5,2–23
Твердость по Бринеллю, НВ	9–12	7,7–8,5	6,5–8,5	14–21
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	10–50	139,5–162,0	108–172	0,015–2,6
Устойчивость в инертной среде, °С	2790–2860	>2900	2820–2880	2750–2890
Устойчивость на воздухе, °С	600–720	680–810	615–655	620–710

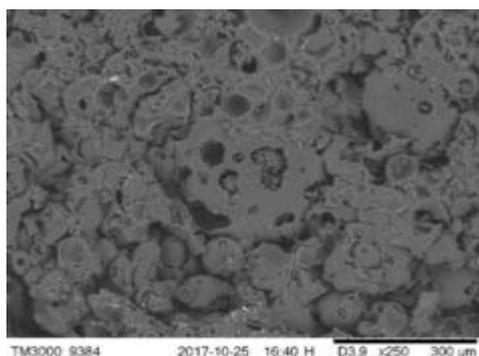


Рис. 1

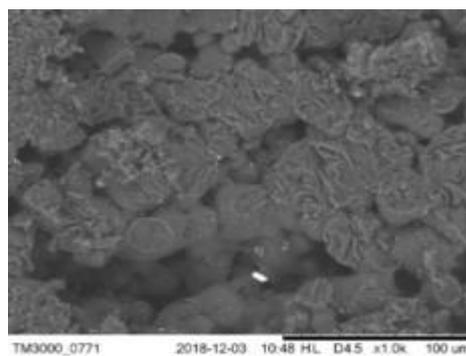


Рис. 2

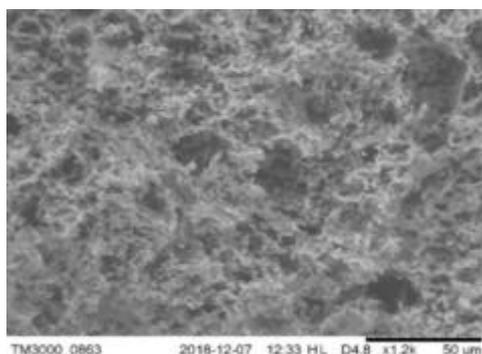


Рис. 3

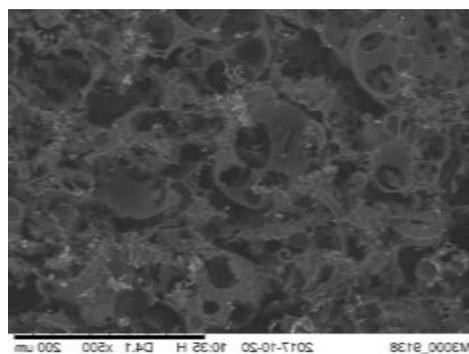


Рис. 4

Образец пены (рис. 3), полученный в присутствии порообразователя с точки зрения микроструктуры представляет собой высокопористый графит с высокой степенью кристаллического совершенства. Кристаллиты размером до нескольких микрометров четко проявляются на снимках образцов, полученных с использованием электронного микроскопа, текстурированность на макроуровне явно не выражена, что, по-видимому, связано с резким выходом порообразователя. Макропоры размером порядка 10 мкм имеют вид каналов, что обусловлено особенностями испарения порообразователя.

Основу углеродной пены, полученной с использованием фенолоформальдегидной смолы и углеродных микросфер, составляют микросферы с отверстиями или частично разрушенные (рис. 4), вероятно, за счет выхода летучих соединений в процессе карбонизации. Микросферы связаны прослойками полимерного связующего в виде кокса терморезактивной смолы. Пена характеризуется изотропной структурой, текстурированность не выражена.

Результаты данной работы в совокупности с результатами, полученными в работах [3–7], позволяют сделать заключение, что каждая из описанных четырех групп углеродных пен имеет свою специфическую структуру.

Пены, полученные на основе каменноугольных или нефтяных пеков и углеродных микросфер, отличаются тем, что связующее в них имеет явно выраженную графитоподобную слоистую текстуру.

Пены, полученные карбонизацией пеков под давлением, характеризуются высокой пористостью и степенью графитации, а также развитой системой щелевидных микро- и мезопор, при этом графитовые стенки пор четко текстурированы, что обеспечивает высокий уровень теплофизических свойств. Макропоры представляют собой каналы круглого или эллиптического сечения вследствие особенностей выхода порообразователя.

Пены, полученные карбонизацией пека в присутствии летучего порообразователя, характеризуются сферической формой ячеек и малым разбросом их по размерам, причем использование в качестве исходных компонентов специальных мезофазных пеков с добавлением мезофазных микросфер обеспечивает увеличение уровня совершенства графитовой структуры и эксплуатационных свойств.

Пены, полученные на основе фенолоформальдегидной смолы и углеродных микросфер, подобны известным открыто-ячеистым полимерным пенам и состоят практически полностью из изотропного углерода.

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать вывод о возможных и перспективных областях практического применения пен различной группы.

Пены, полученные с использованием углеродных микросфер и каменноугольных или нефтяных пеков, характеризуются средними значениями коэффициента теплопроводности (10–50 Вт/м·К), поэтому они могут быть использованы для изготовления радиаторов пассивного охлаждения или экранов электромагнитного излучения.

Пены, полученные карбонизацией каменноугольных или нефтяных пеков под давлением, отличаются сравнительно высокими значениями физико-механических свойств и коэффициента теплопроводности, что обеспечивает возможность их практического использования в производстве электродов и компонентов изделий авиакосмической техники.

В отсутствие жестких требований к физико-механическим свойствам в качестве альтернативного варианта могут быть рекомендованы теплопроводные углеродные пены, полученные карбонизацией с использованием летучего порообразователя, характеризующиеся повышенными значениями коэффициента теплопроводности.

Если в процессе эксплуатации изделия или конструкции требуется низкий коэффициент теплопроводности и допустимы относительно невысокие физико-механические свойства, предпочтительным является использование теплоизолирующих углеродных пен на основе фенолоформальдегидных смол и углеродных микросфер.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что каждая из перечисленных групп пен может быть рекомендована для практического применения с учетом формирующейся в технологическом процессе их получения структуры и эксплуатационных свойств. Возможность и эффективность применения углеродных пен, особенно в высокотехнологических отраслях промышленности (авиационная, ракетно-космическая и др.), обусловлена тем, что они характеризуются повышенными теплозащитными или теплопроводными свойствами, малыми температурными напряжениями и деформациями, способны поглощать энергию взрыва, другие механические нагрузки в сочетании с низкой плотностью и высокой химической инертностью. Кроме того, подобные материалы пенистой структуры позволяют эффективно экранировать объекты, приборы, аппаратуру от воздействия электромагнитного излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колокольцев С.Н. Углеродные материалы. Свойства, технологии, применения. Долгопрудный: ИД Интеллект, 2012. 296 с.
2. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.: Химия, 1975. С. 11–15.
3. Галимов Э.Р. и др. Синтактические углеродные пены: получение, структура, свойства, применение. Казань: Изд-во АН РТ, 2022. 324 с.

4. Галимов Э.Р., Шарафутдинова Э.Э., Галимова Н.Я. Технология получения и физико-механические свойства углеродных пен на основе пека и легучего порообразователя // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2025. № 1. С. 48–51.
5. Галимов Э.Р., Шарафутдинова Э.Э., Галимова Н.Я. Исследование физико-механических свойств теплоизолирующих углеродных пен // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2025. № 1. С. 45–47.
6. Галимов Э.Р., Шарафутдинова Э.Э., Галимова Н.Я. Структура и теплофизические свойства углеродных пен, полученных карбонизацией пека в присутствии порообразователя // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2025. № 2. С. 28–30.
7. Галимов Э.Р., Шарафутдинова Э.Э., Галимова Н.Я. Разработка технологии получения углеродных пен карбонизацией пеков под давлением // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2025. № 2. С. 23–27.

Поступила в редколлегию 13.11.25

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE STRUCTURE AND PERFORMANCE PROPERTIES OF CARBON FOAM OBTAINED BY VARIOUS METHODS

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

Comprehensive studies were conducted on the structure, thermophysical and physical-mechanical properties of carbon foams obtained using a mixture of various initial components subjected to sequential multi-stage high-temperature heat treatment. Information on the formed structure and operational properties of carbon foams is summarized, and possible areas of their practical application are shown.

Keywords: phenol-formaldehyde resin, pitches, microspheres, volatile blowing agent, carbon foams, production technologies, heat treatment, structure, properties, application.

Галимов Энгель Рафикович – д-р 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

Галимова Назиря Яхиевна – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: kstu-material@mail.ru

Кузьмина Ирина Александровна – канд. физ.- мат. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: iranina@mail.ru

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ

Р.Г. Рахматуллина, А.Р. Маскова, А.И. Гарайшин

Проведены исследования зависимости магнитных характеристик легированной стали от температуры отпуска. По результатам измерений построены зависимости коэрцитивной силы, твердости и магнитной проницаемости от температуры отпуска. Показано, что изменения коэрцитивной силы и магнитной проницаемости в процессе термической обработки могут быть использованы для контроля качества термической обработки исследуемой стали.

Ключевые слова: коэрцитивная сила, твердость, магнитная проницаемость, термическая обработка, сталь.

Одной из важнейших проблем в промышленной области является создание научных основ для совершенствования технологий получения качественных сталей. Изготовление и применение новой техники, оборудования и технологических комплексов требует качественных материалов, которые должны работать при повышенном давлении и жестких температурных режимах [1].

Актуальность повышения эксплуатационных характеристик стальных изделий, в частности, их прочностных свойств и износостойкости, обуславливает необходимость разработки инновационных технологических процессов и совершенствования методов контроля качества. Все более широко применяются электромагнитные методы контроля с высокой производительностью и точностью измерений.

Легированная сталь характеризуется улучшенными свойствами, отсутствующими у углеродистой стали, и при этом лишена ее недостатков [2]. Применение легированной стали повышает долговечность изделий, экономит металл, увеличивает производительность, упрощает проектирование, в связи с чем в прогрессивной технике приобретает определяющее значение. Легированные стали широко применяют в тракторном и сельскохозяйственном машиностроении, автомобильной промышленности, тяжелом и транспортном машиностроении, в меньшей степени в станкостроении, инструментальной и других видах промышленности [3–5].

Экспериментальное исследование физических свойств различных классов сталей необходимо как при изучении структурных превращений, так и для установления определенных связей между прочностными и физическими параметрами, что является основой неразрушающего контроля.

Целью предлагаемой работы является исследование зависимости коэрцитивной силы, магнитной проницаемости и твердости от температуры отпуска для стали 3Х13.

Измерение магнитной проницаемости образцов проводилось в переменном магнитном поле при частоте 50 Гц. Измерительная установка состоит из двух катушек. В каждой катушке две обмотки – намагничивающая и измерительная. Намагничивающая обмотка содержит ω_1 витков, измерительная обмотка с числом витков ω_2 предназначена для измерения величины магнитной индукции. Длина катушки – 60 мм, внутри каркаса – гнездо для установки образца [6–8]. Размеры образцов – 2,5×2,5×50 мм. В одну катушку помещался эталон, в другую – исследуемые образцы. Образцы подвергались различному по продолжительности изотермическому отпуску. Коэрцитивную силу исследуемых образцов измеряли на магнитометрической установке.

Отпуск эффективно увеличивает долговечность материала. Кроме того, отпуск снижает твердость стали, при этом увеличивая ее пластичность и вязкость. Это делает сталь менее подверженной хрупкому разрушению при ударных нагрузках.

Рассмотрим процесс отпуска сталей.

После закалки формируется структура стали, состоящая состоит из мартенсита и небольшого количества аустенита. Далее происходит распад мартенсита и увеличение роста частиц, в результате чего получают сорбитную структуру.

Проиллюстрируем изменение твердости (рис. 1) и коэрцитивной силы (рис. 2) в зависимости от температуры отпуска сталей 3Х13.

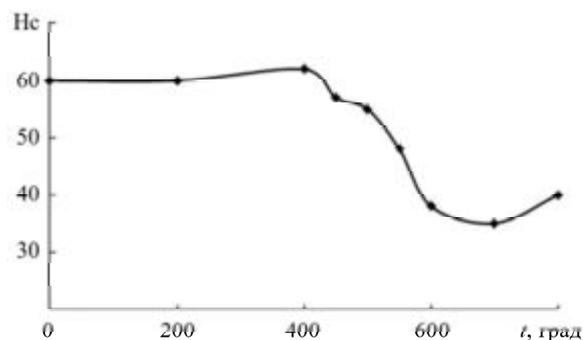


Рис. 1

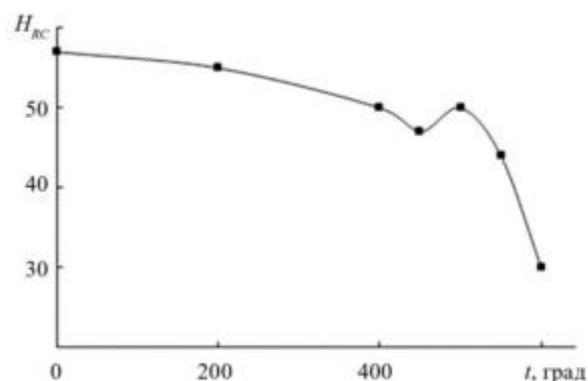


Рис. 2

Как видно из графиков (см. рис. 1, 2), твердость и коэрцитивная сила для стали 3Х13 до температуры отпуска 400 °С изменяются незначительно. При отпуске стали снижение твердости будет определяться обеднением мартенсита углеродом. Структура стали после закалки состоит из мартенсита и небольшого количества аустенита. При отпуске до 200 °С происходит обеднение мартенсита углеродом. При отпуске до 400 °С наряду с переходом аустенита в мартенсит идет дальнейший распад мартенсита [9–12]. При температуре около 500 °С наблюдается небольшое увеличение твердости. При дальнейшем увеличении температуры отпуска после 500 °С наблюдается уменьшение твердости и коэрцитивной силы. В свою очередь, резкое уменьшение твердости и коэрцитивной силы приводит к росту магнитной проницаемости μ (рис. 3).

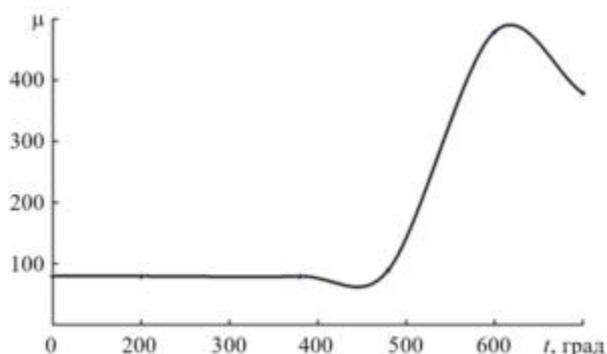


Рис. 3

На рис. 4 приведена зависимость коэрцитивной силы от твердости, демонстрирующая линейную связь между коэрцитивной силой и твердостью [13, 14].

Анализ магнитных характеристик показывает протекание основных фазовых превращений, за которыми следует изменение степени упорядоченности структуры и незначительное изменение дисперсности структурных составляющих. Полученные зависимости магнитной проницаемости и коэрцитивной силы 3Х13 также позволяют более детально проанализировать кинетику процессов, происходящих при термической обработке.

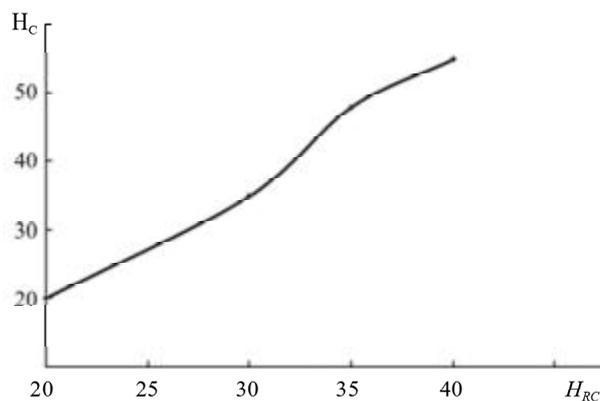


Рис. 4

Изменение коэрцитивной силы и магнитной проницаемости при термической обработке стали 3X13 позволяет осуществлять контроль качества термической обработки данной стали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубева И.Л. и др. Тепловое излучение металлов и сплавов на их основе // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2020. № 2. С. 18–20.
2. Ганиев И.Н. и др. Теплофизические и термодинамические свойства сплавов системы Al – Bi // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2020. № 3. С. 23–29.
3. Фан К.М. и др. Фазовое поведение бинарных систем, включающих основные компоненты молибденсодержащего водного стока «Нижнекамскнефтехим» (Нижнекамск) и потенциальный экстрагент, используемый в сверхкритическом флюидном состоянии // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2022. № 1. С. 31–37.
4. Рахматуллина Р.Г., Маскова А.Р., Гарайшин А.И. Механизм фазовых превращений в процессе термической обработки сталей // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2023. № 4. С. 10–12.
5. Смирнов М.А., Счастливцев В.М., Журавлев Л.Г. Основы термической обработки стали. М.: Наука и технологии, 2002. 519 с.
6. Смирнов М.А. и др. Материаловедение. Челябинск: ЮУрГУ, 2005. Ч. 1. 140 с.
7. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. М.: Альянс, 2009. 528 с.
8. Рахматуллина Р.Г., Гарайшин А.И., Маскова А.Р. Экспериментальное определение показателя теплообмена – теплопроводности – для фторсодержащих полимеров // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2022. № 1. С. 27–30.
9. Счастливцев В.М., Калетина Ю.В., Фокина Е.А. Мартенситное превращение в магнитном поле. Екатеринбург: НИСО УрО РАН, 2007. 322 с.
10. Остроух А.В., Суркова Н.Е. Электронные образовательные ресурсы в профессиональном образовании. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 184 с.
11. Балькаев Д.А., Ларионов И.С., Амирова М.М. Увеличение прочности полипропиленовых стеклопластиков введением модификатора матрицы // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2021. № 4. С. 28–32.
12. Горунев А.И., Нюхляев О.А., Гильмутдинов А.Х. Особенности формирования структуры сварных швов в процессе лазерно-акустической сварки нержавеющей сталей // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2022. № 1. С. 57–60.
13. Садыков Х.С. Влияние компонентного состава на теплопроводность и теплоемкость авиационных сплавов ферросиликоалюминия // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2023. № 4. С. 18–23.
14. Абдуллина В.Х. и др. Исследование качества металла парового сопла, разрушенного в эксплуатации // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2023. № 3. С. 28–32.

Поступила в редколлегию 20.12.25

STUDY OF THE MAGNETIC PROPERTIES OF STEEL

R.G. Rakhmatullina, A.R. Maskova, and A.I. Garaishin

The dependence of the magnetic properties of alloy steel on tempering temperature was studied. Based on the measurement results, dependences of coercivity, hardness, and magnetic permeability

on tempering temperature were plotted. It was shown that changes in coercivity and magnetic permeability during heat treatment can be used to monitor the quality of the heat treatment of the steel under study.

Keywords: coercive force, hardness, magnetic permeability, heat treatment, steel.

Рахматуллина Резида Гайфулловна – канд. физ.-мат. наук (Казанский ГАУ, Казань)
E-mail: rachmatrg@mail.ru

Маскова Альбина Рафитовна – канд. техн. наук (УГНТУ, Уфа)
E-mail: asunasf@mail.ru

Гарайшин Айгиз Ильмирович – аспирант (УГНТУ, Уфа)
E-mail: Aigiz-garaishin@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПРОДУКТОВ ИЗНОСА И МЕТАЛЛОВ ПРИСАДОК В МОТОРНЫХ МАСЛАХ

А.К. Субаева, М.М. Замальдинов, А.А. Глущенко,
И.Р. Салахутдинов, И.И. Айнуллин

Приводятся результаты исследования продуктов износа в двигателях внутреннего сгорания. Предложена конструкция магнитного очистителя моторного масла. Экспериментально установлено, что разработанное устройство обеспечивает эффективное удаление ферромагнитных частиц, образующихся при изнашивании деталей машин, а воздействие электрического поля способствует частичному обезвоживанию масла.

Ключевые слова: отработанное моторное масло, продукты износа, количество импульсов, гравитационное отстаивание, выпаривание, магнитная очистка.

Значительный парк автомобилей, тракторов и сельскохозяйственных машин, эксплуатируемых в аграрном секторе, обуславливает постоянно возрастающую потребность в высококачественных топливно-смазочных материалах, соответствующих международным стандартам [1–3].

В процессе работы в двигателе моторное масло претерпевает ряд изменений, которые обусловлены тремя основными факторами – поступлением в масло продуктов износа деталей двигателя, накоплением в масле продуктов окисления и разложения углеводородов, попаданием и накоплением в масле примесей из окружающей среды. Это приводит к старению масла, потере его основных эксплуатационных свойств, выбраковке и отправке на очистку и восстановление.

В процессе технического обслуживания и ремонта двигателей при сливе масла сельскохозяйственные предприятия располагают возможностью организованного сбора и передачи отработанных масел на очистку в объемах, установленных действующими нормативами сбора.

Как показал проведенный анализ, увеличение объемной доли продуктов износа деталей машин и сработанных присадок в масле, а также рост их размеров приводит к интенсификации изнашивания в зонах сопряжения деталей двигателя [4–6].

Определение содержания продуктов износа и металлов присадок предлагается провести с использованием прибора бездифракционного анализатора рентгеновского спектрального БАРС-3.

Для подготовки проб масел к анализу с целью определения содержания примесей по каналу Fe исследуемое масло наносили на фильтрующий элемент, для которого предварительно регистрировали значение количества выдаваемых импульсов (количество импульсов фона).

Образец наносили на фильтр «Красная лента» диаметром 30 мм. Затем фильтр с пробой помещали в сушильный шкаф и при температуре 115 °С оставляли на 30 мин для высушивания примесей. После этого фильтр с пробой помещали в прибор и снимали импульсы пробы масла. Количество импульсов нерастворимых примесей по каналу Fe рассчитывали по формуле

$$C_{\text{пр}} = C_{\text{об}} - C_{\text{ф}},$$

где $C_{\text{пр}}$ – количество импульсов нерастворимых примесей; $C_{\text{об}}$ – количество импульсов пробы масла; $C_{\text{ф}}$ – количество импульсов фильтра.

Образцы масел, в которых ранее было определено содержание продуктов износа, наносились на фильтры с предварительно зарегистрированными исходными значениями импульсов, после чего проводилось измерение количества импульсов (табл. 1).

Данные по результатам исследований проб масел на количество импульсов по каналу Fe представлены в табл. 2.

Таким образом, установлено, что определенному содержанию примесей соответствует определенное количество импульсов, которое тем выше, чем больше содержится железа в масле.

По полученным данным построен график зависимости импульсов от содержания железа в масле с линией тренда (рис. 1).

Таблица 1

Номер пробы	Среднее содержание железа в масле		Пробег, км
	Массовое содержание в двигателе, г	Массовое содержание в трансмиссии, г	
1	0,001	0,003	0
2	0,002	0,050	3267
3	0,006	0,151	6720
4	0,014	0,352	10012
5	0,028	0,705	13822
6	0,039	0,982	16108
7	0,054	1,360	19016
8	0,072	1,814	22873
9	0,081	2,041	29604

Таблица 2

Номер фильтра	Количество импульсов		
	фильтра	осадка на фильтре	осадка по каналу Fe
1	350	360	10
2	357	369	12
3	332	345	13
4	338	359	21
5	332	372	40
6	326	371	45
7	328	415	87
8	341	440	99
9	334	452	118

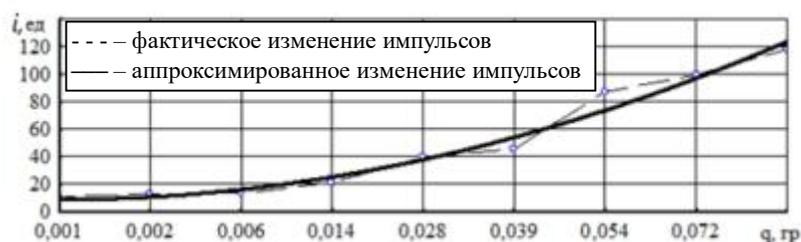


Рис. 1

Величина достоверности аппроксимации по коэффициенту корреляции составляет $R^2 = 0,9511$.

На основании данных исследования проб масел по количеству импульсов и определения содержания продуктов износа по железу построен график зависимости содержания железа от пробега автомобилей (рис. 2).

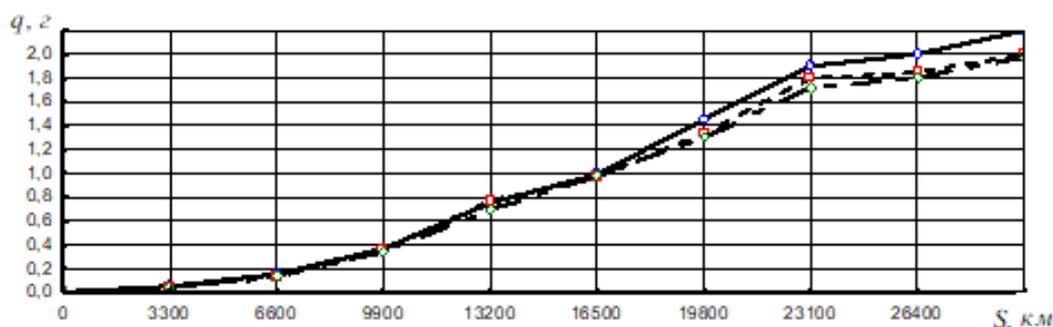


Рис. 2

График (см. рис. 2) зависимости количества импульсов от массового содержания железа по каналу Fe позволяет определять содержание продуктов износа в отработанном масле.

Таким образом, с учетом состояния отработанных масел по содержанию продуктов износа может быть обоснован выбор соответствующего метода их очистки.

Выбор того или иного способа очистки и восстановления масла должен осуществляться прежде всего с учетом его технико-экономической обоснованности [7–10].

Загрязняющие примеси масла вызывают повышенный износ деталей, засоряют масляные каналы и фильтры, увеличивают температурный режим деталей цилиндропоршневой группы, из-за них возникают другие негативные явления, которые снижают надежность и долговечность работы двигателя.

В связи с этим для очистки продуктов износа деталей двигателя и сработавших компонентов присадок предлагается применить магнитный очиститель.

Магнитную очистку предлагается применять в комплексе с гравитационным отстаиванием и выпариванием.

Результаты проведенных исследований очистки отработанного моторного масла приведены в табл. 3.

Таблица 3

Ступени очистки	Показатели			
	Содержание продуктов износа, г	Содержание воды, %	Кинематическая вязкость, мм ² /с	Температура вспышки, °С
Отработанное моторное масло	0,97	0,3	16,2	182
Гравитационное отстаивание	0,92	0,2	16,6	186
Выпаривание	0,54	Отсутствует	14,3	205
Магнитная очистка	0,032		14,8	207
Товарное масло SAE 10W-40	0,015		15,1	234

При гравитационном отстаивании отработанного масла происходит снижение продуктов износа деталей машин с 0,97 г до 0,92 г. Содержание воды снизилось с 0,3 до 0,2 %. Кинематическая вязкость отработанного моторного масла незначительно повысилась с 16,2 до 16,6 мм²/с. Температура вспышки повысилась со 182 до 186 °С.

При выпаривании содержание продуктов износа снизилось с 0,92 г до 0,54 г, вода отсутствует, кинематическая вязкость понизилась с 16,6 до 14,3 мм²/с, температура вспышки повысилась со 186 до 205 °С.

После магнитной очистки содержание продуктов износа деталей машин снизилось с 0,54 до 0,032 г. Кинематическая вязкость масла составила 14,8 мм²/с. Температура вспышки повысилась до 207 °С.

Проведенные исследования по определению содержания в масле продуктов износа деталей машин и сработанных компонентов присадок показали, что по сравнению с показателями товарного масла и образцами после магнитной очистки можно сделать вывод об эффективности предложенного магнитного очистителя, обеспечивающего удаление ферромагнитных частиц, образующихся в результате износа деталей. При этом под воздействием электрического поля может происходить частичное удаление влаги из масла.

Предлагаемая система очистки позволяет производить очистку отработанного моторного масла с необходимой степенью чистоты для использования в среднефорсированных двигателях внутреннего сгорания при умеренных нагрузках, в гидравлических системах машин, коробках передач и трансмиссиях тракторов и автомобилей при умеренных нагрузках, в ходовой части гусеничных тракторов, а также при консервации техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Субаева А.К. и др.* Современные методы контроля качества масел // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2024. № 2. С. 16–20.
2. *Замальдинов М.М., Яковлев С.А., Шленкин А.К.* Результаты исследований противоизносных свойств частично восстановленных минеральных масел // Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы 9-й Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 75-летию Ульяновского государственного аграрного университета имени П.А. Столыпина, г. Ульяновск, 20–21 июня 2018. Ульяновск: УлГАУ, 2018. С. 154–158.
3. *Замальдинов М.М., Глуценко А.А.* Технологический процесс компаундирования очищенных отработанных моторных минеральных масел // Аграрная наука и образование на современном этапе разви-

- тия: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы 7-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Ульяновск, 4–5 февр. 2016. Ульяновск: УлГАУ, 2016. С. 41–46.
4. *Молочников Д.Е. и др.* Природа и механизм действия депрессорных присадок к дизельным топливам // *Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы 11-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Ульяновск, 23–24 июня 2021.* Ульяновск: УлГАУ, 2021. С. 113–119.
 5. *Замальдинов М.М. и др.* Экспресс-метод компаундирования минеральными добавками // *Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы 11-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Ульяновск, 23–24 июня 2021.* Ульяновск: УлГАУ, 2021. С. 26–33.
 6. *Яковлев С.А. и др.* Влияние повышенных температур на упрочненные электромеханической обработкой структуры титанового сплава ВТ22 // *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2020. № 8 (188). С. 376–379.
 7. *Салахутдинов И.Р. и др.* О возможности оценки технического состояния двигателя по величине ЭДС в парах трения // *Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы 10-й Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т., г. Ульяновск, 23 июня 2020.* Ульяновск: УлГАУ, 2020. Т. 2. С. 252–255.
 8. *Салахутдинов И.Р. и др.* Способы и методы измерения ЭДС // *Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы 10-й Междунар. науч.-практ. конф., в 2 т., г. Ульяновск, 23 июня 2020.* Ульяновск: УлГАУ, 2020. Т. 2. С. 256–261.
 9. *Замальдинов М.М. и др.* Производственные испытания очищенных масел в автотракторных трансмиссиях // *Аграрная наука и образование на современном этапе развития: Материалы 13-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Ульяновск, 23 июня 2023.* Ульяновск: УлГАУ, 2023. С. 538–546.
 10. *Субаева А.К. и др.* Технологический способ напыления электроизолирующего покрытия на внешнюю стенку гильзы цилиндров // *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева.* 2025. № 2. С. 41–44.

Поступила в редколлегию 12.11.25

RESEARCH OF THE CONTENT OF WEAR PRODUCTS AND ADDITIVE METALS IN MOTOR OILS

**A.K. Subaeva, M.M. Zamaldinov, A.A. Glushchenko,
I.R. Salakhutdinov, and I.I. Ainullin**

The results of the study of wear products in internal combustion engines are presented. The design of a magnetic motor oil cleaner is proposed. It has been experimentally established that the developed device effectively removes ferromagnetic particles that are formed during the wear of machine parts, and the influence of an electric field contributes to the partial dehydration of oil.

Keywords: waste engine oil, wear products, number of pulses, gravitational settling, evaporation, magnetic cleaning.

Субаева Асия Камилевна – д-р экон. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: subaeva.ak@mail.ru

Замальдинов Марат Миндехатович – канд. техн. наук (Ульяновский ГАУ, Ульяновск)

E-mail: zamaldinov.marat@mail.ru

Глушченко Андрей Анатольевич – канд. техн. наук (Ульяновский ГУ, Ульяновск)

E-mail: oildel@yandex.ru

Салахутдинов Ильмас Рифкатович – канд. техн. наук (Ульяновский ГАУ, Ульяновск)

E-mail: ilmas.73@mail.ru

Айнуллин Ильсур Ильнарлович – магистрант (Ульяновский ГАУ, Ульяновск)

E-mail: rasim.aynullin@mail.ru

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЦЕЛЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИЯ SLA-ПЕЧАТЬЮ

Л.Н. Шафигуллин, А.Т. Габдрахманов, Д.А. Башмаков,
А.Т. Галиакбаров, Н.В. Романова

Приводится обоснование выбора целевых изделий для изготовления фотополимерной печатью. Представлены метрологические данные, калькуляция затрат на изготовление 3D-макетов сепараторов подшипников и кронштейна сенсора по технологии SLA-печати. Даны рекомендации по применению SLA-печати в промышленном секторе.

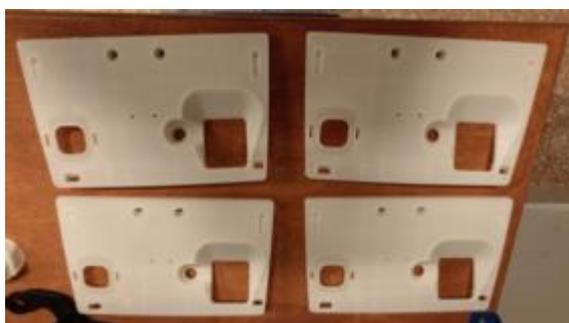
Ключевые слова: SLA-печать, сепаратор подшипников, кронштейн сенсора, метрологические измерения, рекомендации по применению.

Метод стереолитографии (SLA) является одним из методов 3D-печати, который использует светочувствительную смолу для создания объектов посредством полимеризации слоя за слоем [1–11]. Целевыми изделиями, для изготовления которых используется метод SLA, являются модели с высокой детализацией, ювелирные изделия и протезы, прототипы функциональных деталей, микромоделирование. Общим обоснованием выбора SLA-печати для указанных целевых изделий является ее способность достичь высокого разрешения, точности и качества поверхности. SLA-печать предоставляет возможность создания сложных и подробных моделей, в связи с чем предпочтительно ее использование для требовательных приложений, где важны детализация и точность. На основе анализа мирового опыта использования SLA-печати в качестве объектов для автомобильной промышленности выбраны модели с высокой детализацией и прототипы функциональных деталей [12, 13].

Для ПАО «КамАЗ» (Набережные Челны) согласно техническом заданию требовалось изготовить деталь «кронштейн сенсора MRV-21» и «сепаратор 537923E.46 подшипника 6У-537923EM» в соответствии с 3D-моделями с точностью изготовления 0,1 мм. К материалам предъявлялись следующие требования: плотность 1,1–1,4 г/см³; твердость по Шору D 85–90; прочность на изгиб 70–90 МПа; компрессионная прочность 80–90 МПа; температурная деформация 70–80 °С; коэффициент теплового расширения 50–55 10⁻⁶ К⁻¹.

В качестве метода изготовления выбрана SLA-печать деталей. Материал для печатания деталей – фотополимерная смола CHR9600W-A, оборудование для печати – стереолитографический 3D-принтер СНPro600HD (ChanHonTech, КНР).

Внешний вид изготовленных 3D-печатью деталей представлен на рис. 1: *а* – кронштейн сенсора MRV-21; *б* – сепаратор 537923E.46 подшипника 6У-537923EM.



а



б

Рис. 1

Характеристики материала, применяемого для печати, представлены в табл. 1.

Физико-механические свойства фотополимерной смолы обеспечивают требования, предъявляемые к материалам для изготовления изделий 3D-печатью.

Таблица 1

Наименование параметра	Условия измерения	Значение (при отвержденном состоянии)
В отвержденном состоянии		
Предел прочности на разрыв	ASTM D638	40–58 МПа
Модуль упругости при растяжении	ASTM D638	2599–2715 МПа
Относительное удлинение при разрыве	ASTM D638	7–12 %
Предел прочности при изгибе	ASTM D790	70–74 МПа
Модуль упругости при изгибе	ASTM D790	2682–2776 МПа
Ударная прочность	ASTM D256	30–37 Дж/м
Температура деформации	ASTM D 648 @ 66 PSI	55–68 °C
Температура стеклования	DMA, E	60–75 °C
Твердость по Шору	ASTM D2240	77–88
В жидком состоянии		
Вязкость	cps @ 25 °C	405–500
Плотность	ГОСТ 15139-69	1,11–1,15 г/см ³
Цвет	-	белый

Стоимость изготовления четырех деталей «кронштейн сенсора MRV-21» составила 15717 руб., срок изготовления – 24 ч. Стоимость изготовления 20 деталей «сепаратор 537923E.46 подшипника 6У-537923ЕМ» составила 26 485 руб., срок изготовления – 24 ч.

Проведены метрологические измерения 3D-макета детали «сепаратор 537923E.46 подшипника 6У-537923ЕМ» на соответствие требованиям чертежа, проверка собираемости, легкости вращения. В ходе проведенного визуального осмотра образцов «сепаратор 537923E.46 подшипника 6У-537923ЕМ» в окна сепаратора обнаружен облой, образовавшийся при 3D-печати, и следы 3D-печати.

Внешний вид ролика представлен на рис. 2 (стрелками отмечено касание облоя фаски ролика).

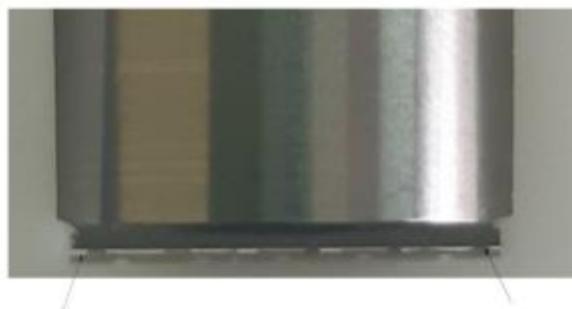


Рис. 2

Результаты измерений образцов «сепаратор 537923E.46 подшипника 6У-537923ЕМ» с допусками по конструкторской документации приведены в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	Наименование параметра	Фактическое значение параметра		Допуск по конструкторской документации
		№ 1	№ 2	
1	Длина окна, мм	39,62–39,75	39,67–39,76	39,9±0,1
2	Наибольшая ширина перемычки, мм	7,63–7,68	7,63–7,65	7,5±0,05
3	Наименьшая ширина перемычки, мм	4,18–4,22	4,15–4,24	4,0±0,05
4	Ширина сепаратор, мм	48,16–48,35	48,11–48,21	47,6±0,1
5	Ширина кольцевой перемычки у малого борта, мм	4,01–4,24	3,96±4,14	3,7±0,1
6	Ширина кольцевой перемычки у большого борта, мм	5,72–5,90	5,76	5,6±0,1
7	Внутренний диаметр большой кольцевой перемычки, мм	168,5	168,6	167,5±0,2
8	Наружный диаметр большой кольцевой перемычки, мм	178,2	178,1	177,7±0,2
9	Диаметр вырубки дна, мм	144,82	144,82–144,92	144±0,2
10	Наружный диаметр малой кольцевой перемычки, мм	155,15–155,30	155,21	154,2±0,2
11	Наибольшая ширина окна, мм	21,03–21,09	21,03–21,13	21,33±0,1

Отмечено плотное прилегание противобазовой фаски ролика к облою в окне сепаратора. Величина облоя – $0,5 \times 1,6$ мм, по конструкторской документации допускаются выступы не более 0,2 мм. С целью оценки собираемости блоков подшипника с представленными сепараторами на испытательной станции КТО НТЦ ПАО «КамАЗ» проведены работы по сборке внутреннего кольца 6У-537923.02 с комплектом тел качения и сепаратором (рис. 3).



Рис. 3

Фактическая величина усилия при сборке составила 90 кг. При проверке органолептическим способом легкость вращения и нерассыпание блока обеспечиваются. По внешнему виду представленных образцов выявлены замечания (облой). В ходе проведения замеров выявлены незначительные отклонения от требований действующей конструкторской документации. Возможно использование предоставленных образцов сепараторов для проведения монтажных испытаний и проверки собираемости конструкции.

Согласно техническому заданию ПАО «КамАЗ» изготовлены прототипы монополярных пластин топливных водородных элементов (рис. 4). Изготовленные прототипы позволили решить ряд инженерных задач по созданию монополярных пластин топливных водородных элементов.



Рис. 4

Согласно проведенным исследованиям оптимальными целевыми изделиями для изготовления SLA-печатью являются функциональные прототипы, характеризующиеся сложной геометрией и высокими требованиями к точности рабочих поверхностей.

При изготовлении электрических модулей детали, изготовленные SLA-печатью из фотополимерных смол, превосходят по качественным характеристикам (геометрическая точность изготовления, шероховатость поверхности) изделия, изготовленные классической FDM-печатью из высокотемпературных пластиков, также имеют более низкую стоимость печати.

Работа выполнена при поддержке соглашения о предоставлении субсидии федеральному бюджетному или автономному учреждению на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 17 янв. 2025. № 75-03-2025-426.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pham D., Gault R.A.* Comparison of Rapid Prototyping Technologies // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1998. № 38. С. 1257–1287.
2. *Simchi A., Pohl H.* Direct Laser Sintering of Iron–Graphite Powder Mixture // *Materials Science and Engineering*. 2004. № A 2. С. 191–200.
3. *Kruth J.P., van der Schueren B., Morren B.* Basic Powder Metallurgical Aspects in Selective Metal Powder // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 1996. № 1. С. 183–186.
4. *Scott-Emuakpor O. et al.* Bending Fatigue Life Characterisation of Direct Metal Laser Sintering Nickel Alloy 718 // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2015. № 9. С. 1105–1117.
5. *Schmidt M., Pohle D., Rechtenwald T.* Selective Laser Sintering of Peek // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2007. № 56. С. 205–208.
6. *Hon K.K.B., Gill T.J.* Selective Laser Sintering of Sic/Polyamide Composites // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2003. № 1. С. 173–176.
7. *Hopkinson N., Majewski C.E., Zarringhalam H.* Quantifying the Degree of Particle Melt in Selective Laser Sintering // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2009. № 1. С. 197–200.
8. *Yan C.Z. et al.* Preparation and Selective Laser Sintering of Nylon–12–Coated Aluminum Powders // *Journal of Composite Materials*. 2009. № 17. С. 1835–1851.
9. *Gu D., Wang H., Zhang G.* Selective Laser Melting Additive Manufacturing of Ti-Based Nanocomposites: The Role of Nanopowder // *Metallurgical and Materials Transactions*. 2014. № A 1. С. 464–476.
10. *Agarwala M. et al.* Direct Selective Laser Sintering of Metals // *Rapid Prototyping Journal*. 1995. № 1. С. 26–36.
11. *Paesano A.* Polymeric Additive Manufacturing: Present Status and Future Trends of Materials and Processes // *Boeing Technical Journal*. 2016. № 17. P. 1–12.
12. *Саукая З.М.* О развитии аддитивных технологий в России // *Аддитивные технологии*. 2021. № 3. С. 16–20.
13. *Сысоев Е.И. и др.* Проектирование звукопоглощающих сотовых материалов с геометрией трижды периодических поверхностей минимальной энергии (ТППМЭ) // *Акустический журнал*. 2024. № 5. С. 765–777.

Поступила в редколлегию 24.11.25

MANUFACTURING OF TARGET AUTOMOTIVE PRODUCTS USING SLA PRINTING

**L.N. Shafigullin, A.T. Gabdrakhmanov, D.A. Bashmakov,
A.T. Galiakbarov, and N.V. Romanova**

The rationale for selecting target products for production using photopolymer printing is presented. Metrology data and cost calculations for producing 3D models of bearing cages and a sensor bracket using SLA printing technology are presented. Recommendations for the use of SLA printing in the industrial sector are provided.

Keywords: SLA printing, bearing cage, sensor bracket, metrology measurements, application notes.

Шафигуллин Ленар Нургалеевич – канд. техн. наук (Набережночелнинский филиал КФУ, Набережные Челны)
E-mail: misharin_82@mail.ru

Габдрахманов Азат Талгатович – канд. техн. наук (Набережночелнинский филиал КФУ, Набережные Челны)
E-mail: veyron000@mail.ru

Башмаков Дмитрий Александрович – канд. техн. наук (Набережночелнинский филиал КФУ, Набережные Челны)
E-mail: bashmakovda@yandex.ru

Галиакбаров Азат Талгатович – канд. техн. наук (Набережночелнинский филиал
КФУ, Набережные Челны)
E-mail: azatgaliakbarov@yandex.ru

Романова Наталья Владимировна – канд. техн. наук (Набережночелнинский филиал
КФУ, Набережные Челны)
E-mail: romnata@yandex.ru

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ OPL И ПРОГРАММИРУЕМОГО ЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЛЕРА

М.С. Азов, П.Н. Колпаков, В.К. Маркелов, Д.Е. Чикрин,
Д.В. Ямщиков

Рассматривается методика построения цифрового двойника промышленного робота-манипулятора на основе офлайн-программирования, промышленного программируемого логического контроллера и нативного программного обеспечения робота. Сравняются данный подход и ROS-ориентированные архитектуры, различающиеся по уровню гибкости и требованиям к квалификации специалистов. Реализация методики выполнена на примере коллаборативного робота REDS 20 в связке со станком DV-1266 и периферийным оборудованием. Показана возможность корректировки траекторий с использованием внешней камеры и передачи данных через TCP/IP. Полученные результаты подтверждают применимость подхода для сокращения времени наладки и повышения надежности робототехнических комплексов.

Ключевые слова: цифровой двойник, офлайн-программирование, программируемый логический контроллер, роботы манипуляторы, машинное зрение.

Введение

Развитие концепции Индустрии 4.0 сопровождается стремительным внедрением цифровых двойников, которые рассматриваются как ключевой инструмент повышения гибкости и надежности производственных систем [1–3]. В современных исследованиях цифровой двойник понимается не только как статическая модель, но как динамическая киберфизическая система, способная отражать изменения в реальном времени и обеспечивать основу для принятия решений [4, 5].

Применительно к робототехническим комплексам цифровые двойники позволяют виртуально отрабатывать управляющие программы, тестировать сценарии взаимодействия с оборудованием и снижать риск ошибок при вводе в эксплуатацию [6, 8]. В ряде обзоров подчеркивается их роль в формировании гибких производственных линий и интеграции в смарт-производство.

Наряду с этим демонстрируются примеры использования цифровых двойников для организации адаптивного взаимодействия человек – робот и прогнозирования состояния систем с применением машинного обучения [9], что указывает на растущую значимость цифровых двойников в задачах интеллектуальной автоматизации. Однако при всей универсальности таких решений отмечается, что многие методологии остаются ориентированными на исследовательскую среду и требуют значительных ресурсов для внедрения в промышленный контур.

В связи с этим можно выделить два основных подхода к построению цифровых двойников роботов. Первый – ROS-ориентированный, обеспечивает модульность и гибкость за счет взаимодействия узлов через DDS и API ROS 2, что облегчает интеграцию сенсоров и сложных алгоритмов планирования движений [10–12]. Второй подход основан на использовании офлайн-программирования (OPL), промышленного программируемого логического контроллера (ПЛК) и нативного программного обеспечения (ПО) робота, что снижает порог вхождения и упрощает интеграцию в существующие производственные линии [13–17]. Несмотря на значительное внимание к этим направлениям, применение OPL-подхода именно для построения сквозных цифровых двойников робототехнических ячеек остается недостаточно исследованным.

Цель данной статьи – разработка и верификация архитектуры цифрового двойника на основе OPL, ПЛК и нативного ПО коллаборативного робота с целью сокращения времени наладки и повышения надежности интеграции в производственные линии.

Методика построения цифрового двойника на основе OPL и ПЛК

Предложенный подход основан на использовании системы OLP, промышленного ПЛК и встроенного ПО робота. Такая архитектура ориентирована на практическое применение в промышленных условиях.

OLP-система выполняет формирование симуляционной модели и генерацию управляющего кода (URScript). ПЛК используется как центральный узел, координируя взаимодействие между роботом, станком и (при наличии) транспортным оборудованием, включая AGV. Нативное ПО робота обеспечивает выполнение управляющих программ, а также возможность их корректировки в коллаборативном режиме через teach pendant.

Ключевым преимуществом данного подхода является низкий порог вхождения [7, 13]: от инженера не требуется владение ROS (Robot Operating System) или сложными библиотеками, достаточно базовых навыков работы с OLP и ПЛК. Внедрение цифрового двойника сводится к настройке симуляции и переносу программы на реальное оборудование.

Такое построение особенно важно для производственных предприятий, где приоритетом являются сокращение времени наладки и интеграция в существующие линии без существенной перестройки инфраструктуры.

Альтернативный подход реализуется в среде ROS, которая представляет собой распределенную систему, основанную на взаимодействии узлов (nodes). Каждый узел выполняет специализированные задачи – от считывания сенсоров до планирования траекторий. Взаимодействие осуществляется через систему сообщений поверх протокола DDS (Data Distribution Service), принятого в ROS 2.

Для планирования движений применяется пакет MoveIt, обеспечивающий построение траекторий с учетом ограничений среды и динамики робота. Подключение реального оборудования осуществляется через драйверы, которые связывают ROS-узлы с контроллером робота.

Преимуществом ROS-подхода является высокая гибкость и возможность интеграции разнообразных сенсоров [10–12] (лидары, 3D-камеры, силомоментные датчики). Однако настройка подобной системы требует глубоких знаний в области C++/Python, сетевого взаимодействия и архитектуры ROS. Кроме того, значительная часть ROS-ориентированных решений используется преимущественно в исследовательских проектах. Подобная архитектура востребована в научных задачах и пилотных проектах, однако ее сложность и ресурсоемкость ограничивают применение в серийном производстве.

Сравнительный анализ подходов (таблица) показывает, что архитектура OLP+PLC ориентирована на ускоренное внедрение в действующие промышленные линии. В то же время ROS обеспечивает гибкость и исследовательский потенциал, что перспективно в задачах разработки новых алгоритмов и прототипирования.

Критерий	OLP + ПЛК + нативное ПО	ROS-ориентированный цифровой двойник
Порог вхождения	Низкий: настройка в графической среде, минимальное программирование	Высокий: требуется знание C++/Python, ROS API, настройка DDS
Гибкость	Ограничена функционалом OLP и контроллера	Высокая: модульные ROS-узлы, интеграция любых сенсоров и алгоритмов
Время внедрения	Короткое: генерация URScript и стандартные протоколы обмена	Длительное: развертывание ROS-узлов, настройка драйверов и сети
Интеграция с производством	Хорошо интегрируется, поддерживает Modbus TCP, EtherNet/IP	Чаще применяется в исследовательских стендах, нужна адаптация
Эксплуатационная надежность	Высокая: промышленное ПО и сертифицированные ПЛК	Более низкая: зависит от реализации и стабильности ROS-пакетов

Ключевым элементом методики является создание единой модели данных, объединяющей геометрию, кинематику и рабочие параметры элементов производственной ячейки. Для реализации используется OLP-система «Рациональное производство», позволяющая формировать точную виртуальную копию оборудования.

Предложенная архитектура цифрового двойника робототехнической ячейки строится по трехуровневому принципу.

1. Симуляционный уровень (OLP-система «Рациональное производство»).

Формируется цифровая модель рабочей зоны, включая робота, станок, захватные устройства и вспомогательное оборудование. OLP позволяет конфигурировать TCP и BASE, моделировать зоны безопасности, проверять коллизии и выполнять генерацию управляющего кода (URScript). Здесь же формируются виртуальные каналы ввода-вывода, имитирующие взаимодействие с ПЛК и периферией.

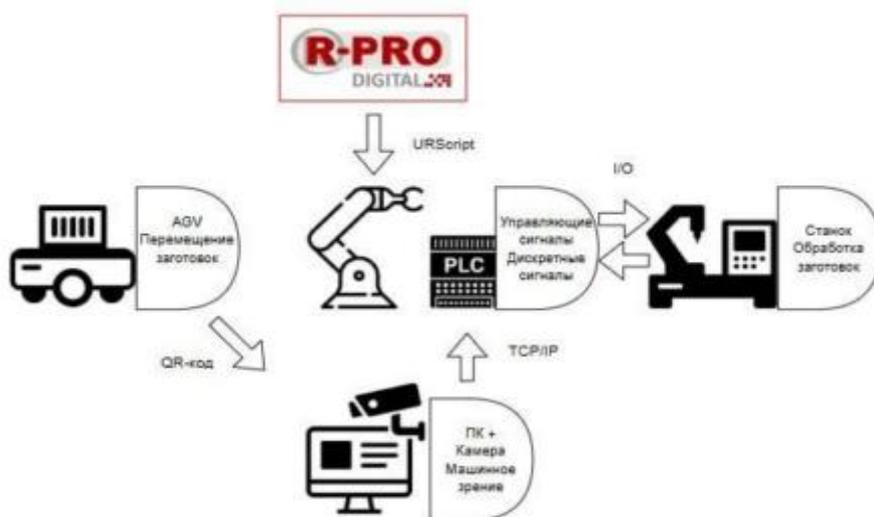
2. Уровень управления (промышленный ПЛК).

ПЛК выступает центральным узлом обмена данными, принимая сигналы от симулятора или реального оборудования и координируя взаимодействие между компонентами ячейки. Используются промышленные протоколы Modbus TCP и Ethernet/IP, обеспечивающие совместимость с роботами и станками. Через ПЛК проходят дискретные сигналы (флаги состояния), аналоговые управляющие (например, для вакуумного захвата) и данные по Ethernet (коррекция координат от машинного зрения).

3. Исполнительный уровень (контроллер робота и периферия).

Контроллер робота REDS 20 выполняет управляющий код в формате URScript, поступающий из OLP или с ПЛК. В данный уровень интегрированы также исполнительные устройства – вакуумные захваты, станок DV-1266, а в перспективе – автоматизированные транспортные тележки (AGV). Машинное зрение интегрируется через TCP/IP: камера фиксирует положение заготовки, ПК обрабатывает изображение и передает координатные поправки в ПЛК и далее в контроллер робота.

Функциональная схема представлена на рисунке и отражает взаимодействие трех уровней.



Таким образом, архитектура цифрового двойника объединяет симуляционный, управляющий и исполнительный уровни в единую киберфизическую систему. В архитектуре цифрового двойника программируемый логический контроллер выполнял функцию центрального звена, координирующего взаимодействие между роботом, станком DV-1266, транспортной тележкой AGV и модулем машинного зрения.

В системе использовались данные обмена флагами состояния и управляющими командами, по уровню напряжения определялся режим захвата/отпускания объекта вакуумным захватом, данные передачи координатных смещений от системы машинного зрения.

ПК с установленным ПО машинного зрения выполнял роль связующего звена, обрабатывая изображения и передавая координатные смещения через ПЛК в контроллер робота. В симуляционной модели предусмотрено распознавание QR-кодов на AGV для автоматизированного позиционирования и выбора программ; в текущих экспериментальных испытаниях эта функция не применялась.

Для обмена применялись промышленные протоколы Modbus TCP и Ethernet/IP, соответствующие стандартам IEC 61158 [16] и описанные в работах по интеграции ПЛК в робототехнические комплексы [6].

Их использование обусловлено надежностью, низкими задержками передачи (менее 50 мс) и совместимостью с большинством ПЛК и роботов.

Для актуализации данных о положении объектов в рабочей зоне использовалась камера, подключенная к ПК с модулем обработки изображений. В качестве тестовых объектов применялись металлические цилиндры, по которым выполнялась калибровка координат и уточнение позиционирования манипулятора.

Обмен данными между ПК и контроллером робота реализовывался по протоколу TCP/IP, поддерживаемому нативным ПО робота. ПК выполнял функции TCP-клиента, формируя сообщения в структурированном формате (XML/JSON), содержащие координатные поправки для рабочей системы BASE. Контроллер робота принимал сообщение, обновлял параметры и выполнял соответствующую программу.

Для сравнения времени наладки между традиционным подходом и предложенной методикой робототехнической ячейки введен параметр T_{comm} . В рамках данной работы под T_{comm} подразумевается суммарное время операций, связанных с подготовкой обмена данными и сигналами, калибровками, отладкой управляющих программ и проведением системных/приемочных испытаний по следующей формуле:

$$T_{\text{comm}} = T_{\text{IO}} + T_{\text{cal}} + T_{\text{dbg}} + T_{\text{test}},$$

где T_{IO} – время конфигурирования и проверки сигналов/каналов обмена между ПЛК, контроллером робота и периферией; T_{cal} – время калибровок и привязок; T_{dbg} – время отладки управляющих программ робота и логики ПЛК; T_{test} – время выполнения системных и приемочных прогонов.

Для задания опорной длительности проверочных прогонов и валидации при традиционном подходе использованы данные [17]. В работе указано, что проверка отсутствия коллизий при выводе нового изделия на производственную линию требует четыре недели.

В предложенном в данной статье методе по результатам первичной наладки получены следующие значения компонент: настройка обмена и I/O $T_{\text{IO}} - 1$ ч; калибровка и привязка оснастки $T_{\text{cal}} -$ один рабочий день; отладка ПЛК и подготовка программы под первую задачу $T_{\text{dbg}} - 4$ четыре рабочих дня; тестовые прогоны $T_{\text{test}} -$ один рабочий день. При пересчете в рабочие дни время составило 6,1 рабочих дней.

Оценка точности цифрового двойника выполнялась сопоставлением данных симуляции и реального цикла по траектории TCP, временным характеристикам и согласованности сигналов. Регистрация данных осуществлялась как средствами OLP-системы, так и средствами контроллера робота и ПЛК; для анализа использовались логи в формате CSV. Для обеспечения сопоставимости данные приводились к единой системе координат (BASE).

Координаты TCP в реальном цикле p^{real} определялись по данным контроллера робота. Контроллер вычисляет позу TCP на основе показаний энкодеров приводов и внутренней кинематической модели робота с учетом заданных параметров TCP/BASE. Таким образом, в качестве «реального» положения TCP использовалась оценка, доступная в штатном контуре управления, что обеспечивает воспроизводимую привязку траектории к фактическому исполнению программы.

Для вычисления RMS-ошибки TCP предлагается использовать формулу

$$e_k = \sqrt{(x_k^{\text{real}} - x_k^{\text{sim}})^2 + (y_k^{\text{real}} - y_k^{\text{sim}})^2 + (z_k^{\text{real}} - z_k^{\text{sim}})^2},$$

где e_k – пространственная ошибка TCP в k -й точке. Итоговая RMS-ошибка для цикла определяется выражением

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e_k^2}.$$

Критерий надежности выполнения цикла введен как доля успешных запусков без аварий, столкновений и ручного вмешательства оператора:

$$R_{\text{cycle}} = \frac{N_{\text{ok}}}{N_{\text{all}}} 100\% ,$$

где N_{all} – общее число выполненных циклов; N_{ok} – число циклов, завершенных штатно.

Результаты и их обсуждение

Для верификации предложенной архитектуры была собрана экспериментальная производственная ячейка, включающая коллаборативный робот REDS 20 с контроллером AUBO, металлообрабатывающий станок DV-1266, промышленный ПЛК для координации обмена сигналами, ПК с установленным модулем машинного зрения и подключенной камерой для считывания QR-кодов.

В текущих испытаниях камера использовалась для калибровки по цилиндрам; распознавание QR-кодов AGV реализовано в симуляции и планируется для будущих тестов.

Проведены экспериментальные сценарии, включающие следующее.

1. Перестановка цилиндрических заготовок в палеты.

Робот захватывал цилиндры и перекладывал их в разные позиции палет. Внешняя камера была привязана к системе координат робота для согласования данных машинного зрения с реальным движением.

2. Доставка и установка цилиндрической заготовки (световода) в DV-1266.

Манипулятор использовал вакуумный захват. Позиционирование выполнялось по реперам. Запуск цикла станка осуществлялся после подтверждения от ПЛК.

Для оценки эффективности проведена серия из 100 циклов перестановки цилиндрических заготовок и установки световода в станок. Фиксировались параметры точности, времени цикла и надежности выполнения.

В рамках серии из $N = 100$ циклов дополнительно фиксировалась длительность работы манипулятора без учета времени обработки на станке. Средняя продолжительность одного цикла перемещения и установки составила порядка 40 с. Отказы являлись единичными событиями, а доля успешных реализаций составила 97 %, следовательно $R_{\text{cycle}} = 97\%$.

При возникновении отказов робот по возможности возвращается в стартовую позицию и ожидает подтверждения оператора для продолжения программы, что приводит к среднему простоя порядка 5 мин на один отказ. Такой профиль отказов подтверждает, что достигнутая надежность завершения цикла характеризует именно устойчивость программно-интеграционной части.

Приведем результаты верификации цифрового двойника: RMS-ошибка TCP – 0,05–0,2 мм; отклонение длительности цикла – 5 % или менее; надежность завершения цикла – 97 %; среднее время отклика ПЛК – робот 50 мс или менее; время наладки – 6,1 рабочих дней.

Полученные значения RMS-ошибки TCP (0,05–0,2 мм) интерпретируются как точность воспроизводимости траекторий при переходе от симуляции к реальному циклу. В рамках данной работы принята штатная оценка контроллера, поскольку она непосредственно определяет качество исполнения программ и согласованность цифрового двойника с реальным контуром управления.

Показатель «время наладки» выражен через переменную T_{comm} и ее компоненты. Для первичного запуска ячейки основную долю времени составила отладка логики ПЛК. Подготовка управляющей программы составила 65 % от суммарно времени наладки. На калибровки/привязки и тестовые прогоны пришлось по одному рабочему дню (порядка 16 %), тогда как настройка обмена и I/O заняла около 1 ч (порядка 2 %). Такое разложение показывает, что основной резерв сокращения времени ввода связан именно с уменьшением объема ручной доводки программы и снижением числа итераций «проверка – коррекция» при переходе от цифрового двойника к реальной установке.

Для уже настроенной ячейки переход на новую оснастку и подготовка новой программы под другую деталь занимают существенно меньше времени, поскольку сохраняются базовые настройки обмена, структура сигналов и согласованная цифровая модель, а изменения локализуются на уровне оснастки и траекторий с последующей проверкой на тестовых прогонах.

Полученные в ходе исследования результаты показывают, что предложенная архитектура отличается высокой эксплуатационной надежностью: успешность выполнения операций и стабильный отклик системы (50 мс или менее) демонстрируют ее устойчивость даже в условиях многократных повторов, тогда как в ROS-ориентированных решениях стабильность во многом зависит от используемых пакетов и драйверов [10–12]. Точность перехода от симуляции к реальному циклу соответствует уровню промышленных OLP-систем [7, 15], что подтверждает воспроизводимость результатов моделирования. Важным фактором также стало сокращение времени внедрения: перенос программ из OLP в контроллер и их корректировка через teach pendant занял меньше времени, чем обычно требуется для настройки ROS-среды. Кроме того, работа велась исключительно средствами OLP и ПЛК без необходимости привлечения специалистов по ROS-разработке, что указывает на низкий порог вхождения.

Таким образом, предложенная архитектура обеспечивает баланс между точностью, надежностью и простотой интеграции. При этом ROS-подход сохраняет преимущества по гибкости и расширяемости, что делает его более уместным для исследовательских задач. Перспективным направлением развития является расширение функциональности цифрового двойника, включая сценарии взаимодействия с AGV и применение 3D-камер для повышения точности калибровки и адаптивности к изменяющимся условиям.

Выводы

В работе представлена архитектура цифрового двойника робототехнической ячейки, основанная на OLP, промышленном ПЛК и нативном ПО коллаборативного робота REDS 20. В отличие от ROS-ориентированных решений, данный подход ориентирован на промышленное применение и обеспечивает низкий порог вхождения, простоту интеграции и высокую эксплуатационную надежность.

Экспериментальная верификация подтвердила корректность предложенной архитектуры: цифровой двойник воспроизводил работу производственной ячейки с RMS-погрешностью позиционирования TCP не более 0,2 мм и успешностью операций 97 %. Время отклика между ПЛК и контроллером робота составило менее 50 мс, что соответствует требованиям к промышленным протоколам обмена.

Сравнительный анализ показал, что OLP + ПЛК позволяют существенно сократить время внедрения и снизить требования к квалификации персонала, тогда как ROS обеспечивает большую гибкость и расширяемость, но требует более высоких ресурсов для настройки и эксплуатации.

Практическая значимость исследования заключается в том, что методика обеспечивает перенос симуляционной модели в реальное оборудование с минимальными отклонениями, сокращает время наладки и снижает риск ошибок на этапе запуска.

В дальнейшем планируется интеграция модуля машинного зрения для автоматизированного взаимодействия робота с AGV по QR-кодам, а также использование 3D-камер для повышения точности калибровки и адаптивности к изменяющимся условиям производственной среды.

Таким образом, предложенный подход может быть основой для ускоренного внедрения робототехнических комплексов в составе гибких производственных систем, соответствующих принципам Индустрии 4.0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tao F. et al.* Digital Twin in Industry: State-of-the-Art // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019. Vol. 15. № 4. P. 2405–2415.
2. *Leng J. et al.* Digital Twins-Based Smart Manufacturing System Design in Industry 4.0: A Review // Journal of Manufacturing Systems. 2020. Vol. 60. P. 119–137.
3. *Zheng P. et al.* Smart Manufacturing Systems for Industry 4.0: Conceptual Framework, Scenarios, and Future Perspectives // Journal of Manufacturing Systems. 2021. Vol. 58. P. 1–14.

4. *Grievess M., Vickers J.* Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Cham: Springer, 2017. P. 85–113.
5. *Uhlemann T.H.-J. et al.* The Digital Twin: Demonstrating the Potential of Real-Time Simulation for Industry 4.0 // *Procedia CIRP*. 2017. Vol. 61. P. 335–340.
6. *Дьяконов С.В.* Программируемые логические контроллеры и их интеграция с роботами // *Вестник МЭИ*. 2021. № 6. С. 55–63.
7. *Weng T., Chen C., Wang J.* Industrial Robot Simulation and Offline Programming for Digital Manufacturing // *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 93. P. 112–117.
8. *Kousi N., Michalos G., Makris S.* Digital Twin for Adaptive Human–Robot Collaboration: A Review // *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2019. Vol. 32. № 11. P. 1013–1044.
9. *Bittner S. et al.* Combining Digital Twins and Machine Learning for Predictive Production Systems // *CIRP Annals*. 2021. Vol. 70. № 1. P. 463–466.
10. *Quigley M. et al.* ROS: An Open-Source Robot Operating System [Electronical Resource]. URL: <http://ai.stanford.edu/~mquigley/papers/icra2009-ros.pdf> (дата обращения: 16.11.2025).
11. *Macenski S. et al.* Robot Operating System 2: Design, Architecture, and Uses in the Wild // *Science Robotics*. 2022. Vol. 7. № 66. Article № eabm6074.
12. *Chitta S., Sucan I. A., Cousins S.* MoveIt! // *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2012. Vol. 19. № 1. P. 18–19.
13. *Иванов А.А., Петров Б.Б.* Использование OLP и ПЛК в роботизированных производственных линиях // *Автоматизация в промышленности*. 2023. № 5. С. 42–47.
14. *Абрамов В.А., Киселев И.П.* Цифровые двойники в промышленности: архитектуры и примеры внедрения // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2022. № 4. С. 15–23.
15. *Leitão P., Colombo A.W., Karnouskos S.* Industrial Automation Based on Cyber-Physical Systems Technologies: Prototype Implementations and Challenges // *Computers in Industry*. 2016. Vol. 81. P. 11–25.
16. International Electrotechnical Commission. IEC 61158: Industrial Communication Networks Fieldbus Specifications. Geneva: IEC, 2019. 1576 p.
17. BMW MW Group. BMW Group Scales Virtual Factory [Electronical Resource]. URL: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0450699EN/bmw-group-scales-virtual-factory?language=en> (дата обращения: 16.11.2025).

Поступила в редколлегию 16.12.25

METHODOLOGY FOR BUILDING A DIGITAL TWIN OF AN INDUSTRIAL ROBOT MANIPULATOR USING OFFLINE PROGRAMMING AND PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER

M.S. Azov, P.N. Kolpakov, V.K. Markelov, D.E. Chikrin, and D.V. Yamshchikov

The paper presents a methodology for building a digital twin of an industrial robot manipulator based on offline programming, an industrial PLC, and the robot’s native software. The proposed approach is compared with ROS-oriented architectures, which differ in their level of flexibility and in the qualification, requirements imposed on engineering staff. The methodology is implemented using a REDS 20 collaborative robot integrated with a DV-1266 machine tool and peripheral equipment. The study demonstrates the possibility of trajectory correction using an external camera with data exchange over TCP/IP. The obtained results confirm that the proposed approach is applicable for reducing commissioning time and increasing the reliability of robotic cells.

Keywords: digital twin, offline programming, programmable logic controller, industrial robot manipulators, machine vision.

Азов Максим Сергеевич – канд. техн. наук (УКБП, Ульяновск)
E-mail: m.azov@ukbp.ru

Колпаков Павел Николаевич – директор Центра интеллектуальных производств и аддитивных технологий (КФУ, Казань)
E-mail: PNKolpakov@kpfu.ru

Маркелов Владимир Константинович – специалист (КФУ, Казань)
E-mail: suummertimes@gmail.com

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

Ямщиков Дмитрий Викторович – технический директор (УКБП, Ульяновск)
E-mail: yamshikov@yandex.ru

РЕАЛИЗАЦИЯ АВАТАРА РОБОТА-АНДРОИДА СТОМАТОЛОГИЧЕСКОГО СИМУЛЯТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ 4.0

**С.Д. Аругюнов, А.А. Байдаров, А.Н. Кокоулин, Р.А. Кокоулин, С.А. Сторожев,
А.А. Южаков, М.Ш. Мустафаев, В.Д. Онискив**

Рассматриваются вопросы практической модернизации стоматологического робота-тренажера для повышения эффективности обучения студентов. Акцент сделан на совершенствовании искусственного зуба и системы обратной связи, обеспечивающих более точную симуляцию основных этапов работы. В частности, описаны изменения в системе обработки зубных тканей, замена материала искусственного зуба на аналог, приближенный по свойствам к тканям естественного зуба человека, а также внедрение новых функциональных возможностей, включая инструменты для отработки неотложных клинических ситуаций и систему дополненной реальности.

Ключевые слова: стоматологический тренажер, робот-андроид, симулятор, Robo-C, Smart-челюсть.

Введение

Основной задачей робота-пациента (симулятора) является максимально полная и достоверная имитация клинических ситуаций, при которой взаимодействие с роботом по своим характеристикам приближается к взаимодействию с реальным пациентом. Вместе с тем достижение предельного уровня реалистичности не всегда является необходимым, и ряд аспектов может быть целенаправленно упрощен для концентрации на функциях, наиболее значимых для симуляции [1]. Назначение симулятора заключается не в создании иллюзии реальности, а в обеспечении безопасной, воспроизводимой и объективно оцениваемой образовательной среды, предназначенной для формирования и совершенствования ключевых профессиональных компетенций будущего стоматолога. Уровень реализма при этом должен соответствовать степени, достаточной для эффективного переноса сформированных навыков в клиническую практику.

В связи с этим при разработке антропоморфного стоматологического робота-симулятора ряд аспектов, связанных с обработкой зубов, был намеренно упрощен. Данное решение основано на принципе целесообразной детализации, согласно которому реализм должен быть не самоцелью, а инструментом для достижения конкретных учебных задач. Принятие такого решения способствует снижению итоговой стоимости продукта, что повышает его экономическую доступность для использования в учебных заведениях. Также упрощение подразумевает использование меньшего числа сложных элементов, что повышает общую надежность системы и упрощает ее техническое обслуживание в случае поломки или замены компонентов. Кроме этого, увеличение объема информации не всегда повышает качество обучения, поскольку ее избыточность может отвлекать студента от выполнения поставленных задач либо формировать искаженное представление о реальном ходе процесса.

Изначальный вид системы показан на рис. 1.

В то же время разработчики нередко закладывают избыточный «запас прочности», выражающийся в более жестких допущениях, чем это необходимо. Практическая эксплуатация системы, особенно при использовании конечными пользователями (в нашем случае – студентами и преподавателями), оперативно выявляет эти несоответствия. Наличие таких расхождений отрицательно сказывается на эффективности обучения, поскольку студенты вынуждены затрачивать ресурсы на усвоение и отработку неестественных или чрезмерно регламентируемых жестких правил, не имеющих практической значимости в реальной профессиональной деятельности. Это формирует неправильные моторные навыки [2, 3].

Таким образом появляется необходимость в обновлении системы. Этот процесс демонстрирует, что разработка симулятора не разовый акт, а непрерывный диалог между инженерами, педагогами и

практикующими врачами. Изначальные допущения – это лишь гипотеза, которая проверяется в реальном мире. Способность системы к модернизации, обучению на основе обратной связи не менее важная характеристика, чем ее первоначальная техническая сложность. Таким образом, симулятор эволюционирует от статичного тренажера в динамичную, живую учебную среду, которая постоянно приближается к аутентичному клиническому опыту.

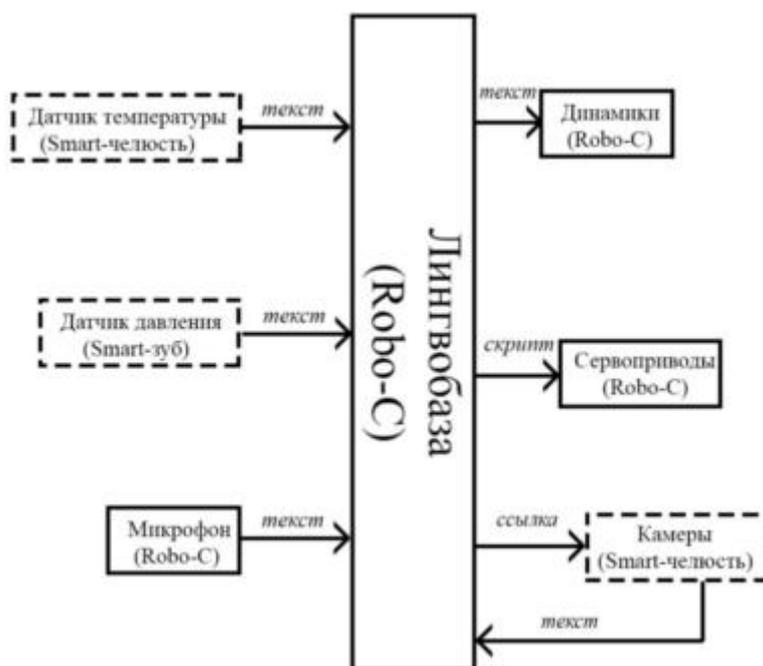


Рис. 1

Внешний вид обновленного робота-андроида показан на рис. 2, а, а его смарт-челюсть на рис. 2, б.



Рис. 2

Таким образом, цель работы – модификация промышленного антропоморфного робота-пациента [4] на основе робота-андроида, анализ основных отличий и дополнений новой разработки.

Искусственные высокопрочные полимерные зубы

Для эффективного обучения студентов-стоматологов на тренажерах важно, чтобы искусственные зубы из пластика максимально точно имитировали натуральные по твердости и другим свойствам. Этого можно добиться с помощью облучения готовых изделий гамма-лучами, что позволяет упрочнить материал, не меняя его состав [5, 6]. Материалом учебных моделей зубов является полиметилметакрилат. Существенное различие между физико-механическими характеристиками полиметилметакрилата и тканями зуба человека проявляется в микротвердости. Микротвердость необработанной эмали зуба по Виккерсу – 354 HV, тогда как у полиметилметакрилата горячей полимеризации – 19 HV. Известные подходы к

улучшению свойств полиметилметакрилата основаны на модификации его состава, включая армирование волокнами и стекловолокном, а также введение микро- и наноуполннителей (ZrO_2 , TiO_2 , углеродные нанотрубки) [7, 8]. Применение данных методов приводит к повышению микротвердости, прочности на изгиб и ударной вязкости материала.

Однако эффективность модификации зависит от концентрации, дисперсности и способа введения добавок, что существенно усложняет технологию производства, а также увеличивает стоимость. Кроме того, улучшение отдельных механических показателей не обеспечивает реалистичного поведения материала при высокоскоростном препарировании [9]. Для полиметилметакрилата установлено, что применение гамма-облучения приводит к упрочнению и росту микротвердости по Виккерсу, а конечный эффект зависит от дозы облучения, среды и исходного состава полимера. По предложению врачей-стоматологов, оценка на соответствие механических свойств полиметилметакрилата натуральным зубам при высокоскоростном препарировании проводилась на основании экспертного анализа. Численные значения поглощенных доз производители не раскрывают (оформлено ноу-хау). Модифицированные искусственные полимерные зубы обеспечивают более реалистичный тактильный отклик при высокооборотном препарировании. Это способствует формированию корректных моторных навыков и адекватной хаптической памяти у обучающихся, тем самым повышается эффективность практической подготовки на фантомах [10].

В исследовании были проанализированы 45 образцов искусственных зубов, подвергнутых гамма-облучению с использованием трех различных доз. Пять стоматологов-экспертов в условиях слепого тестирования выполняли сверление образцов и проводили их оценку по качеству обработки и субъективно воспринимаемой твердости по шкале, в которой значение 3 балла соответствовало твердости натурального зуба [11, 12].

Приведем пример искусственных полимерных зубов после радиационного облучения по требованиям высокой дозой (рис. 3, а), средней дозой (рис. 3, б) и малой дозой (рис. 3, в).



Рис. 3

По результатам проведенных исследований установлена прямая зависимость между дозой облучения и твердостью материала: с увеличением дозы отмечается рост данного показателя. Образцы, обработанные при низкой дозе облучения, в среднем получили оценку 3 балла, при средней дозе – 4 балла, при высокой – 5 баллов. Существенных различий между партиями искусственных зубов, подвергнутых одинаковой дозе облучения, выявлено не было.

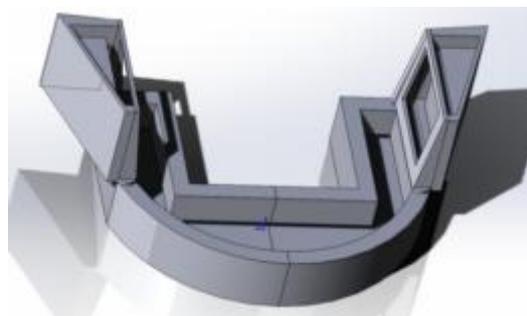
Оптимальным режимом радиационной модификации учебных искусственных полимерных зубов из полиметилметакрилата является высокая доза гамма-облучения, обеспечивающая максимальное соответствие физико-механических свойств и тактильного отклика натуральным твердым тканям зуба при высокоскоростном препарировании.

Система водяного охлаждения процесса медицинского инструмента и челюсти робота-андроида

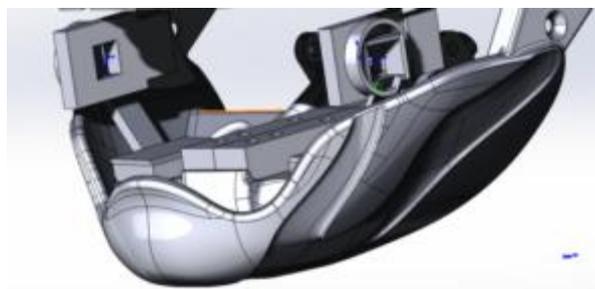
Одним из первых допущений был отказ от водяного охлаждения при обработке зубов. Водяное охлаждение в процессе лечения зуба очень важно, так как при сверлении или иной обработке эмали выделяется большое количество теплоты. Эта проблема становится особенно актуальной при смене материала зубов. Воздушное охлаждение не сможет поглотить такое количество тепла, поэтому эмаль начнет нагреваться и передавать теплоту на остальные ткани зуба, что приведет к их травмированию [13–15]. Водяное охлаждение обеспечивает эффективный отвод тепловой энергии, однако его использование в автономных сервисных роботах сопряжено с риском протечек воды в другие элементы системы. В связи с этим обработка зубов на первой модели осуществляется без охлаждения. Такое решение обуславливает возникновение ограничений: с одной стороны, у обучающихся отсутствует возможность формирования навыков взаимодействия с элементами системы водоотведения, с другой стороны, характер поведения материала зуба при обработке без теплоотвода может отличаться от условий обработки с охлаждением. Например, самый популярный заменитель эмали зубов – пластик – начинает плавиться при высоких температурах, поэтому первая модернизация робота заключается в добавлении водозащитной системы и водосбора. Функция водоотведения будет реализована с использованием технологии, аналогичной применяемой в стоматологии.

Система состоит из слюноотсоса и аспиратора. Слюноотсос применяется для удаления слюны, небольшого количества крови, охлаждающей воды от бормашины. Его трубка гибкая и тонкая, что делает возможным одновременное использование с другими приборами. Аспиратор с мощной всасывающей способностью удаляет крупные частицы – кусочки старых пломб, зубной ткани, остатки еды, большой объем воды. Диаметр трубки аспиратора больше, чем у слюноотсоса. Его наконечник часто снабжен клапаном, который позволяет ассистенту перекрывать отверстие пальцем для создания мощного импульсного отсоса. Подобное введение позволит обрабатывать функции ассистента при проведении операций [13].

Продемонстрируем модель водосбора, установленного внутри головы робота (рис. 4, а).



а



б

Рис. 4

Данная модернизация заключается также в добавлении системы защиты. Кроме деталей робота, от жидкости необходимо защищать и подсистему машинного зрения [13], в связи с чем были установлены

автоматические затворы (рис. 4, б). Затвор расположен перед боковыми и верхними камерами и управляется с той же платы, с которой происходит управление умной челюстью.

Новая смарт-челюсть

Модификация смарт челюсти связана с изначальным допущением о достаточно прочном креплении зубов к челюсти. Однако в процессе взаимодействия с тренажером было обнаружено, что крепление смарт-зубов ненадежно. Причина заключается в том, что крепление моляров, предназначенных для обработки буром, включает два элемента – фиксацию в челюсти за счет совпадения формы отверстия и зуба и фиксацию винтом.

В конструкции смарт-зуба применение винтового соединения оказалось невозможным из-за сложной внутренней структуры, которая могла быть нарушена при его использовании. В связи с этим было принято решение о замене винтовой фиксации на магнитную, обеспечивающую удержание элемента в вертикальном направлении. Фиксация зуба в остальных направлениях по-прежнему обеспечивалась геометрией отверстия.

Данное допущение не в полной мере отражало реальность. С одной стороны, между зубом и челюстью оставался зазор, что позволяло зубу прокручиваться при достаточном давлении. С другой стороны, магнитное соединение не обеспечивало необходимой прижимной силы и не только не могло компенсировать прокручивание зуба, но и не предохраняло зуб от выпадения из челюсти.

Для решения этих проблем были добавлены элементы – дополнительное отверстие прямоугольной формы и пружинящее замковое соединение. В отверстие в форме призмы помещается магнит соответствующей формы. Прямоугольное сечение такого отверстия предохраняет зуб от поворота даже при наличии небольшого зазора, необходимого для установки и извлечения магнита из челюсти. Пружинящее замковое соединение необходимо для дополнительной фиксации зуба в вертикальном направлении.

Полученная система представлена на рис. 5.



Рис. 5

Таким образом, новая смарт-челюсть соответствует требованиям специалистов в области медицины.

Включение комплекса «Имитация внутривенной инъекции» в состав симулятора

Причиной модернизации комплекса, представленного в работах [16, 17], является следующее. Предыдущие элементы были представлены в первой версии системы, но при работе с ними были выявлены их недостатки и разработан план по их устранению. Однако данная модернизация осуществляется с учетом необходимости дополнения системы новыми функциями, которые требуются для обучения студентов-стоматологов [16, 17].

Одной из таких функций является отработка внутривенных инъекций при экстренных ситуациях. В рамках решения этой проблемы был разработан программно-аппаратный комплекс «Имитация внутривенной инъекции», в котором микроконтроллер Arduino Nano осуществляет управление насосами, датчиками и исполнительными механизмами, обеспечивая обратную связь для обучающегося. Конструктивно система выполнена в виде силиконовой руки, анатомически приближенной к человеческой, что позволяет воспроизвести тактильные ощущения, максимально близкие к реальным.

На рис. 6 представлена структурная схема комплекса «Имитация внутривенной инъекции» с кратким техническим описанием его основных элементов.



Рис. 6

Комплекс состоит из трех частей – сменного модуля крышки с имитацией кожи с проводящим жидкость каналом, силиконовой имитации руки (рис. 7), основания с установленными компонентами.



Рис. 7

Комплекс может использоваться на разных типах роботов-андроидов, медицинских симуляторов и т. п.

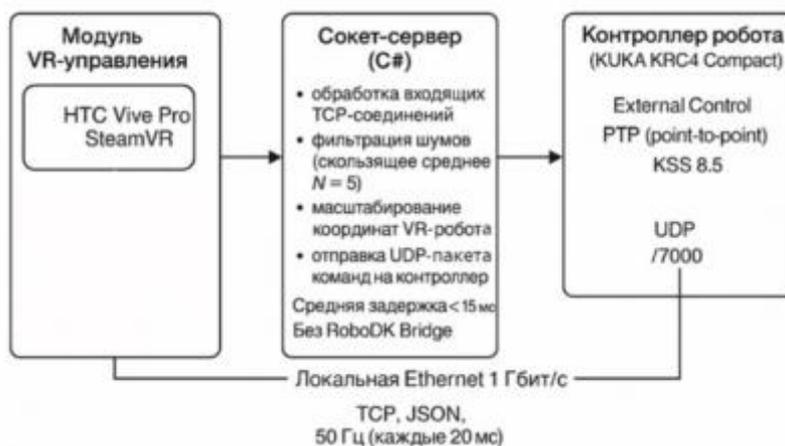
Смешанная реальность в образовательной среде 4.0

Разработанная система позволяет напрямую связывать виртуальную среду, созданную с помощью игрового движка Unity, с роботом-пациентом и промышленным роботом-манипулятором KUKA KR-6. Эта разработка нацелена на использование студентами, обучающимися на стоматологических специальностях [4, 18] в дистанционном режиме.

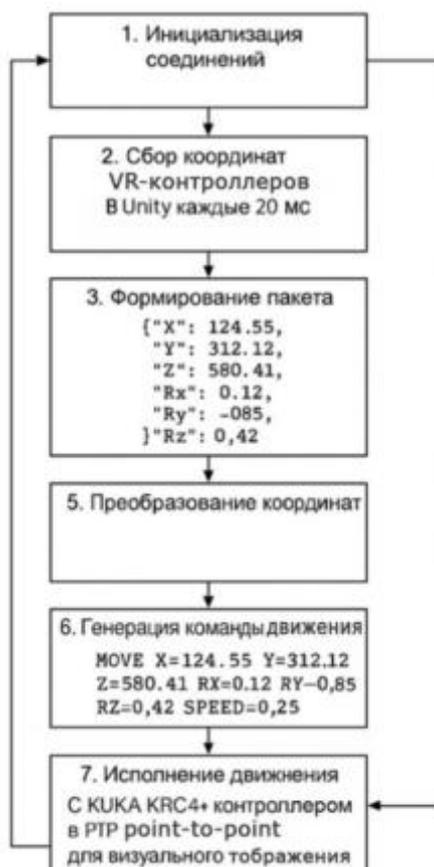
Новая архитектура позволяет устранить зависимость от промежуточного программного обеспечения.

Команды управления и координаты передаются напрямую с контроллеров VR-шлема на реальный робот-манипулятор, без привлечения сторонних драйверов и программных мостов. Для реализации взаимодействия был создан специальный сокет-сервер на языке программирования C#.

Архитектура комплекса приведена на рис. 8, а, блок-схема алгоритма – на рис. 8, б.



а



б

Рис. 8

Благодаря применению новой архитектуры удалось добиться высокой точности позиционирования (погрешность менее 1 мм) и минимизировать задержки при передаче данных через локальную сеть. С целью повышения реалистичности обучения система реализует двусторонний обмен данными между фактическим положением робота-пациента и виртуальной средой.

Три трекера HTC ViveTracker отслеживают координаты физического объекта, которые затем автоматически переносятся в виртуальную сцену Unity, тем самым достигается полное соответствие между реальным и виртуальным пациентами.

Испытания системы показали ее стабильность и возможность интеграции в уже существующую образовательную среду 4.0. Это позволит студентам формировать коммуникативные и практические навыки, необходимые для лечения различных стоматологических заболеваний. Разработанное решение

открывает новые перспективы для использования виртуальной и смешанной реальности в медицинском образовании.

Заключение

В результате проведенной работы была успешно реализована оригинальная комплексная модернизация стоматологического робота-пациента (на базе робота-андроида), основанная на принципе целесобразной детализации и обратной связи от пользователей. Научная новизна исследования заключается в разработке принципиального подхода к повышению реалистичности учебного процесса, реализованного посредством замены материала искусственных зубов на полиметилметакрилат, модифицированный гамма-облучением, что обеспечило тактильные свойства, близкие к натуральным тканям зуба; усовершенствовании системы водяного охлаждения и защиты для безопасной работы и отработки навыков ассистента; доработке конструкции смарт-челюсти для надежной фиксации зубов.

Дополнительно функциональность тренажера была расширена за счет модуля для отработки внутривенных инъекций и интеграции с системой дополненной реальности, обеспечивающей высокоточное позиционирование и интерактивность.

Проведенная модернизация подтвердила, что симулятор является динамичной системой, эволюционирующей на основе практического опыта. Внедренные усовершенствования тренажера способствуют не только повышению его реалистичности и надежности, но и прямо влияют на формирование у студентов устойчивых клинических навыков, обеспечивая подготовку к выполнению профессиональных задач в условиях, максимально приближенных к реальной практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеев М.Е. и др. Медицинские симуляторы: история развития, классификация, результаты применения, организация симуляционного образования // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. 2015. № 2 (85). С. 53–59.
2. Косаговская И.И., Волчкова Е.В., Пак С.Г. Современные проблемы симуляционного обучения в медицине // Эпидемиология и инфекционные болезни. 2014. № 1. С. 49–61.
3. Камышиникова Л.А. и др. Мнение студентов-медиков об использовании симуляторов на занятиях // Врач и информационные технологии. 2020. № 3. С. 67–72.
4. Южаков А.А. и др. Разработка антропоморфного стоматологического симулятора на базе робота Robo-C // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2023. № 4. С. 13–22.
5. Serbanoiu D.-C. et al. Comparative Evaluation of Dental Enamel Microhardness Following Various Methods of Interproximal Reduction: A Vickers Hardness Tester Investigation // Biomedicines. 2024. Vol. 12. № 5. Article № 1132.
6. Shrivastava S.P. et al. Comparison of Mechanical Properties of PEEK and PMMA: An in vitro Study // Journal of Contemporary Dental Practice. 2021. Vol. 22. № 2. P. 179–183.
7. Gad M. M. et al. PMMA Denture Base Material Enhancement: A Review of Fiber, Filler, and Nanofiller Addition // International Journal of Nanomedicine. 2017. Vol. 12. P. 3801–3812.
8. Gad M.M. et al. Reinforcement of PMMA Denture Base Material with A Mixture of ZrO₂ Nanoparticles and Glass Fibers // International Journal of Dentistry. 2019. Vol. 2019. Article № 2489393.
9. Cresswell-Boyes A.J. et al. Composite 3D Printing of Biomimetic Human Teeth // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Article № 7830.
10. Patil S. et al. Effectiveness of Haptic Feedback Devices in Preclinical Training of Dental Students a Systematic Review // BMC Oral Health. 2023. Vol. 23. № 1. Article № 739.
11. Wu S.-X. et al. Material Removal and Surface Damage in High-Speed Grinding of Enamel // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2022. Vol. 136. Article № 105532.
12. Cresswell-Boyes A.J. et al. An Evaluation by Dental Clinicians of Cutting Characteristics and Haptic Perceptions in 3D-Printed Typodont Teeth: A Pilot Study // Journal of Dental Education. 2025. Vol. 89. № 4. P. 567–577.
13. Каплан М.З. и др. Изменения в полости зуба при воздействии температурных факторов // Патогенез. 2016. № 2. С. 71–73.
14. Велитченко И.А., Винниченко А.В., Винниченко Ю.А. Влияние тепловых факторов на ткани зуба и периодонта при эндодонтическом лечении (обзор литературы) // Клиническая стоматология. 2010. № 2. С. 26–30.

15. *Ржанов Е.А., Беляева Т.С., Беляева М.С.* Сравнительная оценка температурных изменений в пульповой камере при препарировании зубов с помощью твердосплавных и алмазных инструментов под несъемные ортопедические конструкции // Проблемы стоматологии. 2008. № 2. С. 57–60.
16. *Самуткина М.Г. и др.* Тренажер для отработки навыков проведения анестезии в стоматологии как элемент симуляционного обучения // Лучшая исследовательская статья 2020: Сб. ст. Междунар. науч.-исслед. конкурса, г. Петрозаводск, 15 мая 2020. Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука», 2020. С. 179–184.
17. *Фишер И.И., Самуткина М.Г., Савельев А.Л.* Разработка новой модели обучения на примере использования тренажера для отработки навыков анестезии в стоматологии // Паринские чтения 2022. Инновации в прогнозировании, диагностике, лечении и медицинской реабилитации пациентов с хирургической патологией черепно-челюстно-лицевой области и шеи: Сб. тр. нац. конгресса с междунар. участием, посвященного памяти профессора, заслуженного деятеля науки Республики Беларусь О.П. Чудакова, г. Минск, 5–6 мая 2022. Минск: УО БГМУ, БГУ, 2022. С. 61–65.
18. *Арутюнов С.Д. и др.* Стоматологический симулятор на базе робототехнического комплекса с интегрированной смарт-челюстью // Российский стоматологический журнал. 2023. № 1. С. 63–70.

Поступила в редколлегию 25.10.25

IMPLEMENTATION OF AN ANDROID ROBOT AVATAR FOR A DENTAL SIMULATOR USING EDUCATIONAL TECHNOLOGY 4.0

**S.D. Arutyunov, A.A. Baidarov, A.N. Kokoulin, R.A. Kokoulin,
S.A. Storozhev, A.A. Yuzhakov, M.Sh. Mustafaev, and V.D. Oniskiv**

This article examines the practical modernization of a dental robotic simulator to improve the effectiveness of student training. Emphasis is placed on improving the artificial tooth and feedback system, which provide more accurate simulation of key stages of the procedure. Specifically, it describes changes to the dental tissue processing system, replacing the artificial tooth material with an analog similar in properties to natural human tooth tissue, and the implementation of new functional capabilities, including tools for practicing emergency clinical situations and an augmented reality system.

Keywords: dental simulator, android robot, simulator, Robo-C, Smart-jaw.

Арутюнов Сергей Дарчоевич – д-р мед. наук (Российский ун-т медицины, Москва)
E-mail: sd.arutyunov@mail.ru

Байдоров Андрей Александрович – канд. техн. наук (ПНИПУ, Пермь)
E-mail: baidarov.aa@ya.ru

Кокоулин Андрей Николаевич – канд. техн. наук (ПНИПУ, Пермь)
E-mail: a.n.kokoulin@gmail.com

Кокоулин Ростислав Андреевич – аспирант (ПНИПУ, Пермь)
E-mail: kokoulinrostislav@yandex.ru

Сторожев Сергей Александрович – канд. техн. наук (ПНИПУ, Пермь)
E-mail: sastorozhev@pstu.ru

Южаков Александр Анатольевич – д-р техн. наук (ПНИПУ, Пермь)
E-mail: uz@at.pstu.ru

Мустафаев Магомед Шабазович – д-р мед. наук (КБГУ, Нальчик)
E-mail: musmag@mail.ru

Онискив Владимир Дмитриевич – канд. техн. наук (ПНИПУ, Пермь)
E-mail: oniskivf@gmail.com

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РАДИОФОТОННОГО ПРИЕМНОГО ТРАКТА С БОЛЬШИМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ

Д.П. Данилаев, А.Е. Денисов, Н.Г. Хайруллин

Представлен обзор радиотехнических систем с потенциальной необходимостью применения радиофотонного аналого-цифрового преобразователя при условии обеспечения широкого динамического диапазона, а также рассмотрены достигаемые при этом преимущества. Предложен поэтапный алгоритм оценки параметров радиофотонного тракта и выбора соответствующего радиофотонного аналого-цифрового преобразователя на основе заданных технических характеристик приемника в составе радиотехнической системы. Приведен пример оценки параметров по предложенному алгоритму.

Ключевые слова: радиофотонный тракт, радиофотонный аналого-цифровой преобразователь, выбор аналого-цифрового преобразователя, радиоприемник, динамический диапазон, оценка параметров аналого-цифрового преобразователя.

Введение

Применение в радиоприемных устройствах фотонной элементной базы, основанной на взаимодействии оптических и радиочастотных электромагнитных полей, позволяет преодолеть ограничения электронной базы и обеспечить работу в широком частотном диапазоне (до 100 ГГц), широкую полосу пропускания приемника, большую пропускную способность, быстродействие, высокую чувствительность.

Идея перехода к радиофотонной элементной базе заключается в том, чтобы устранить фундаментальные ограничения электронных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) (шум, джиттер, паразитные емкости) за счет чрезвычайно высокой скорости, слабого влияния электромагнитных помех, низких потерь при передаче [1–4]. Радиочастотный сигнал модулирует параметры светового потока (например, амплитуду или фазу колебания), затем оптический сигнал обрабатывается и дискретизируется. Радиофотонные схемы АЦП демонстрируют рекордные характеристики по сравнению с лучшими электронными АЦП. Например, они позволяют получать 12-14-битное квантование сигналов со скоростью порядка 20 GS/s [2] или 8-битное при частоте 100 GS/s и полосе более 20 ГГц [3] по сравнению с электронными АЦП с наилучшими параметрами, обеспечивающими на скорости 26 GS/s только трехразрядное преобразование (например, АЦП Analog Devices HMC AD 5831 LP9 BE [5]). Джиттер импульсов света крайне мал (на уровне фемтосекунд) [1, 2]. Радиофотонные АЦП отличаются потенциально более низким энергопотреблением на высоких скоростях (так как основные операции производятся пассивными оптическими компонентами), а также нечувствительностью к электромагнитным помехам.

Одним из основных ограничений фотонной элементной базы является узкий динамический диапазон, который, например, для модулятора Маха – Цандера, по оценкам, составляет порядка 50 дБ [1]. Этот модулятор является структурным элементом радиофотонного АЦП, и, следовательно, также возникают ограничения по динамическому диапазону всей схемы [6, 7]. При этом существуют подходы к расширению динамического диапазона радиоприемного устройства с радиофотонным АЦП [8, 9].

Цель статьи – определение требований к параметрам радиофотонного АЦП для проектирования радиофотонного приемного тракта с большим динамическим диапазоном.

Существуют радиотехнические системы, в которых требуется комплексное сочетание характеристик радиоприемников: высокая чувствительность для обнаружения слабых сигналов, широкий рабочий диапазон частот, значительная полоса пропускания для анализа современных сложных модуляций и шумоподобных сигналов, а также способность сохранять высокое качество анализа и идентификации в условиях приема слабых сигналов на фоне мощных, в том числе преднамеренных, помех или в условиях одновременной обработки сильных и слабых сигналов, относящихся к граничным уровням динамического диапазона приемника.

Рассмотрим некоторые из систем.

1. Устройства в составе систем радиоэлектронного мониторинга, например радиоэлектронный комплекс L402 «Гималаи».

Обеспечивает функции радиоэлектронного мониторинга и разведки, предупреждения о радиолокационном облучении и активного противодействия в составе самолетов российского производства [10]. Комплекс объединяет функции приемника сигналов, анализа спектра и постановки активных контрмер. Приемники комплекса должны характеризоваться высокой чувствительностью (до -120 дБм), коэффициентом шума порядка 2–8 дБ, корректно работать при отношении сигнал/шум 10–20 дБ, обеспечивать широкий диапазон частот (от сотен мегагерц до 40 ГГц для отдельных подсистем) и иметь широкий динамический диапазон (не менее 100...20 дБ) [10]. Аналогичные параметры имеют зарубежные аналоги – AN/ASQ-239 (установлена на F-35) и ALQ-218 (используется на EA-18G Growler) [11, 12]. Во всех случаях системы должны принимать и классифицировать разнообразные типы сигналов: импульсные радиолокационные с линейной частотной модуляцией, фазокодированные последовательности (BPSK/QPSK), непрерывные FMCW-сигналы, шумоподобные помехи. Для связи применяются DSSS, M-PSK, M-FSK. Задача обнаружения и распознавания осложняется тем, что приемник принимает множество различных по уровню радиосигналов с широким спектром, а также радиопомех разного происхождения. Величина разных входных сигналов может относиться как к верхней, так и к нижней границе динамического диапазона. В идеальном случае необходимо обеспечить линейность радиотракта для сохранения спектра сигналов. В связи с этим используется понятие динамического диапазона, свободного от паразитных составляющих (SFDR), определяемое как безразмерная величина, равная отношению мощности полезного узкополосного сигнала (несущей) к мощности наиболее мощной паразитной составляющей (гармоники), либо как отношение полной шкалы (верхней границы) к мощности наиболее мощной паразитной составляющей (рис. 1).



Рис. 1. Определение величины динамического диапазона, свободного от паразитных составляющих

SFDR является ключевой характеристикой качества приемников, предназначенных для обнаружения слабых сигналов в условиях переполненного спектра более мощных блокирующих сигналов [9].

Значения SFDR меньше, чем у величины динамического диапазона. Если у современных радиоприемных устройств SFDR может составлять до 100 дБ, то величина динамического диапазона в связи с этим оказывается больше на 20–40 дБ [1].

2. Анализаторы спектра и приемные комплексы для научных исследований.

Коммерческие приборы, например анализатор спектра линейки «СК4-БЕЛАН» (Россия) или анализаторы зарубежного производства Keysight или Rohde & Schwarz ESW, обеспечивают частотный охват до 50 ГГц и полосу анализа до 1 ГГц (Keysight N9040B/41B UXA). Их динамический диапазон составляет порядка 100...110 дБ, коэффициент шума около 20–25 дБ, чувствительность порядка 115 дБ [13]. Эти значения обеспечивают большинство задач мониторинга и сертификации, но оказываются недостаточными при регистрации слабых сигналов в условиях соседства с мощными передатчиками. В таких приборах анализируются сигналы связи (LTE/5G NR с OFDM и QAM), Wi-Fi (OFDM, DSSS), спутниковые каналы (QPSK, 8PSK, APSK), гражданские радары (FMCW).

3. Беспилотные летательные аппараты с задачами радиомониторинга.

В связи с использованием современных БЛА – от малых гражданских БЛА до стратегических систем – предъявляются жесткие требования к качеству радиосигналов для управления, передачи данных

и радиомониторинга. В малых БЛА (например, DJI, Atom) связь и передача видео реализуются в диапазонах 2,4 и 5,8 ГГц с применением OFDM-, QAM- и DSSS/FHSS-сигналов. В них чувствительность порядка $-100\dots-110$ дБм и динамический диапазон 80...95 дБ обеспечивают надежную работу в условиях городских помех [14]. Однако не учитывается работа в условиях наведенных, или имитирующих, или интеллектуальных преднамеренных помех [15, 16].

Тактические БЛА (например, Bayraktar) используют диапазон часто 30 МГц...3 ГГц для управления и телеметрии. Для них критична чувствительность $-105\dots-115$ дБм, динамический диапазон 90...110 дБ и коэффициент шума 3–6 дБ, что позволяет фиксировать слабые сигналы на фоне мощных передатчиков [17, 18].

Для систем с большой продолжительностью полета (например, MQ-9 Reaper и др.) применяются диапазоны частот 3...19 ГГц, модуляции QPSK/8PSK и защищенные методы DSSS/FHSS. Требования к таким системам еще выше: чувствительность до -120 дБм, динамический диапазон более 110 дБ и коэффициент шума менее 5 дБ, что необходимо для устойчивой связи на дальних дистанциях и работы разведывательных полезных нагрузок [19]. Подвесные решения (Ettus, Aaronia), применяемые как на БЛА, так и в испытательных задачах, обеспечивают охват от сотен мегагерц до 6 ГГц с реальной полосой анализа до сотен мегагерц и динамическим диапазоном порядка 90 дБ, что делает рациональным их использование для прототипирования и радиомониторинга. Вместе с тем они подвержены перегрузке большими по уровню сигналами и/или помехами [20].

Таким образом, современные радиоприемные устройства рассмотренных систем обеспечивают широкий рабочий диапазон частот (от сотен мегагерц до десятков гигагерц), обработку разных типов сигналов (импульсные, фазокодированные, OFDM, шумоподобные) и способность одновременно фиксировать очень слабые и очень сильные излучения. Динамический диапазон порядка 100...120 дБ обеспечивает выполнение практических задач, но в условиях перегруженного широкополосного спектра различных накладывающихся сигналов и помех этого оказывается недостаточно. Требуется дальнейшее увеличение динамического диапазона до значения порядка 140 дБ, что позволит лучше различать сигналы на фоне мощных помех и соседних каналов. При этом важно не ухудшить другие параметры – чувствительность приемника ($-115\dots-120$ дБм), коэффициент шума (5 дБ и менее), широкую частотную полосу анализа (сотни мегагерц – гигагерцы).

Параметры радиопотонных АЦП с прикладной точки зрения аналогичны параметрам электронного АЦП, но с акцентом на особенности реализации. Для построения цифрового радиоприемника ключевыми являются параметры радиопотонного АЦП, которые напрямую определяют качество приема и возможность обработки сигнала. Их можно разделить на три группы:

1. Частотные параметры:

- полоса пропускания, фактически максимальная частота аналогового входного сигнала (сигналов), который может быть корректно оцифрован, в радиопотонных АЦП может превышать 100 ГГц и ограничивается в основном быстродействием электрооптического модулятора и фотодетекторов;

- частота дискретизации, может достигать сотен гигагерц благодаря использованию оптических генераторов.

2. Параметры, определяющие «качество» преобразования сигнала:

- разрядность, определяющая динамический диапазон и точность;

- эффективное число разрядов (ENOB (Effective Number of Bits)), реальная разрядность АЦП, учитывающая все шумы и искажения (при их воздействии младшие разряды оказываются зашумлены, могут принимать случайные значения, поэтому не принимаются во внимание). Исследования показали, что увеличение частоты дискретизации АЦП ведет к снижению ENOB; определена обратно пропорциональная зависимость ENOB от частоты дискретизации [21, 22]. Показано, что ограничения на предельные значения ENOB в различных диапазонах частот дискретизации обусловлены различными, характерными только для того или иного диапазона этих частот, физическими явлениями. Например [22], в диапазоне частот дискретизации от десятков килогерц до единиц мегагерц величина ENOB в основном ограничена тепловыми шумами; в диапазоне частот дискретизации от десятков мегагерц до единиц гигагерц величина

на ENOB в основном ограничена джиттером; в диапазоне частот дискретизации от десятков гигагерц и выше величина ENOB в основном ограничена неоднозначностью компаратора, и именно неоднозначность компаратора делает практически нереальным увеличение верхней границы диапазона рабочих частот полупроводниковых АЦП с диапазоном Найквиста выше 50 ГГц, так как при частотах дискретизации порядка 100 ГГц значения ENOB становятся равными нулю.

Переход к радиопотонным аналого-цифровым преобразователям обусловлен необходимостью обеспечения уровней шумов и сопутствующих характеристик, превосходящих возможности электронных АЦП на частотах свыше 10 ГГц. Тем не менее общая тенденция сохраняется: на высоких частотах дискретизации достичь высокой разрядности (например, 12–16 бит) в фотонных системах сложно [2, 3, 22].

3. Нелинейные искажения в АЦП, которые оцениваются следующими параметрами:

- динамический диапазон без гармоник (SFDR), который можно также представить как диапазон, в котором амплитуда побочных спектральных составляющих (гармоник) не превышает уровень шума;
- коэффициент гармоник – суммарная мощность гармонических искажений.

3. Параметры, определяющие характеристики первых, предварительных каскадов приемника:

- отношение сигнал/шум на выходе (SNR – Signal-to-Noise Ratio) или коэффициент шума АЦП. Природа шумов, преобладающих в радиопотонных АЦП, отличается от электронных АЦП. Это шумы лазера, дробовой шум, тепловой шум и темновой ток на фотодетекторе, шум схемы, следующей за фотоприемником. SNR определяет порог чувствительности приемника;

- чувствительность АЦП – минимальная мощность входного сигнала, необходимая для его корректного преобразования. Это важный параметр для радиопотонного АЦП, так как процесс модуляции света требует определенного уровня мощности RF-сигнала. Влияет на необходимый коэффициент усиления предварительных малошумящих усилителей;

- джиттер – неопределенность во времени взятия отсчета. Ключевое преимущество радиопотонных АЦП состоит в том, что джиттер оптических импульсов может быть на порядок ниже, чем у электронных тактовых генераторов (фемтосекунды против пикосекунд). Влияет на ухудшение SNR на высоких частотах;

- потребляемая мощность – общая мощность, потребляемая всеми компонентами радиопотонного АЦП – лазером, модуляторами, оптическими приемниками, электронными компараторами (которые часто являются частью системы). Определяет требования к системе питания и охлаждения, что критично для мобильных и встраиваемых систем;

- оптическая мощность накачки – мощность исходного лазерного излучения, необходимого для работы всей фотонной схемы. Специфический параметр для фотонных систем;

- нелинейность модулятора, которая характеризует основную причину искажений в радиопотонном АЦП [9].

Приоритет тех или иных параметров при выборе АЦП зависит от назначения радиоприемного устройства.

1. Широкополосный радиомониторинг и радиоразведка.

Полоса пропускания максимальная (десятки гигагерц) для перекрытия множества частотных диапазонов одновременно; SFDR очень высокий (более 110 дБн/Гц), чтобы детектировать слабые сигналы в присутствии мощных. Частота дискретизации высокая для обеспечения широкой полосы частот. ENOB высокий (12-14 бит и более) для большого динамического диапазона.

2. Связь следующего поколения (5G/6G, спутниковая связь).

Полоса пропускания широкая (несколько гигагерц) для поддержки широкополосных сигналов с высокой скоростью передачи данных. Высокие значения SNR/ENOB для низкого коэффициента битовых ошибок. Потребляемая мощность умеренная, для размещения на базовых станциях. Частота дискретизации достаточная для оцифровки полосы шириной в сотни МГц – несколько ГГц.

3. Радиоастрономия.

Чувствительность крайне высокая, часто требует охлаждения компонентов. SNR максимально возможный для детектирования сверхслабых сигналов из космоса. Полоса пропускания широкая для спектрального анализа.

4. Радиолокация (особенно с AFAR).

SFDR очень высокий для выделения слабого эхо-сигнала на фоне мощного передаваемого и помех от подстилающей поверхности. Частота дискретизации высокая для точного определения дальности и разрешения по скорости. Полоса пропускания соответствует ширине зондирующего импульса.

Повышенные требования к динамическому диапазону радиоприемных устройств характерны, прежде всего, для систем радиолокации и широкополосного радиомониторинга и радиоразведки, причем в системах радиомониторинга и радиоразведки, кроме того, предъявляются требования по перекрытию множества частотных диапазонов одновременно – к полосе пропускания, а также к ENOB. В связи с этим данная система представляет наибольший интерес с точки зрения реализации радиофотонного приемного тракта, обеспечивающего расширенный динамический диапазон.

Выбор радиофотонного АЦП при проектировании радиоприемного устройства может осуществляться на основе компромисса между техническими требованиями, стоимостью и сложностью интеграции.

Можно принять следующие критерии выбора радиофотонного АЦП для приемника.

1. Определение целевой полосы частот.

Полоса пропускания АЦП должна перекрывать весь целевой диапазон частот приемника.

2. Оценка динамического диапазона.

SFDR и ENOB АЦП должны обеспечивать обработку сильных и слабых входных радиосигналов. Если при приеме возможны мощные помехи, необходим АЦП с высоким SFDR. ENOB напрямую определяет доступный динамический диапазон.

3. Анализ чувствительности и шумов.

Чувствительность АЦП и его шумовые характеристики (определяющие SNR) должны соответствовать требованиям к чувствительности всего приемника. Если АЦП имеет низкую чувствительность, требуется более сложный и малошумящий усилитель [23].

4. Оценка энергопотребления и теплоотведение.

Для стационарных систем допустимо более высокое энергопотребление. Для мобильных или авиационно-космических применений потребляемая мощность становится одним из главных критериев выбора. Высокое энергопотребление также требует эффективной системы охлаждения.

5. Анализ сложности интеграции.

Учитывая структуру и состав радиофотонного АЦП, необходимо оценить габаритные размеры, наличие и сложность необходимых источников питания и систем охлаждения, устойчивость к внешним условиям (вибрации, температура), сложность сопряжения с радиочастотным трактом (требуются согласующие цепи) и цифровой частью (интерфейс передачи данных).

6. Стоимость применения.

Стоимость модуля радиофотонного АЦП, по текущим оценкам, существенно превосходит стоимость электронного модуля.

Учитывая специальное назначение систем широкополосного радиомониторинга и радиоразведки, можно считать, что первые три критерия имеют решающее значение. В связи с этим далее рассмотрим алгоритм оценки параметров радиофотонного приемного тракта такой системы.

Исходными данными для проектирования являются диапазон рабочих частот системы, типы сигналов, требуемая чувствительность и динамический диапазон.

Для выбора частоты дискретизации f_s в зависимости от диапазона рабочих частот радиосигналов $f_{\min} \dots f_{\max}$ и его ширины ΔF могут быть использованы выражения [24]

$$f_s > 2\Delta F ; f_s = \frac{4f_{\max}}{2NZ - 1}, \quad (1)$$

где $NZ = 1, 2, 3, \dots$ – номер зоны Найквиста, в которую попадает несущая сигнала.

В радиолокационных системах, исходя из характерной узкополосности радиоканала, рассматривается переход от такого классического подхода к подходу, основанному на спектрально-интервальном

оценивании СВЧ-сигнала. Основная идея подхода – перейти от случая обработки каждого временного отсчета своим каналом к случаю обработки каждого спектрального интервала своим каналом [25].

Известно, что при выборе более высокой частоты отсчетов снижаются требования к крутизне переходной области частотной характеристики антиэлайсингового фильтра [24]. Переход к радиофотонной базе обуславливает широкую переходную область этой характеристики и позволяет рассмотреть реализацию фильтра на основе антенно-фидерной системы приемника. При этом требуется более высокоскоростная цифровая обработка сигнала. В высокоскоростных АЦП каждый соседний временной отсчет обычно обрабатывается своим каналом, причем выходной сигнал должен быть получен в результате совместной обработки всех отсчетов, что требует параллельной обработки информации ввиду высокой частоты отсчетов [25, 26], т. е. в дополнение к высокоскоростному АЦП требуется мощная вычислительная система. В перспективе рассматривается разработка принципов сверхскоростной параллельной обработки цифровых сигналов большой разрядности по фиксированной программе с помощью оптоэлектронных технологий и создание прототипов спецпроцессоров оптоэлектронных устройств [25].

Идеальный аналого-цифровой преобразователь имеет идеальную линейную характеристику, но процесс квантования порождает шум квантования. Используя мощность сигнала и мощность шума, можно получить SNR для сигнала после аналого-цифрового преобразования. Если на входе используется синусоида с предельным для АЦП значением амплитуды, то отношение SNR можно записать как

$$\text{SNR} = 1,5 \cdot 2^{2B}, \quad (2)$$

где B обозначает число битов АЦП.

Выражая уравнение в дБ, получаем:

$$\text{SNR}_{\text{дБ}} \approx 1,76 + 6,02B. \quad (3)$$

Переписав уравнение (3) для B , получим, дБ:

$$B \approx \frac{\text{SNR}_{\text{дБ}} - 1,76}{6,02}. \quad (4)$$

Приведенные выражения (2) – (4) показывают, как из отношения сигнал – шум может быть получено число битов B . В случае идеальных АЦП результатом для B всегда будет положительная целая величина. В случае неидеальных АЦП B может быть любым положительным действительным числом. Выражения (2) – (4) являются основой для вычисления параметра ENOB.

В предположении предельного для АЦП значения амплитуды выражение для ENOB, дБ, запишем в виде

$$\text{ENOB} \approx \frac{DR_{\text{дБ}} - 1,76}{6,02}, \quad (5)$$

где $DR_{\text{дБ}}$ – требуемый динамический диапазон проектируемого радиоприемника.

Очевидно, что обозначенное требование $DR_{\text{дБ}} \approx 140$ дБ является экстремальным для радиофотонных АЦП. Для обеспечения данного требования потребуется $\text{ENOB} = (140 - 1,76)/6,02 \approx 23$ бита. Это нереалистично для любой существующей технологии фотонных АЦП.

Однако известно, что переход к многоканальной структуре радиофотонного тракта приемника позволяет снизить требования к динамическому диапазону на один канал. Показано, что динамический диапазон, дБ, приходящийся на один канал, обратно пропорционален числу каналов [27]. Следовательно, снижаются требования по динамическому диапазону радиофотонного АЦП при сохранении общей характеристики приемника. Тогда на данном этапе проектирования необходимо подобрать число каналов радиофотонного тракта (и, следовательно, число радиофотонных АЦП в тракте) и подобрать такие АЦП, у которых ENOB и SFDR удовлетворяют требованиям по динамическому диапазону в одном канале.

Чувствительность радиопотонного АЦП предполагает такой уровень мощности входного радиосигнала, который обеспечит линейный режим работы модулятора. Для существующих технологий относительно реалистичная оценка чувствительности АЦП составляет порядка $-30\dots-20$ дБм [9]. При этом требование к чувствительности приемника будет достигаться каскадами малошумящего предварительного усилителя. Однако при проектировании радиоприемника приходится учитывать его коэффициент шума и нелинейности.

Для сверхскоростных АЦП, применяемых для построения приемных трактов радиосигналов, критическое значение имеет джиттер АЦП, определяющий такие параметры, как коэффициент шума и эффективное число разрядов ENOB. Связь между отношением сигнал/шум на выходе АЦП и джиттером определяется выражением [28]

$$\text{SNR}_{\text{out}} = 20 \lg \left[\frac{1}{2\pi f_c t_j} \right], \quad (6)$$

где f_c – частота входного сигнала; t_j – среднеквадратичный джиттер внутреннего АЦП и внешнего тактового генератора.

Анализ выражения (6) показывает, что увеличение времени джиттера, так же как и рост частоты входного сигнала, приводит к существенному снижению отношения сигнал/шум на выходе АЦП и уменьшению ENOB (рис. 2).

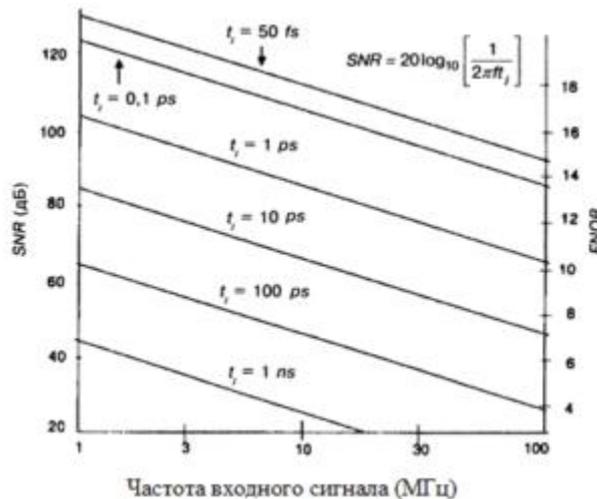


Рис. 2. Зависимость рассчитанного отношения сигнал шум на выходе АЦП от величины джиттера и частоты входного сигнала [28]

С учетом отношения сигнал/шум на выходе АЦП значение его коэффициента шума можно определить [28] следующим образом:

$$NF_{\text{АЦП}} = P_{FS} + 174 - \text{SNR}_{\text{out}} - 10 \lg(\Delta F) - 10 \lg \left(\frac{f_s}{2\Delta F} \right), \quad (7)$$

где f_s – частота дискретизации; ΔF – полоса рабочих частот; P_{FS} – мощность входного сигнала, которую можно оценить по чувствительности приемника и коэффициенту усиления предварительного усилителя:

$$P_{FS} = K_{\text{МШУ}} + P_c. \quad (8)$$

Из-за увеличения значения коэффициента шума ухудшается чувствительность проектируемого радиоприемника либо ужесточаются требования к коэффициенту усиления предварительного малошумящего усилителя.

При наличии вариантов реализации радиопотонного АЦП возможен дальнейший анализ по потребляемой мощности, сложности интеграции в систему, а также стоимости.

Рассмотрим пример оценки параметров радиофотонного тракта для следующих исходных данных: частотный диапазон – 5...25 ГГц; чувствительность –120 дБ; динамический диапазон – 140 дБ.

Полоса частот составляет $\Delta F = 25 - 5 = 20$ ГГц. Частота дискретизации по теореме Котельникова $f_s > 2f_{\max}$, для 25 ГГц это более 50 ГГц. На практике во избежание наложения спектров и упрощения фильтрации применяют передискретизацию. Для такого диапазона частоту дискретизации фотонного АЦП можно выбрать в диапазоне 60...100 ГГц.

Чтобы получить $DR = 140$ дБ, потребуется не менее трех каналов предварительного тракта. Тогда для одного канала $DR_1 = 140 / 3 \approx 47$ дБ.

ENOB 8 бит (на частоте 25 ГГц) для передовых радиофотонных АЦП обеспечит $DR \sim 50$ дБ.

Высокий SFDR критически важен для выделения слабых сигналов. Для реализации радиофотонного тракта предпочтительно использовать АЦП с SFDR свыше 100 дБ/Гц.

Для обеспечения чувствительности приемника –120 дБ потребуется предварительное усиление высококачественным малошумящим усилителем.

Проведем расчет системы усиления.

Учитывая, что чувствительность самого АЦП составляет порядка –30...–20 дБм, а требование к системе –120 дБм, необходим малошумящий усилитель с коэффициентом усиления примерно 90–100 дБ и низким коэффициентом шума. Такой большой разброс требований требует каскадирования нескольких усилителей и тщательного экранирования.

Для построения приемного тракта используем радиофотонный АЦП со следующими параметрами [1, 2, 28]: разрядность $N = 8$ бит; частота дискретизации $f_s = 100$ ГГц; ширина полосы частот полезного сигнала на входе АЦП = 20 ГГц; джиттер $t_j = 10$ фс; $P_{FS} = 10,8$ дБ [9].

Тогда

$$SNR_{\text{out}} = 20 \lg \left[\frac{1}{2\pi f_c t_j} \right] = 20 \lg \frac{1}{2\pi \cdot 25 \cdot 10^9 \cdot 10 \cdot 10^{-15}} = 56 \text{ дБ} . \quad (9)$$

Коэффициент шума

$$NF_{\text{АЦП}} = 10,8 + 174 - 56 - 10 \lg(20 \cdot 10^9) - 10 \lg(2,5) = 21,8 \text{ дБ} . \quad (10)$$

Полученные в примерах оценочные значения коэффициента шума оказываются существенно ниже, чем в работе [24]. Это может означать, что переход к фотонной базе позволяет снизить влияние некоторых видов собственных шумов, присущих электронным АЦП.

Рассмотрим расчет коэффициента шума всей системы $NF_{\text{РФ-тракт}}$:

$$NF_{\text{РФ-тракт}} = NF_{\text{МШУ}} + (NF_{\text{АЦП}} - 1) / K_{\text{МШУ}} . \quad (11)$$

Приведенное оценочное значение коэффициента усиления малошумящего усилителя примерно 100 дБ. При таком значении влияние коэффициента шума АЦП согласно формуле (11) оказывается сравнительно невелико, т. е. шум всего приемника (радиофотонного тракта) будет определяться малошумящим усилителем, преимущественно его первым каскадом. Тогда необходим малошумящий усилитель с максимально низким $NF_{\text{МШУ}}$ (например, 2–4 дБ для диапазона 1...20 ГГц) и достаточным усилением первого каскада (20–30 дБ).

На текущий момент радиофотонные АЦП – это преимущественно прототипы в лабораториях (NIST, MIT, JPL, университеты Мельбурна, Калифорнии и др.). Лишь несколько коммерческих компаний предлагают готовые изделия (Lionix International, Bright Photonics). Для реализации рассмотренного примера необходимо искать предложения с расчетными параметрами на частотах более 25 ГГц.

Справочные данные по разрядности АЦП обычно относятся к более низким частотам. На частотах более 25 ГГц значение разрядности может быть на несколько бит меньше.

При выборе архитектуры целесообразно отдавать предпочтение архитектурам, обеспечивающим высокий SFDR и работу в широкой полосе. При этом более предпочтительно использование полностью фотонных АЦП с более низким коэффициентом шума [27].

Для дальнейшего этапа проектирования необходимо [23] выполнить расчет общего коэффициента шума приемника, включающего радиофотонный АЦП и предварительный малошумящий усилитель, а также провести анализ нелинейных искажений с целью подтверждения того, что усилители не вносят интермодуляционных искажений, способных нивелировать преимущество высокого SFDR АЦП.

Можно спрогнозировать, что такая реализация радиофотонного тракта будет сопряжена со значительным увеличением затрат (до десятка миллиона рублей и выше), и, скорее всего, он будет поставляться в виде лабораторного стенда, а не серийного изделия. Это связано также с тем, что для реализации приемника с заявленными параметрами необходим радиофотонный АЦП с рекордными в настоящее время характеристиками, в частности $ENOB = 8$ бит (на частоте 25 ГГц), с $SFDR > 100$ дБ в полосе 20–25 ГГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Урик В.Дж., МакКинни Дж.Д., Вилльямс К.Дж. Основы микроволновой фотоники. М.: Техносфера, 2016. 376 с.
2. Пономарев А.К., Романов А.А., Тюлин А.Е. Фотонные технологии в космическом приборостроении // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016. № 2. С. 4–23.
3. Быстров Р.П., Соколов С.А., Черепенин В.А. Системы и устройства на основе радиофотоники применительно к радиолокации // Журнал радиоэлектроники [Электронный журнал]. 2017. № 6. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/3/text.pdf> (дата обращения: 17.10.2025).
4. Конторов С.М. и др. Многоканальный радиофотонный приемный тракт // Фотоника. 2019. № 6. С. 584–593.
5. Datasheet HMCAD5831LP9BE [Electronical Resource]. URL: <https://www.infinite-electronic.ru/datasheet/12-HMCAD5831LP9BE.pdf> (дата обращения: 17.10.2025).
6. Стариков Р.С. Фотонные АЦП // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 3. С. 3–39.
7. Chi H., Yao J.A. Photonic Analog-to-Digital Conversion Scheme Using Mach-Zehnder Modulators with Identical Half-Wave Voltages // Optics Express. 2008. Vol. 16. № 2. P. 567–572.
8. Денисов А.Е., Данилаев Д.П. О возможности расширения динамического диапазона радиоприемного устройства с фотонным АЦП // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2025. № 1 (65). С. 6–17.
9. Аннино Б., Русских М. Увеличение SFDR в высокопроизводительных АЦП // СВЧ-электроника. 2021. № 1 (16). С. 12–22.
10. Gordon Y., Komissarov D. Sukhoi Su-57: Russia's Fifth-Generation Stealth Fighter. Harpia Publishing, 2022. 224 p.
11. Naval Air Systems Command. EA-18G Growler: ALQ-218 and Next Generation Jammer Program Overview. NAVAIR Reports [Electronical Resource]. URL: www.navair.navy.mil/product/EA-18G-Growler (дата обращения: 17.10.2025).
12. Kindley D. DTIC AD1019143: EA 18G Growler Aircraft (EA 18G) [Electronical Resource]. URL: https://archive.org/details/DTIC_AD1019143 (дата обращения: 17.10.2025).
13. Бельчиков С., Бельчиков А., Дзисяк А. Линейка отечественных анализаторов спектра «СК4 БЕЛАН 140/240/280/400» до 40 ГГц // Компоненты и технологии. 2012. № 4. С. 201–206.
14. DJI. Mavic/FPV User Manuals. Частотные диапазоны и протоколы управления [Электронный ресурс]. URL: https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_FPV/20210615UM/DJI_FPV_User_Manual_v1.2_RU.pdf (дата обращения: 17.10.2025).
15. Киселев А.В., Савиных И.С. Радиопомехи и помехоустойчивый прием. Новосибирск: НГТУ, 2019. 88 с.
16. Перфилов О.Ю. Радиопомехи. М.: Горячая линия – Телеком, 2017. 110 с.
17. Смирнов А.В. Обзор беспилотных летательных аппаратов [Электронный ресурс]. URL: <https://racurs.ru/press-center/articles/bespilotnye-letatelnye-apparaty/UAV-review/?ysclid=mht0qoztth648594768> (дата обращения: 17.10.2025).
18. Беспилотные летательные аппараты BAYRAKTAR. Рекламно-техническое описание. [Электронный ресурс]. URL: <https://ak-12.livejournal.com/92835.html?ysclid=mht2u7dw4n179031998> (дата обращения: 17.10.2025).
19. Explore the Best of General Atomics MQ-9 Reaper UAV [Электронный ресурс]. URL: <https://airpra.com/explore-the-best-of-general-atomics-mq-9-reaper-uav/> (дата обращения: 17.10.2025).

20. USRP N200/N210. Руководство пользователя [Электронный ресурс]. URL: <https://sotemgroup.ru/uploads/files/USRP%20N200%2C%20N210.%20%D0%A0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%20%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8F.pdf?ysclid=mht3bp7ow6556269836> (дата обращения: 17.10.2025).
21. *Walden R.H.* Analog-to-Digital Converter Survey and Analysis // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 1999. Vol. 17. P. 539–550.
22. *Вольхин Ю.Н., Тихонов Е.В.* Обзор возможных способов реализации радиофотонных АЦП диапазона СВЧ // *Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: Материалы 5-й Юбилейной общерос. науч.-техн. конф. Омск: ОмГТУ, 2014. С. 87–104.*
23. *Danilaev D.P.* Analog-to-Digital Converter Selection for Digital Receiver // *Proc. of the Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications*, 1–3 July 2019, Yaroslavl, Russia. Article № 8813931.
24. *Забеньков И.И. и др.* Проектирование цифровых приемных устройств // *Доклады БГУИР*. 2006. № 1. С. 44–54.
25. *Боев С.Ф. и др.* Радиофотонный приемный канал СВЧ-диапазона с оптическим гетеродинированием // *Журнал радиоэлектроники*. 2015. № 2. С. 1–15.
26. *Valley G.C.* Photonic Analog-to-Digital Converters // *Optics Express*. 2007. Vol. 15. P. 1955–1982.
27. *Денисов А.Е., Данилаев Д.П.* Структура цифрового радиоприемного устройства с фотонным аналого-цифровым преобразователем // *Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова*. 2023. № 4. С. 77–85.
28. *Kester W.* Analog Digital Conversion. Analog Devices, Inc. 2005. 953 p.

Поступила в редколлегию 17.11.25

THE PARAMETERS EVALUATION OF A HIGH-DYNAMIC-RANGE RADIO-PHOTONIC RECEIVING PATH

D.P. Danilaev, A.E. Denisov, and N.G. Khairullin

This paper presents an radio systems overview, that potentially require photonics analog-to-digital converter, provided a high dynamic range, and the benefits they offer. A step-by-step algorithm for microwave path parameters estimating and the appropriate microwave analog-to-digital converter selecting is proposed, based on the specified technical characteristics of the receiver within the radio system. The parameter estimation example with using the proposed algorithm is provided.

Keywords: radio-photonic path, radio-photonic analog-to-digital converter, analog-to-digital converter selection, radio receiver, dynamic range, analog-to-digital converter parameter evaluation.

Данилаев Дмитрий Петрович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: dpdanilaev@kai.ru

Денисов Александр Евгеньевич – ассистент (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: denisov.al.ev@yandex.ru

Хайруллин Наиль Гумерович – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: mr.khayrullin.a@gmail.com

МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ФЛЮГЕРНОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ РАБОТЕ ДАТЧИКА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ УГЛОВ

Е.С. Ефремова, В.В. Солдаткин, В.М. Солдаткин,
Р.Р. Зайцева

Анализируется влияние аэродинамических углов атаки и скольжения на аэродинамические характеристики и безопасность движения самолета и других летательных аппаратов самолетной схемы в пределах атмосферы. Отмечено, что при использовании для измерения углов атаки и скольжения флюгерных датчиков аэродинамических углов на флюгерные чувствительные элементы датчиков аэродинамических углов оказывают влияние вихри Кармана, формируемые на обтекаемых поверхностях флюгера, который вынесен в набегающий воздушный поток. Рассмотрено влияние вихрей Кармана на колебание флюгерного чувствительного элемента при симметрии процессов обтекания смежных рабочих поверхностей флюгера. Обоснованы причины появления нелинейного явления «биения» аэродинамических сил, действующих на смежные обтекаемые поверхности флюгера, обусловленных вихрями Кармана флюгера. Получены модели негармонического колебания «биения» и амплитуды и частоты гармонической составляющей биения, которая вызывает колебания флюгерного чувствительного элемента и выходного сигнала датчиков аэродинамических углов, обусловленных влиянием вихрей Кармана.

Ключевые слова: аэродинамические углы, датчик, флюгерный чувствительный элемент, колебания, вихри Кармана, модели.

Введение

При пилотировании и автоматическом управлении самолетом и рядом других летательных аппаратов (ЛА) в пределах атмосферы для обеспечения безопасности полета и решения задач управления необходима информация об аэродинамических углах атаки и скольжения, определяющих аэродинамические характеристики и безопасность движения ЛА относительно окружающей воздушной среды [1–4].

Как показывает анализ [4–8], для измерения углов атаки и скольжения в авиации широко применяются флюгерные датчики аэродинамических углов, отличающиеся простотой конструкции и достаточно высокой точностью измерения в рабочих диапазонах эксплуатации. Однако на установленный в опорах флюгерный чувствительный элемент датчика, вынесенный в набегающий воздушный поток и ориентируемый по направлению набегающего потока аэродинамическими силами, действующими на флюгер, оказывают воздействия не только атмосферные возмущения набегающего потока, но и вихри Кармана [9–11], обусловленные периодическим срывом потоков со смежных рабочих обтекаемых поверхностей флюгера. При этом вихри Кармана являются причиной вынужденных колебаний флюгерного чувствительного элемента и выходного сигнала флюгерного датчика аэродинамических углов. Это затрудняет дифференцирование выходного сигнала датчиков аэродинамических углов и их использование в бортовых измерительно-вычислительных комплексах. При этом амплитуда колебаний выходного сигнала флюгерного датчика аэродинамических углов, обусловленных влиянием вихрей Кармана, на некоторых режимах полета может превышать допустимую погрешность измерения аэродинамических углов.

Это определило задачи исследования настоящей статьи по формированию математического аппарата по описанию движения флюгерного чувствительного элемента, описанию влияния вихрей Кармана флюгера на колебание флюгерного чувствительного элемента и определению возможности исключения влияния или уменьшения амплитуды колебаний флюгерного чувствительного элемента с конкретными параметрами подвижной системы, профилем и параметрами используемого флюгера в рабочих диапазонах эксплуатации флюгерного датчика аэродинамических углов.

Особенности конструктивной схемы и построение модели собственного движения флюгерного чувствительного элемента в режиме измерения аэродинамического угла

Как показывает анализ [12], флюгерный датчик аэродинамических углов конструктивно представляет собой измерительное устройство точной механики, флюгерный чувствительный элемент которого выполнен в виде установленного в набегающем потоке и вращающегося в опорах удобообтекаемого тела (флюгера), вынесенного за пределы пограничного слоя ЛА. Под действием воздушного потока флюгер ориентируется по направлению потока, и угловое положение флюгерного чувствительного элемента определяет величину и знак измеряемого аэродинамического угла в месте установки флюгерного датчика аэродинамических углов в плоскости измерения.

Приведем кинематическую схему (рис. 1, а) и геометрическую модель (рис. 1, б) флюгерного датчика аэродинамических углов, установленного в плоскости измерения контролируемого аэродинамического угла α [7, 8].

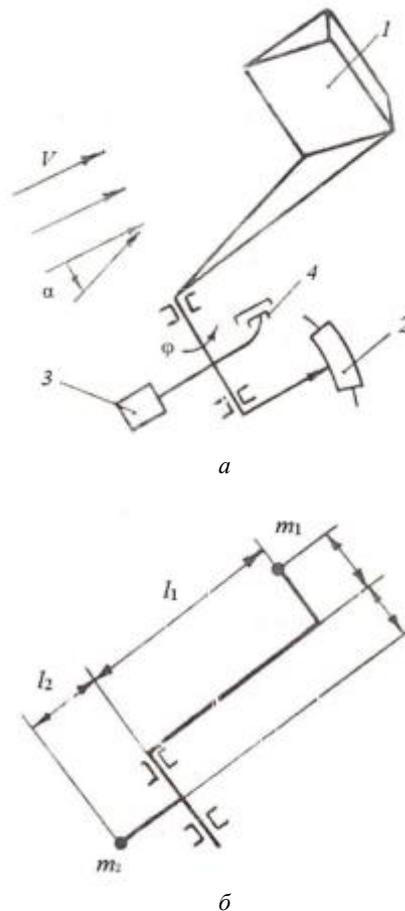


Рис. 1

Угловое положение флюгера 1 относительно продольной оси ЛА фиксируется выходным устройством, выполненным, например, в виде потенциометра 2, движок которого жестко связан с осью вращения флюгерного чувствительного элемента, на которой также установлен демпфер 4 для сглаживания колебаний подвижной системы. Для уменьшения влияния на флюгерный чувствительный элемент внешних ускорений его подвижная система балансируется относительно оси вращения с помощью груза 3.

При скорости набегающего воздушного потока $V \geq 100 \dots 150$ км/ч динамические свойства флюгерного чувствительного элемента флюгерных датчиков аэродинамических углов описываются дифференциальным уравнением вида [7]

$$I \frac{d^2\varphi}{dt^2} + C_d \frac{d\varphi}{dt} + 0,5C_y^\alpha S l_1 \rho V^2 \varphi(t) = 0,5C_y^\alpha S l_1 \rho V^2 \alpha(t), \quad (1)$$

где I – момент инерции подвижной системы флюгерного чувствительного элемента; C_d – коэффициент демпфирования подвижной системы флюгерного чувствительного элемента; $\varphi(t)$ – угловое положение флюгера относительно направления набегающего воздушного потока, по величине и знаку равный изменяемому аэродинамическому углу $\alpha(t)$; C_y^α , S – коэффициент подъемной силы профиля и площадь оперения флюгера; l_1 – расстояние от линии фокуса профиля до оси вращения флюгера; $0,5\rho V^2$ – скоростной напор набегающего потока со скоростью V и массовой плотностью воздуха ρ .

При отсутствии дополнительного встроенного демпфера собственное аэродинамическое демпфирование подвижной системы флюгерного чувствительного элемента определяется коэффициентом собственного аэродинамического демпфирования, определяемым выражением [7]

$$C_{да} = 0,5C_y^\alpha l_1 S \rho V. \quad (2)$$

Для того чтобы каждый член выражения (1) имел размерность момента силы при описании движения флюгерного чувствительного элемента, необходимо вместо массовой плотности ρ , кг/м³, использовать весовую плотность $\rho_B = \rho/g$, кг·с²/м⁴, где $g = 9,8$ м/с² – ускорение силы тяжести. С этой целью все члены уравнения (1) делят на ускорение свободного падения g . Кроме того, для получения размерности угла поворота φ подвижной системы и аэродинамического угла α , град, все члены уравнения (1), имеющие размерность радиан, равное 2π , приводят к размерности в градусах, умножив на множитель $\frac{360}{2\pi}$ град, и уравнение углового движения флюгерного чувствительного элемента принимает вид

$$I_{п} \frac{d^2\varphi}{dt^2} + C_{дп} \frac{d\varphi}{dt} + 0,5C_y^\alpha S l_1 \rho_B V^2 \varphi(t) = 0,5C_y^\alpha S \rho_B V^2 \alpha(t), \quad (3)$$

где $I_{п} = I/57,3g$ – приведенный момент инерции флюгерного чувствительного элемента, кг·м·с²/град; $C_{дп} = C_{да}/57,3g$ – приведенный коэффициент аэродинамического демпфирования подвижной системы флюгерного чувствительного элемента, кг·м·с/град.

Для упрощения записи уравнения (3) разделим члены левой и правой части уравнения (3) на множитель $0,5C_y^\alpha l_1 S \rho_B V^2$, получим

$$\frac{I_{п}}{0,5C_y^\alpha l_1 S \rho_B V^2} \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{C_{дп}}{0,5C_y^\alpha l_1 S \rho_B V^2} \frac{d\varphi}{dt} + \varphi(t) = \alpha(t). \quad (4)$$

В этом случае уравнение (4) приводят к виду

$$T_2^2 \frac{d^2\varphi}{dt^2} + T_1 \frac{d\varphi}{dt} + \varphi(t) = \alpha(t), \quad (5)$$

где

$$T_1 = \frac{C_{дп}}{0,5C_y^\alpha l_1 S \rho_B V^2}; \quad T_2 = \sqrt{\frac{I_{п}}{0,5C_y^\alpha l_1 S \rho_B V^2}}. \quad (6)$$

Обозначив $\zeta = \frac{T_1}{2T_2} = \frac{C_{дп}}{2} \sqrt{\frac{0,5C_y^\alpha l_1 S \rho_B V^2}{I_{п}}}$, получим следующую форму записи дифференциального

уравнения (5), описывающего движение флюгерного чувствительного элемента, установленного в набегающем воздушном потоке, при изменении аэродинамического угла α :

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2\zeta\omega_0 \frac{d\varphi}{dt} + \omega_0^2 \varphi(t) = \omega_0^2 \alpha(t), \quad (7)$$

где $\omega_0 = \frac{1}{T_2} = \sqrt{\frac{0,5C_y^\alpha l_1 S \rho_B V^2}{I_\Pi}}$ – собственная круговая частота недемпфированных колебаний флюгерного чувствительного элемента; ζ – безразмерный коэффициент затухания (степень успокоения) недемпфированных колебаний флюгерного чувствительного элемента.

В этом случае без дополнительного встроенного демпфера флюгерный чувствительный элемент имеет только аэродинамическое демпфирование с приведенным коэффициентом демпфирования $C_{дп}$, определяемым как

$$C_{дп} = \frac{C_{да}}{57,3g} = \frac{0,5C_y^\alpha l_1 S \rho_B V^2}{57,3}.$$

Тогда при отсутствии дополнительного встроенного демпфера

$$T_1 = \frac{C_{да}}{0,5C_y^\alpha l_1 S \rho_B V^2} = \frac{0,5C_y^\alpha l_1^2 S \rho_B V}{0,5C_y^\alpha l_1 S \rho_B V^2} = \frac{l_1}{V};$$

$$\zeta = \zeta_\alpha = \frac{T_1}{2T_2} = \frac{l_1 \sqrt{0,5C_y^\alpha l_1 S \rho_B}}{2\sqrt{I_\Pi}}. \quad (8)$$

Для рассматриваемого в работе [7] флюгерного чувствительного элемента классической схемы с флюгером, разнесенным относительно оси вращения, с расчетными параметрами $I_\Pi = 8,6 \cdot 10^{-7}$ кг·м·с²/град; $C_y^\alpha = 0,0411$ /град; $l_1 = 0,052$ м; $S = 24 \cdot 10^{-2}$ м², $\rho_B = 0,125 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^4}$ (барометрическая высота $H = 0$) при $V = 200$ км/ч получены следующие расчетные значения: $T_2 = 0,02$ с; $\zeta_\alpha = 0,05$; $\omega_0 = 2\pi f_{ca} = 49,2$ 1/с, где $f_{ca} = 8$ Гц – собственная частота недемпфированных колебаний флюгерного чувствительного элемента.

Как показывает опыт эксплуатации флюгерных датчиков аэродинамических углов, собственное (аэродинамическое) демпфирование флюгерного чувствительного элемента не обеспечивает требуемые динамические характеристики флюгерных датчиков аэродинамических углов, поэтому возникает необходимость использования дополнительного встроенного демпфера и выбора оптимального суммарного коэффициента затухания (степени успокоения) колебаний флюгерного чувствительного элемента. Известно, что с позиции минимального времени регулирования флюгерного датчика аэродинамических углов оптимальной величиной коэффициента затухания является значение $\zeta_{опт} = 0,7$, с позиции минимального значения перерегулирования значение $\zeta_{опт} = 0,8 \dots 0,9$. На практике близким к оптимальному и практически выполнимым значением коэффициента затухания является $\zeta = 0,5 \div 0,7$ [7]. Следовательно, при использовании дополнительного встроенного демпфера должно обеспечиваться условие

$$\zeta_{опт} = T_1/2T_2 = 0,5 \div 0,7. \quad (9)$$

Тогда выбор значения суммарного коэффициента демпфирования флюгерного чувствительного элемента должен удовлетворять условию

$$C_{дп} = C_{да} + C_{дв} = (0,5 \div 0,7) \sqrt{2I_\Pi C_y^\alpha l_1 S \rho_B V^2}, \quad (10)$$

где $C_{дв}$ – коэффициент демпфирования дополнительного встроенного воздушного или жидкостного демпфера.

В соответствии с амплитудно-частотной характеристикой колебательных измерительных устройств круговая частота ω_c собственных демпфированных колебаний определяется выражением [13, с. 246]

$$\omega_c = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2},$$

или, используя соотношение $\omega_0 = \sqrt{0,5C_y^\alpha l_1 S \rho_b V^2}$ для собственной круговой частоты демпфированных колебаний, получим

$$\omega_c = \sqrt{\rho_b} V \sqrt{\frac{0,5C_y^\alpha l_1 S}{I_{\Pi}}} \sqrt{1 - \zeta^2}. \quad (11)$$

Тогда уравнение, определяющее движение задемпфированного флюгерного чувствительного элемента при изменении $\alpha(t)$ измеряемого аэродинамического угла, принимает вид

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2\zeta\omega_c \frac{d\varphi}{dt} + \omega_c^2\varphi(t) = \omega_c^2\alpha(t). \quad (12)$$

Полученная модель позволяют исследовать факторы, влияющие на движение флюгерного чувствительного элемента в условиях эксплуатации флюгерного датчика аэродинамических углов, в том числе влияние вихрей Кармана.

Модели параметров вихрей Кармана и оценки их влияния на колебания флюгерного чувствительного элемента

В процессе эксплуатации флюгерного датчика аэродинамических углов на флюгерный чувствительный элемент воздействуют внешние помехи – атмосферные возмущения (турбулентность) набегающего воздушного потока, линейные и угловые ускорения и силы инерции, возникающие при криволинейной траектории движения ЛА. Кроме того, как показано в работах [9–11], вследствие процесса образования и периодического срыва вихрей со смежных обтекаемых набегающим воздушным потоком поверхностей флюгера на флюгерный чувствительный элемент действует дополнительная периодическая аэродинамическая сила $F_{\text{БК}}(t)$, обусловленная наличием периодических импульсов разряжения и повышения давления вблизи смежных обтекаемых поверхностей флюгера при срыве с его поверхности вихрей Кармана.

Модель периодической аэродинамической силы $F_{\text{БК}}(t)$, обусловленной вихрями Кармана, можно представить в виде [12]

$$F_{\text{БК}}(t) = (0,05 \div 0,08) S q \sin \frac{2\pi \text{Sh}}{d_{\text{М}}} V t = (0,05 \div 0,08) 0,5 S \rho_b V^2 \sin \omega_{\text{БК}} t, \quad (13)$$

где Sh – безразмерное число Струхала, значение которого в зоне устойчивого вихреобразования за телом флюгера находится в интервале 0,165...0,18 [9, 10], при этом Sh = 0,165 соответствует скорости V набегающего воздушного потока в области нижней границы устойчивого вихреобразования, Sh = 0,18 – верхней границе; $d_{\text{М}}$ – размер миделевого сечения флюгера; $\omega_{\text{БК}} = \frac{2\pi \text{Sh} V}{d_{\text{М}}} = 2\pi f_{\text{БК}}$ – круговая частота

вихрей Кармана, $f_{\text{БК}} = \frac{\text{Sh}}{d_{\text{М}}} V$ – частота вихрей Кармана, формируемых при обтекании флюгера; 0,05...0,08 – эмпирически полученные величины.

Как показано в работе [12], устойчивое вихреобразование на обтекаемых поверхностях флюгера наблюдается в диапазоне числа Рейнольдса $10^3 < \text{Re} < 1,6 \cdot 10^5$, где $\text{Re} = \frac{V d_{\text{М}}}{\nu}$, ν – кинематическая вязкость воздуха, зависящая от барометрической высоты полета ЛА.

Момент $M_{\text{БК}}(t)$ аэродинамической силы от вихрей Кармана, действующий на флюгерный чувствительный элемент, приведенный к весовой плотности ρ_b и размерности его угла поворота $\varphi(t)$, град, будет определяться выражением

$$M_{\text{БК}}(t) = (0,05 \div 0,08) 0,5 l_1 S \rho_b V^2 \sin \omega_{\text{БК}} t,$$

или

$$M_{\text{ВК}}(t) = \frac{0,05 \dots 0,08}{C_y^\alpha} 0,5 C_y^\alpha l_1 S \rho_B V^2 = \varphi_m 0,5 l_1 S \rho_B V^2. \quad (14)$$

Подставляя момент $M_{\text{ВК}}(t)$ в правую часть выражения (12), получим выражение, определяющее движение флюгерного чувствительного элемента из-за влияния вихрей Кармана в виде

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2\zeta\omega_c \frac{d\varphi}{dt} + \omega_c^2\varphi(t) = \omega_c^2\alpha_{\text{ВК}}(t), \quad (15)$$

где $\alpha_{\text{ВК}}(t) = \varphi_m \varphi_{\text{ВК}} \sin \omega_{\text{ВК}} t$ – колебание флюгерного чувствительного элемента, обусловленное вихрями Кармана, $\varphi_{\text{ВК}}$ – амплитуда колебаний флюгерного чувствительного элемента от вихрей Кармана, $\varphi_m = \frac{0,05 \dots 0,08}{C_y^\alpha}$ – амплитуда колебаний вихрей Кармана [11].

С учетом амплитудно-частотной характеристики демпфированного колебательного динамического звена второго порядка [13] амплитуда колебаний флюгерного чувствительного элемента, обусловленная влиянием вихрей Кармана, будет определяться выражением

$$\varphi_{\text{ВК}} = \frac{\omega_c \varphi_m}{\sqrt{\frac{(\omega_c^2 - \omega_{\text{ВК}}^2)^2}{\omega_c^2} + 4\zeta^2 \omega_{\text{ВК}}^2}}. \quad (16)$$

Для расчетного флюгерного чувствительного элемента классической схемы с флюгером, разнесенным относительно оси вращения, в соответствии с полученными моделями и параметрами флюгера и подвижной системы флюгерного чувствительного элемента ($C_y^\alpha = 0,04$ л/град, $d_m = 0,012$ м, $l_1 = 0,052$ м, $S = 24 \cdot 10^{-2}$ м², $I_{\text{п}} = 8,6 \cdot 10^{-7}$ кг·м·с²/град, $\zeta = 0,5$) при барометрической высоте $H = 0$ и скорости набегающего воздушного потока $V = 200$ км/ч получены следующие значения: $f_c = 6,92$ Гц, $f_{\text{ВК}} = \frac{0,165}{0,012} \cdot 55,5 = 763$ Гц, $\varphi_m = \frac{0,05 \dots 0,08}{0,04} = 1,25 \div 2^\circ$, расчетная амплитуда круговых колебаний флюгерного чувствительного элемента, обусловленная влиянием вихрей Кармана, $\varphi_{\text{ВК}} = (0,015 \div 0,06)^\circ$. Следовательно, вихри Кармана из-за существенно (более чем в 100 раз) больших частот $f_{\text{ВК}}$ в сравнении с собственной частотой f_c колебаний флюгерного чувствительного элемента не оказывают влияние на колебания флюгерного чувствительного элемента в рабочих диапазонах эксплуатации флюгерного датчика аэродинамических углов.

Обоснование причины и формирование методики определения влияния вихрей Кармана на колебание флюгерного чувствительного элемента флюгерного датчика аэродинамических углов

Процесс образования вихрей Кармана при симметрии обтекания рабочих поверхностей флюгера, расположенного в набегающем воздушном потоке, можно представить в виде срыва потоков, обусловленных обтеканием двух смежных рабочих поверхностей флюгера (например, в виде клиновидного тела), сдвинутых по фазе на угол 180° .

При одинаковых площадях S_1, S_2 смежных обтекаемых рабочих поверхностей, одинаковой неплоскости – кривизны f_1 и f_2 смежных обтекаемых поверхностей флюгера – амплитуды P_1, P_2 импульсов давления-разрежения, действующие на смежные обтекаемые поверхности флюгера при срыве вихрей с их поверхностей, будут одинаковы. В этом случае амплитуды F_1, F_2 аэродинамических сил, приложенные на линии фокуса смежных обтекаемых поверхностей, и моменты M_1, M_2 аэродинамических сил, дей-

ствующих на смежные поверхности флюгера, будут одинаковы. Тогда образованные при срыве потоки с поверхностями флюгера представляют собой гармонические колебания с амплитудой φ_m и круговой частотой ω_{BK} , которые не приводят к колебаниям флюгерного чувствительного элемента и выходного сигнала флюгерного датчика аэродинамических углов.

При изготовлении флюгера линейные размеры и кривизна смежных рабочих поверхностей выполняются с определенной (но разной) точностью, которая является причиной их различия и нарушения симметричности их обтекания набегающим воздушным потоком.

Характерным примером несимметрии процессов обтекания смежных рабочих поверхностей клиновидного флюгера является отклонение при изготовлении размера основания клина в одну сторону на величину ΔD , что приводит к увеличению длины l одной смежной поверхности флюгера на величину Δl и увеличению угла γ обтекания одной смежной поверхности флюгера на величину $\Delta\gamma$ (рис. 2, а) [7].

Другая причина нарушения симметрии обтекания на примере крыловидного флюгера из-за искривления (неплоскостности f) профиля одной смежной поверхности показана на рис. 2, б [7]. Вследствие тормозящего влияния обтекаемой поверхности флюгера из-за вязкости воздуха образуется пограничный слой δ_1 , который оттесняет внешний поток воздуха от стенки профиля флюгера. Из-за неплоскостности поверхности профиля флюгера внешний поток обтекает не действительное тело флюгера, а тело, увеличенное на величину вытеснения δ . Следовательно, и неплоскостность f одной из смежных поверхностей клиновидного профиля нарушает симметрию обтекания клиновидного флюгера. При этом несимметрия обтекания флюгера в рассмотренных примерах приводит к изменению Δd_m размера миделевого сечения d_m флюгера с неплоской поверхностью.

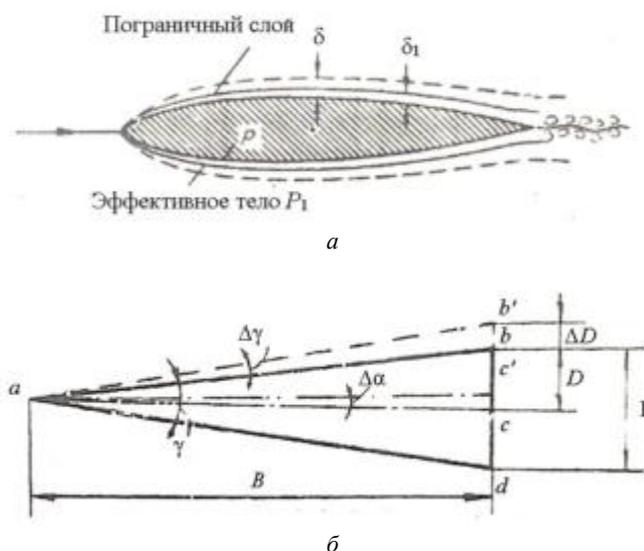


Рис. 2

Таким образом, возможные причины несимметрии обтекания смежных рабочих поверхностей флюгера приводят к тому, что процессы обтекания его смежных рабочих поверхностей происходят с различными интервалами времени t_1, t_2 срывов потока с их поверхностями и, следовательно, с различными круговыми частотами ω_1, ω_2 вихреобразования и амплитудами давлений и сил, действующих на смежные поверхности флюгера с близкими амплитудами и частотами, но с различными фазами.

Движение флюгерного чувствительного элемента, полученное при наложении двух гармонически изменяющихся аэродинамических сил и моментов с разными и близкими амплитудами F_1, F_2 и M_1, M_2 и с близкими круговыми частотами ω_1 и ω_2 , является нелинейным процессом «биения» [13, 14]. Так как значения круговых частот ω_1 и ω_2 являются близкими по величине, то их разность $|\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2|$ – малая

величина, и частоты суммируемых колебаний согласно работе [15, 16] можно выразить через среднее значение $\bar{\omega}$ круговых частот складываемых колебаний, т. е.

$$\omega_1 = \bar{\omega} - \frac{1}{2}\Delta\omega ; \omega_2 = \bar{\omega} + \frac{1}{2}\Delta\omega ; \bar{\omega} = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2). \quad (17)$$

При этом амплитуды суммируемых аэродинамических сил равны

$$F_1 = A_1 \cos\left(\bar{\omega}t - \frac{1}{2}\Delta\omega t\right); F_2 = A_2 \cos\left(\bar{\omega}t + \varphi_0 + \frac{1}{2}\Delta\omega t\right). \quad (18)$$

Как показано в работе [15], результирующая аэродинамическая сила $F(\omega)$, действующая на флюгер, описывается уравнениями

$$F(\omega) = A(t) \cos \Omega t ; A^2(t) = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta\omega t ; \Omega \approx \bar{\omega} + \frac{1}{2} \frac{A_2 - A_1}{A_1 + A_2} \Delta\omega. \quad (19)$$

График изменения результирующей негармонической силы $F(\omega)$, действующей на флюгер при биении, приведен на рис. 3.

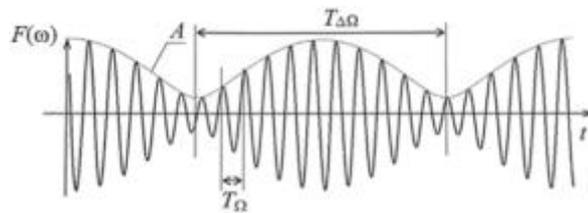


Рис. 3

Круговая частота $\Delta\omega$, равная разности накладываемых частот колебания аэродинамических сил, действующих на смежные обтекаемые поверхности флюгера, называется круговой частотой гармонического колебания биения с периодом $T_{\Delta\omega} = \frac{2\pi}{\Delta\omega}$. Период T_{Ω} осредненной частоты $\bar{\omega}$ в виде полусуммы частот ω_1, ω_2 колебаний аэродинамических сил, действующих на смежные обтекаемые поверхности флюгера, равен $T_{\Omega} = \frac{2\pi}{\bar{\omega}} = \frac{4\pi}{\omega_1 + \omega_2} = \frac{2\pi}{\omega_{ВК}}$.

Таким образом, при несимметрии обтекания смежных рабочих поверхностей флюгера амплитуда колебания вихрей Кармана модулирована по амплитуде гармоническим колебанием биения. При этом амплитуда A гармонического колебания биения за период $T_{\Delta\omega} = \frac{2\pi}{\Delta\omega}$ медленно изменяется от значения $|A_1 - A_2|$ до значения $A_1 + A_2$, а круговая частота биения $\Delta\omega$ существенно меньше усредненной частоты $\bar{\omega}$, близкой к частоте $\omega_{ВК}$ вихрей Кармана, которые не воспринимаются флюгерным чувствительным элементом. Так как соотношение $\frac{\Delta\omega}{\omega_{ВК}} \ll 1$, то колебания с частотой биения уже воспринимаются и влияют на колебания флюгерного чувствительного элемента и выходного сигнала флюгерного датчика аэродинамических углов.

Применительно к биению вихрей, формирующихся за клиновидным флюгером, частоты срыва вихрей с несимметричной f_1 и симметричной f_2 смежных поверхностей, например, из-за изменения Δd_m миделевого размера профиля флюгера будут определяться как

$$f_1 = \frac{Sh}{d_m + \Delta d_m} V ; f_2 = \frac{Sh}{d_m} V. \quad (20)$$

Тогда частота биения $\Delta f_{ВК}$ вихрей Кармана будет определяться выражением

$$\Delta f_{ВК} = f_2 - f_1 = \left(\frac{Sh}{d_m} - \frac{Sh}{\Delta d_m} \right) V. \quad (21)$$

При этом амплитуда A аэродинамической силы гармонического колебания биения будет близка к амплитуде вихрей Кармана, т. е.

$$A \approx \varphi_m = \frac{0,05 \div 0,08}{C_y^\alpha}, \quad (22)$$

где C_y^α – коэффициент подъемной силы профиля флюгера.

В соответствии с амплитудно-частотной характеристикой колебательной динамической системы второго порядка флюгерного датчика аэродинамических углов [12] с учетом частоты собственных колебаний f_c флюгерного чувствительного элемента амплитуда $\varphi_{\text{ВК}}$ гармонического колебания биения, обусловленная влиянием вихрей Кармана, будет определяться выражением (16).

Для апробации полученных математических моделей и методики определения возникновения явления биения и колебаний флюгерного чувствительного элемента, обусловленных влиянием вихрей Кармана, при наличии несимметрии обтекания смежных рабочих поверхностей флюгера Δd_m проведены расчеты для рассматриваемого клиновидного флюгера с расчетными параметрами $C_y^\alpha = 0,041/\text{град}$, $d_m = 0,012 \text{ м}$; $l_1 = 0,052 \text{ м}$, $S = 24 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $I_{\text{ц}} = 8,6 \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2/\text{град}$, $\zeta = \zeta_{\text{опт}} = 0,5$. При $\Delta d_m = 0,1 \text{ мм}$ при барометрической высоте $H = 0$ и различных значениях скорости V набегающего воздушного потока в диапазоне $50 \dots 800 \text{ км/ч}$ расчетные значения амплитуды колебаний флюгерного элемента практически одинаковы и близки по величине к амплитуде φ_m колебаний вихрей Кармана. Это свидетельствует о том, что при таком уровне несимметрии обтекания смежных рабочих поверхностей флюгера (в 120 раз меньше размера d_m) эффект биения не проявляется и вихри Кармана не воспринимаются флюгерным чувствительным элементом.

При увеличении уровня несимметрии до значения $\Delta d_m = 0,2 \text{ мм}$ (в 60 раз меньше размера d_m) при $H = 0$ и изменении скорости V в диапазоне $50 \dots 800 \text{ км/ч}$ расчетное значение амплитуды колебаний флюгерного чувствительного элемента, обусловленное биением вихрей Кармана, определяется значением $\Delta\varphi_{\text{ВК}} = 0,41 \div 0,66^\circ$, при $H = 5000 \text{ м}$ уменьшается до $\Delta\varphi_{\text{ВК}} = 0,19 \div 0,31^\circ$, при $H = 10000 \text{ м}$ – до значения $\Delta\varphi_{\text{ВК}} = 0,12 \div 0,19^\circ$.

Таким образом, при отсутствии несимметрии процесса обтекания смежных рабочих поверхностей флюгера вихри Кармана не влияют на вынужденные колебания флюгерного чувствительного элемента и выходного сигнала флюгерного датчика аэродинамических углов.

Колебания расчетного флюгерного чувствительного элемента при уровне несимметрии $\Delta d_m = 0,1 \text{ мм}$ в 120 раз меньше размера d_m миделевого сечения флюгера, поэтому вихри Кармана также не влияют на работу флюгерного чувствительного элемента, так как не приводят к появлению эффекта «биения» при значении барометрической высоты полета H вблизи Земли.

При уровне несимметрии обтекания смежных рабочих поверхностей $\Delta d_m = 0,2 \text{ мм}$, обусловленном как отклонением размера d_m , так и нарушением плоскости (кривизной) той же несимметричной обтекаемой смежной поверхностью, наблюдается нелинейный процесс «биения» аэродинамических сил смежных рабочих обтекаемых поверхностей, при котором гармоническая составляющая процесса «биения» существенно меньше частоты вихрей Кармана и является причиной колебания флюгерного чувствительного элемента, амплитуда которого не зависит от скорости набегающего потока и при $H = 0$ определяется расчетным значением $\Delta\varphi_{\text{ВК}} = 0,41 \div 0,66^\circ$, при $H = 5000 \text{ м}$ и $H = 10000 \text{ м}$ уменьшается до значений $\Delta\varphi_{\text{ВК}} = 0,19 \div 0,31^\circ$ и $\Delta\varphi_{\text{ВК}} = 0,12 \div 0,19^\circ$.

Как показывает анализ, результаты исследования позволяют решать задачу исключения влияния вихрей Кармана на колебания флюгерного чувствительного элемента, а также задачу формирования параметров процесса «биения», обеспечивающих что уменьшение амплитуды колебаний флюгерного чув-

ствительного элемента и выходного сигнала флюгерного датчика аэродинамических углов до уровня допустимой погрешности измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Практическая аэродинамика маневренных самолетов / Под общ. ред. Н.М. Лысенко. М.: Воениздат, 1977. 439 с.
2. Боднер В.А. Системы управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1973. 504 с.
3. Филатов Г.А., Пуминова Г.Г., Сильвестров П.В. Безопасность полетов в возмущенной атмосфере. М.: Транспорт, 1992. 273 с.
4. Макаров Н.Н. Системы обеспечения безопасности функционирования бортового эргатического комплекса: Теория, проектирование, применение. М.: Машиностроение / Машиностроение-Полет, 2009. 760 с.
5. Клюев Г.И., Солдаткин В.М. Расчет погрешностей флюгерного датчика аэродинамических углов. Ульяновск: Ульяновск. политехн. ин-т, 1990. 40 с.
6. Солдаткин В.М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001. 448 с.
7. Клюев Г.И. и др. Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов. Ульяновск: УлГТУ, 2005. 509 с.
8. Авиационные приборы, измерительно-вычислительные системы и комплексы: Принципы построения, алгоритмы обработки информации, характеристики и погрешности / Под ред. В.М. Солдаткина. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. 526 с.
9. Киясбейли А.Ш., Перельштейн М.Е. Вихревые измерительные приборы. М.: Машиностроение, 1972. 152 с.
10. Ефремова Е.С. Теоретические основы построения вихрей системы измерения высотно-скоростных параметров дозвукового летательного аппарата // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 9-2. С. 166–176.
11. Ефремова Е.С., Солдаткин В.М. Построение и погрешности системы воздушных сигналов на основе вихревого метода // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. 63. № 8. С. 749–755.
12. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной среды. М.: Гостехиздат, 1946. 168 с.
13. Солдаткин В.М., Порунов А.А., Солдаткин В.В. Основы проектирования измерительных приборов и систем. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. 380 с.
14. Клименко С.Ю., Савинов А.П. Математическое моделирование биений, возникающих при суперпозиции акустических сигналов // Известия Томского политехнического университета. 2010. № 2. С. 135–142.
15. Гнюсов К.С., Савинов А.П. Экспериментальное исследование условий возникновения низкочастотной модуляции биения огибающей // Современная техника и технологии: Тр. 13-й Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. Томск: ТПУ, 2007. Т. 2. С. 316–318.
16. Ревинская О.Г., Кравченко Н.С. Сложение колебаний биения. Томск: ТПУ, 2022. 21 с.

Поступила в редколлегию 29.10.25

MODELS OF MOVEMENT OF A WEATHER VANE SENSING ELEMENT DURING OPERATION OF AN AERODYNAMIC ANGLE SENSOR

E.S. Efremova, V.V. Soldatkin, V.M. Soldatkin, and R.R. Zaitseva

The influence of aerodynamic angles of attack and glide on the aerodynamic characteristics and safety of aircraft and other aircraft of the aircraft circuit within the atmosphere is indicated. It has been noted that when using aerodynamic angle vane sensors to measure angles of attack and glide, the vane sensitive elements of the aerodynamic angle vane sensors are affected by the Karman vortices formed on the streamlined surfaces of the vane, which is exposed to the incoming airflow. The influence of the Karman vortices on the oscillation of the weather vane sensitive element is considered in the case of symmetry of the flow processes of adjacent working surfaces of the weather vane. The reasons of the appearance of the nonlinear phenomenon of "beats" of aerodynamic forces acting on adjacent streamlined surfaces of the weather vane, caused by the Karman vortices of the weather vane, are substantiated. Models of

the non-harmonic "beat" oscillation and the amplitude and frequency of the harmonic component of the beat, which causes oscillations of the weather vane sensor element and the aerodynamic angle vane sensors output signal due to the influence of the Karman vortices, have been obtained.

Keywords: aerodynamic angles, sensor, weathervane sensor, fluctuations, Karman vortices, models.

Ефремова Елена Сергеевна – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: soldatkina1991@bk.ru

Солдаткин Вячеслав Владимирович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Солдаткин Владимир Михайлович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Зайцева Регина Рустемовна – студент (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: soldatkina1991@bk.ru

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

В.К. Козлов, И.М. Минегалиев, Д.М. Валиуллина, А.Х. Сабитов

Предложен способ измерения влагосодержания трансформаторного масла, основанный на измерении температуры фазового перехода, при которой происходит изменение оптической плотности масла. Способ включает построение регрессионной зависимости, которая позволяет с коэффициентом корреляции (98 %) оценить уровень влагосодержания в исследуемом образце масла.

Ключевые слова: трансформаторное масло, влагосодержание, оптическая плотность.

Трансформаторное масло, являющееся продуктом нефтепереработки, играет ключевую роль в обеспечении работоспособности электротехнического оборудования благодаря комплексу эксплуатационных свойств, включающих электрическую изоляцию, гашение электрической дуги, эффективный отвод тепла, а также защиту твердой изоляции от воздействия влаги и кислорода. Наличие антиокислительных свойств способствует повышению надежности и увеличению срока службы систем электрооборудования, в состав которых входят силовые и измерительные трансформаторы, реакторы и масляные выключатели. Однако в процессе эксплуатации масло подвергается старению, что проявляется в изменении его химических и электрофизических свойств, а также структурно-группового состава [1–4]. Это происходит из-за окислительных процессов, накопления загрязнений и примесей, ускоряемых присутствием воды и кислорода.

Контроль влагосодержания трансформаторного масла является одним из ключевых направлений диагностики состояния изоляционной системы силовых трансформаторов. Наличие воды в системе «масло – твердая изоляция» приводит к деградации электрической прочности, ускоренному старению изоляции и росту вероятности отказов высоковольтного оборудования [5–7]. Источниками влаги являются как внешние факторы (подсос воздуха, утечки), так и внутренние процессы – химическое старение масла и целлюлозы, сопровождающееся образованием полярных соединений, способствующих удержанию и растворению влаги. Таким образом, разработка точных и технологичных методов определения микроконцентраций воды в жидком диэлектрике остается актуальной задачей.

Вода в масле может находиться в трех формах – связанной, растворенной и эмульсионной. Растворенная вода распределена на молекулярном уровне и при нормальных условиях практически не влияет на изоляционные характеристики масла, однако вследствие ее конденсации при понижении температуры образуется эмульсия, что увеличивает диэлектрические потери [8, 9]. Связанная вода – это влага, химически или физически удерживаемая целлюлозной изоляцией и продуктами окисления масла, не существующая в свободной фазе и вызывающая ускоренное старение и снижение электрической прочности изоляционной системы. Она не способна свободно мигрировать, не определяется стандартными методами анализа воды в масле и способствует старению и снижению электрической прочности изоляционной системы [10]. При быстром охлаждении оборудования, например при снижении нагрузки, растворенная вода переходит в эмульсию, способствуя диффузии влаги в целлюлозу, что повышает риск пробоев при включении высоковольтного оборудования. Для предотвращения подобных ситуаций необходим своевременный контроль содержания влаги в масле, требующий правильного отбора проб и выбора адекватного метода анализа.

Кулонометрическое титрование по Карлу Фишеру – метод, признанный на мировом уровне [11]. Реактив Фишера обеспечивает разрушение всех форм воды – растворенной, эмульсионной, коллоидной, а также воды, связанной с полярными продуктами старения. Именно поэтому метод Карла Фишера считается методом определения общего влагосодержания. Его точность подтверждена межлабораторными

исследованиями, однако метод имеет ряд недостатков: чувствительность к загрязнениям, необходимость расходных реактивов, сложность анализа старых, окисленных масел [12].

Традиционно применяемый гидридно-кальциевый метод основан на химическом взаимодействии гидрида кальция с водой с последующим количественным определением объема выделяющегося водорода. Он характеризуется низкой чувствительностью (порог примерно 10–50 ppm), высокой трудоемкостью (до нескольких часов на пробу) и требует хрупкого герметичного оборудования, поэтому метод небезопасен и неудобен для практического использования. Его применение также ограничено узким диапазоном измерений, требуется тщательная калибровка, а гидрид кальция необходимо хранить под инертной атмосферой, чтобы избежать деградации. В связи с этим гидрид-кальциевый метод не применяется для современного высокоточного контроля воды в трансформаторных маслах [13].

Газохроматографические методы обеспечивают высокую чувствительность и позволяют количественно определять воду в трансформаторном масле. Однако их применение ограничено сложной подготовкой проб, зависимостью результатов от состава масла и необходимостью индивидуальной калибровки. Метод также демонстрирует низкую воспроизводимость из-за влияния температуры, давления и состояния оборудования. Кроме того, анализ требует дорогостоящего оборудования, квалифицированного персонала и занимает значительное время, в связи с чем его применение для регулярного мониторинга нецелесообразно. Все эти факторы препятствуют широкому практическому использованию газохроматографии для контроля влаги в масле [14].

В последнее время особое внимание уделяется аналитическим методам определения влагосодержания в трансформаторных маслах, основанным на использовании инфракрасной, ядерно-магнитной спектроскопии [15, 16]. Указанные методы отличаются повышенной чувствительностью к различным формам воды. Благодаря высокой спектральной селективности и возможности регистрации тонких изменений в химическом окружении молекул воды они обеспечивают более глубокое исследование механизма взаимодействия влаги с продуктами окисления масла и компонентами твердой изоляции.

Согласно способу определения влагосодержания трансформаторного масла [17] измерение осуществляется на основе регистрации изменения оптических характеристик масла при локальном охлаждении. Метод предполагает помещение в контролируемый объем жидкости охлаждающего элемента, что позволяет обеспечить постепенное снижение локальной температуры масла. Температура в зоне охлаждения измеряется при помощи чувствительного термодатчика.

Одновременно в исследуемый объем направляется излучение в спектральном диапазоне 550...700 нм. Измерение мощности отраженного излучения производится под углом 90° относительно падающего потока. По мере снижения температуры происходит конденсация растворенной воды, что приводит к образованию микрокапель и, как следствие, резкому росту интенсивности отраженного излучения. Момент такого скачкообразного изменения фиксируется как температура «точки росы» трансформаторного масла, являющаяся диагностическим параметром для последующего вычисления влагосодержания.

Однако применение данного метода сопряжено с определенным ограничением. Для корректного расчета влаги необходима предварительная информация о массовой доле ароматических углеводородов в масле, так как она непосредственно включена в расчетную формулу. Это усложняет практическую реализацию метода, поскольку требует дополнительных анализов состава масла, увеличивая трудоемкость и стоимость измерений.

Целью данной работы является разработка и экспериментальная проверка способа измерения влагосодержания трансформаторного масла, основанного на анализе температурной зависимости его оптической плотности.

Предлагаемый способ измерения влагосодержания трансформаторного масла основан на регистрации температуры, при которой наблюдается изменение его оптической плотности. Способ базируется на физическом принципе фазового перехода воды, находящейся в масле. При понижении температуры растворимость воды снижается, что приводит к частичной конденсации влаги с образованием микроэмульсий либо кристаллизации гидратированных структур. Эти процессы изменяют коэффициент пропускания и рассеяния света в объеме масла, что проявляется в фиксируемом изменении его оптической плотности.

Схема экспериментальной установки и основные ее элементы приведены на рис. 1.



Рис. 1

Калибровка способа проводилась на образцах наиболее распространенного в энергетике трансформаторного масла марки ГК (ТУ 38.1011025-85) с известным влагосодержанием, подготовленных по методике [18], что позволило установить зависимость между температурой фазового перехода и влагосодержанием.

Процедура проведения эксперимента заключается в следующем.

В цилиндрическую кювету помещают исследуемый образец трансформаторного масла. Подключают источник питания к термоэлектрическому модулю (ТЕС1-12706) и начинают постепенное охлаждение масла. Температура снижается с контролируемой скоростью, при этом наблюдается прозрачность масла при визуальном контроле. Визуально наблюдается изменение оптической плотности масла, и термопарой фиксируется температура начала фазового перехода.

В таблице указаны значения влагосодержания трансформаторных масел и температуры изменения оптической плотности.

Характеристики образцов	Номер образца												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Влагосодержание C , г/т	11,3	12	11,6	12,4	14,1	13,5	16,3	20,5	25,2	29,6	39,6	37,5	37,3
Температура изменения оптической плотности t , °C	-11,5	-11,1	-10,8	-10,2	-9,2	-8,8	-7,6	-5,6	-4	-3,1	-2	-1,6	-1,7

Построена зависимость температуры фазового перехода от влагосодержания в масле, проведена полиномиальная аппроксимация и получена регрессионная зависимость (рис. 2) для определения влагосодержания в трансформаторном масле марки ГК.

Влагосодержание исследуемого образца определяется по регрессионной зависимости. В качестве математической зависимости используется формула

$$C = 0,29t^2 + 6,51t + 48,08 ,$$

где C – влагосодержание трансформаторного масла, г/г; t – температура фазового перехода трансформаторного масла, °С.

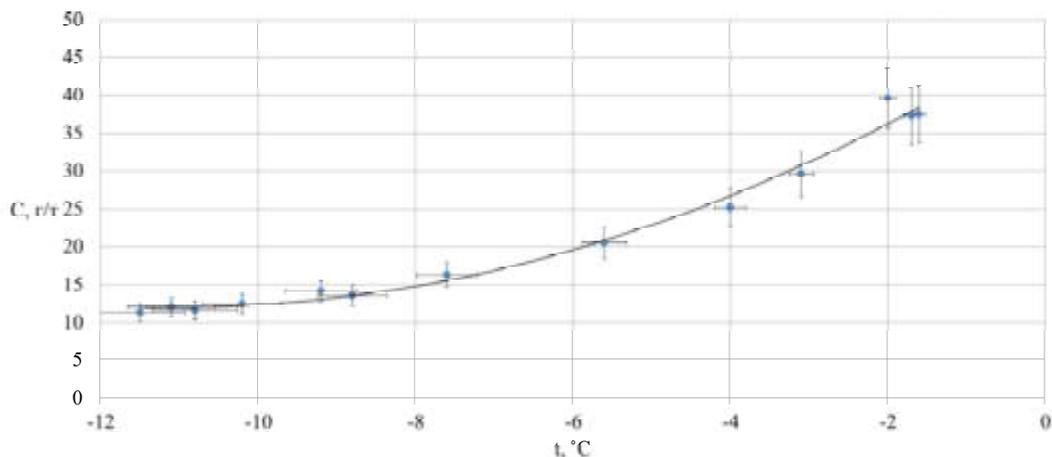


Рис. 2

Предложенный способ определения влагосодержания трансформаторного масла, в отличие от всех других приведенных способов, позволяет реализовать измерение влагосодержания непосредственно на работающем трансформаторе. Применение приборного контроля оптической плотности (не визуального) и использование более точного измерения температуры масла позволит повысить точностные характеристики устройства измерения влагосодержания.

Таким образом, показана работоспособность предложенного способа на примере трансформаторного масла марки ГК, относящейся к третьей группе по антиокислительной стойкости.

Предложенный способ позволяет по установленной регрессионной зависимости с коэффициентом корреляции в 98 % определять влагосодержание трансформаторного масла без использования дополнительных реагентов и сложных расчетов.

Оценка относительной погрешности способа определения влагосодержания трансформаторного масла марки ГК не превышает 10 %.

Регрессионная зависимость в виде полинома второго порядка с эмпирическими коэффициентами $a_1 = 0,29$, $a_2 = 6,51$, $a_3 = 48,08$ пригодна для третьей группы трансформаторных масел по антиокислительной стойкости.

Коэффициенты для каждого типа масел могут определяться опытным путем по предложенной методике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Литтейн Р.А., Шахнович М.И.* Трансформаторное масло. М.: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
2. Сборник распорядительных материалов по эксплуатации энергосистем. Электротехническая часть: в 2 ч. [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293819/4293819593.pdf> (дата обращения: 15.11.2025).
3. *Wilson A.C.M.* Insulating Liquids: Their Uses, Manufacture and Properties. London: Institution of Engineering & Technology, 1980. 221 p.
4. *Валиуллина Д.М., Козлов В.К., Садыков Э.М.* Исследование корреляций между характеристиками трансформаторного масла // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2021. № 1. С. 62–66.
5. *Arakelian V.G., Fofana I.* Water in Oil-Filled High-Voltage Equipment. Part I: States, Solubility and Equilibrium in Insulating Materials // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2007. Vol. 23. № 4. P. 15–27.
6. *Arakelian V.G., Fofana I.* Water in Oil-Filled High-Voltage Equipment. Part II: Water Content as Physicochemical Tools for Insulation Condition Diagnostic // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2007. Vol. 23. № 5. P. 15–24.
7. *Лютикова М.Н., Коробейников С.М., Ридель А.В.* Анализ образования капель воды в трансформаторном масле и влияние на пробивную прочность жидкого диэлектрика // Промышленная энергетика. 2020. № 5. С. 18–24.

8. *N'cho J.S. et al.* Review of Physicochemical-Based Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers // *Energies*. 2016. № 9 (5). Article № 367.
9. *Аракелян В.Г.* Диагностика состояния изоляции маслонаполненного оборудования по влаго-содержанию масла // *Электротехника*. 2004. № 3. С. 34–39.
10. *Коробейников С.М.* Диэлектрические материалы. Новосибирск: НГТУ, 2000. 67 с.
11. IEC 60814:1997. Insulating liquids – Oil-Impregnated Paper and Pressboard – Determination of Water by Automatic Coulometric Karl Fischer Titration. Geneva: International Electrotechnical Commission, 1997. 43 p.
12. *Margolis S.A.* Sources of Systematic Bias Reflected in an ASTM Collaborative Study on Water in Oil Measured by the Karl Fischer Method // *Electrical Insulating Materials: International Issues / Ed. M.M. Hirschler*. USA: American Society for Testing and Materials, 2000. P. 59–69.
13. *Arsad S.R. et al.* Water Content in Transformer Insulation System: A Review on the Detection and Quantification Methods // *Energies*. 2023. Vol. 16. Article № 1920.
14. *Zhao D. et al.* A Review of Methods for Measuring Oil Moisture // *Measurement*. 2023. Vol. 217. Article 113119.
15. *Kozlov V., Turanov A.* Transformer Oil and Modern Physics // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2012. Vol. 19. № 5. P. 1485–1497.
16. *Volkov M., Turanova O., Turanov A.* Determination of Moisture Content of Insulating Oil by NMR Method with Selective Pulses // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2018. Vol. 25. № 5. P. 1989–1991.
17. *Широков А.В. и др.* Способ измерения влагосодержания трансформаторного масла: пат. 2447420 Рос. Федерация, № 2010150041/28; заявл. 6.12.2010; опубл. 10.04.2012.
18. *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.

Поступила в редколлегию 15.12.25

METHOD FOR MEASURING THE MOISTURE CONTENT OF TRANSFORMER OIL BASED ON THE RECORDING OF THE PHASE TRANSITION TEMPERATURE

V.K. Kozlov, I.M. Minegaliev, D.M. Valiullina, and A.Kh. Sabitov

A method for measuring the moisture content of transformer oil is proposed, based on measuring the phase transition temperature at which the optical density of the oil changes. The method involves constructing a regression curve, which allows the moisture content in the oil sample to be estimated with a correlation coefficient of 98%.

Keywords: transformer oil, 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

Валиуллина Дилия Мансуровна – канд. техн. наук (КГЭУ, Казань)

E-mail: valiullinadiliya@mail.ru

Сабитов Айдар Хайдарович – канд. техн. наук (КГЭУ, Казань)

E-mail: sabitov_ah@mail.ru

РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО МЕТОДА БИОТЕСТИРОВАНИЯ ВОДНЫХ ПРОБ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ИНФУЗОРИЙ *PARAMECIUM CAUDATUM*

А. Соколов, И.В. Веженкова, М.И. Семенова

Рассмотрены результаты разработки и апробации аппаратно-программного метода биотестирования, основанного на анализе вертикального распределения и двигательной активности инфузорий *Paramecium caudatum*. Представлены экспериментальные данные, отражающие изменение поведенческих параметров инфузорий под воздействием модельного токсиканта (сульфата меди). Получены калибровочные зависимости скорости движения и средневзвешенной высоты положения клеток от концентрации токсиканта. Предложен интегральный показатель – биологически эквивалентная концентрация для количественной оценки токсичности. Установлена высокая согласованность результатов с аттестованным прибором «Биотестер-2М».

Ключевые слова: биотестирование, *Paramecium caudatum*, цифровая обработка изображений.

В условиях роста антропогенного воздействия и усложнения состава природных сред вопросы мониторинга и оценки качества окружающей среды особенно актуальны. Увеличение объемов промышленного производства, расширение городских территорий и рост коммунально-бытовых стоков приводят к загрязнению воды, почв и донных отложений. Формирование многокомпонентных смесей загрязнителей, изменяющих свойства среды быстрее, чем это выявляют традиционные аналитические методы, требует применения подходов, способных фиксировать ранние биологические признаки неблагоприятного воздействия [1–3].

Биотестирование является одним из наиболее информативных методов оценки токсичности природных и техногенных сред. Данный метод основан на использовании живых тест-организмов, чьи поведенческие, физиологические или метаболические реакции служат индикаторами влияния химических факторов. В отличие от химического анализа, который позволяет определять концентрации отдельных веществ, биотестирование фиксирует суммарный биологический эффект многокомпонентных загрязнений, включая трудноопределяемые соединения. Для этого применяются разные группы тест-организмов; выбор конкретного объекта определяется его чувствительностью, уровнем биологической организации и требуемой оперативностью анализа. В практике биотестирования используют бактерии, водоросли, инфузории, ракообразные и рыбы, что обеспечивает возможность комплексной оценки экологического состояния [3].

Основные задачи биотестирования включают определение степени токсичности проб, выявление потенциальных эффектов для различных уровней организации живых систем и оценку возможных долгосрочных последствий загрязнения. Разнообразие тест-организмов позволяет адаптировать методики под конкретные цели. Традиционные методики биотестирования, включая тесты на ингибирование роста микроводорослей, биолюминесцентные анализы и методы, основанные на реакции беспозвоночных, доказали свою эффективность, однако их применение ограничено, особенно при необходимости оперативного мониторинга. Большая длительность анализа, сложность подготовки культур и применение специализированного лабораторного оборудования затрудняют использование аккредитованных методик вне стационарных лабораторий. Кроме того, многие методы не учитывают влияние внешних факторов – освещенности, микронеоднородности среды или особенностей подготовки проб, – что может отражаться на точности оценок [4–7].

Отдельной проблемой является ограниченность интегральных показателей. Такие показатели фиксируют суммарный отклик популяции, но не отражают пространственно-временную структуру поведения организмов. Между тем игнорирование этих характеристик может приводить к неполному или иска-

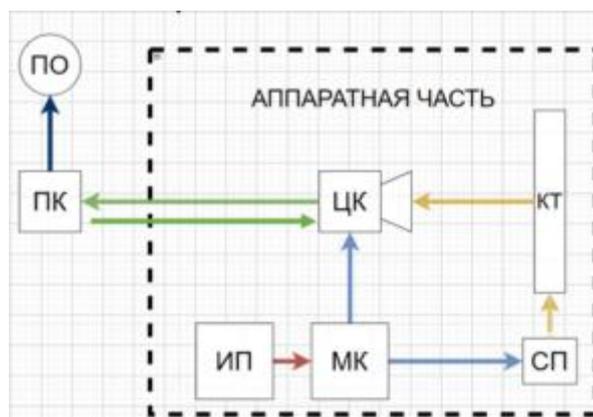
женному пониманию механизма действия токсикантов. Поведенческие реакции – изменения скорости, направленности или характера движения – относятся к числу наиболее ранних индикаторов токсического воздействия. Особенно отчетливо такие реакции проявляются у инфузорий рода *Paramecium*, что делает их перспективным объектом для разработки методов, основанных на анализе двигательной активности [7, 8]. В связи с этим целью данного исследования является разработка метода и аппаратной реализации компактного устройства для оценки токсичности природных сред на основе таксических реакций инфузорий *Paramecium caudatum*. Предлагаемый подход основан на цифровой регистрации и анализе движения группы клеток, что позволяет количественно оценивать отклонения от нормального поведения и формировать заключение о токсичности исследуемых сред [9].

В данной работе предлагается метод, который сочетает биологическую чувствительность тест-организма и возможности цифровой регистрации, обеспечивая более быструю и объективную оценку токсичности исследуемых сред. Объектом исследования выступают поведенческие реакции инфузорий *Paramecium caudatum*, регистрируемые в специально разработанной двукамерной кювете. Выбор *Paramecium caudatum* обусловлен высокой чувствительностью этого вида к химическому составу среды, выраженной изменением траектории и скорости движения в ответ на изменение условий, что делает их подходящими тест-организмами для выявления сублетальных концентраций токсичных веществ [4–5, 9].

Разработанный метод основан на видеорегистрации поведения группы инфузорий и последующем цифровом анализе их движения. Полученный видеоряд преобразуется в последовательность кадров, которые проходят предобработку для повышения качества изображения. На каждом кадре алгоритмы выделяют отдельные объекты, определяют их координаты и оценивают динамику перемещения. На основе этих данных формируется набор интегральных характеристик поведения популяции, включающий обобщенные показатели подвижности, степень перераспределения между зонами кюветы, устойчивость направленного движения и выраженность реакций избегания. Такой подход позволяет выявлять как выраженные, так и маловыраженные изменения поведения, возникающие при воздействии токсиканта, и регистрировать их во временной динамике.

Для корректной интерпретации полученных данных важно учитывать аналитическую направленность метода. Он ориентирован на анализ ключевых параметров поведения, которые являются чувствительными индикаторами токсического воздействия – скорость движения, изменение которой может отражать нарушение нормальной двигательной активности; пространственное распределение по высоте и объему кюветы, позволяющее выявлять зоны предпочтения или избегания; направленность перемещения относительно градиента токсиканта, указывающая на наличие токсических реакций. Таксические реакции у инфузорий представляют собой направленные изменения поведения (например, хемотаксис или геотаксис), обеспечивающие движение организма в ответ на химические или физические градиенты в окружающей среде. Изменения в этих параметрах позволяют оценивать степень дискомфорта, испытываемого организмом. Дополнительное значение имеет отклонение поведения от контрольной группы, проявляющееся в замедлении движения, нарушении плавности траекторий, хаотизации перемещений или изменении плотности распределения популяции. Эти признаки являются чувствительными маркерами токсичности и позволяют проводить качественную и полуколичественную оценку проб.

Аппаратно-программный комплекс (рисунок), разработанный для регистрации и анализа пространственно-временного распределения модельных организмов при изменяющейся токсичности водных сред, включает интегрированные модули – цифровую камеру (ЦК), осуществляющую регистрацию изображений в реальном времени; кювету плоскую (КТ); светодиодную систему освещения (СП), обеспечивающую однородную засветку; микроконтроллер для управления периферийными компонентами и передачи данных (МК); источник питания (ИП); персональный компьютер (ПК) для обработки видеопотока и аналитики. В качестве ключевого сенсора применяется CMOS-камера с разрешением 2560×1440 пикселей, кадровой частотой 60 Гц, оборудованная макрообъективом с фокусным расстоянием 50 мм, обеспечивающим увеличение 3:1. Такая конфигурация позволяет фиксировать распределение инфузорий в плоской кювете толщиной 2 мм и отслеживать клеточные траектории как в горизонтальной, так и вертикальной плоскостях [10].



Конструкция кюветы включает контрольную камеру и камеру с модельным токсикантом, между которыми инфузории могут свободно перемещаться. Такое устройство позволяет формировать устойчивый химический градиент и наблюдать направление и интенсивность двигательных реакций организма в условиях, близких к естественным. Наличие двух четко разделенных зон усиливает выраженность таксических реакций, поскольку инфузории активно реагируют на различия в концентрации токсиканта, перераспределяя свою активность между камерами [10]. Специально разработанная конструкция кюветы предотвращает возникновение механического перемешивания растворов, тем самым обеспечивая чистоту эксперимента и достоверность получаемых данных. Площадь контакта между двумя средами составляет приблизительно 1 мм², что минимизирует возможность смешивания растворов. За счет этого в течение короткого промежутка времени (до 30 мин) диффузионные процессы не оказывают существенного влияния на поведение микроорганизмов.

Разработанная установка ориентирована на обеспечение стабильных условий видеозахвата – минимизацию вибраций, постоянство освещенности, отсутствие оптических искажений и повторяемость условий эксперимента, – что особенно важно при анализе пространственно-временной динамики движения микроорганизмов [10]. При этом следует учитывать существующие ограничения формата – фиксированную частоту кадров, влияющую на точность оценки скорости, и объем данных, определяющий возможную продолжительность непрерывной записи. Тем не менее аппаратная часть комплекса обеспечивает необходимый баланс между простотой конструкции и возможностью получения информативных видеоданных.

Благодаря использованию цифровой видеорегистрации возможно отказаться от сложных оптических схем. Также существенно расширяется контролируемая область, охватывая весь объем кюветы (100 %). Конфигурация комплекса позволяет преодолеть ограничения традиционных фотометрических подходов – ограниченность регистрируемой области из-за использования узкого светового пучка и необходимость сложной последующей обработки полученных сигналов.

Этапы подготовки и проведения измерений включают обязательные процедуры, предписанные методикой ПНД Ф Т 16.3.16-10, а также дополнительные шаги, адаптированные под используемую экспериментальную систему. Такая последовательность обеспечивает воспроизводимость эксперимента и соответствие нормативным требованиям.

Приведем полный цикл подготовки и выполнения анализа с использованием двукамерной кюветы и цифровой регистрации поведения инфузорий *Paramecium caudatum*.

Подготовка начинается с оценки состояния культуры. Инфузории должны соответствовать рабочей концентрации 1000 ± 500 клеток/мл и демонстрировать стабильную подвижность без признаков стресса согласно ПНД Ф Т 16.3.16-10 [11]. Далее готовятся рабочие растворы. В качестве основной (контрольной) среды используется раствор Лозина – Лозинского, обеспечивающий стабильные осмотические и ионные условия, которые позволяют поддерживать нормальную активность инфузорий в ходе опыта. Легкое загущение среды поливиниловым спиртом применяется в тех случаях, когда необходимо снизить конвективные перемещения и стабилизировать характер перемещения клеток для повышения точности анализа.

Перед началом измерений подготавливается нижняя камера двукамерной кюветы. В нее вносят подготовленный раствор Лозина – Лозинского с инфузориями в рабочей концентрации (1000 ± 500 клеток/мл). Внесение выполняется плавно, чтобы не допустить попадания пузырьков воздуха и сохранить будущую межфазную границу. Нарушение границы приводит к смешиванию сред, изменению локальных концентраций и искажению дальнейших поведенческих реакций инфузорий, в связи с чем результаты эксперимента могут быть некорректными. После заполнения кюветы проводят видеозапись нижней камеры продолжительностью 2 мин. Этот этап служит для проверки концентрации, подсчета числа клеток и оценки их исходной активности перед началом эксперимента. Затем верхняя камера заполняется исследуемым или контрольным раствором. Жидкость вводится аккуратно с целью сохранения четкой границы между нижней и верхней камерами. После заполнения кювета выдерживается несколько минут, за это время граница стабилизируется, исчезают микротурбулентности, и инфузории полностью адаптируются к условиям. В качестве контрольного раствора выступает среда Лозина – Лозинского.

После стабилизации запускается основная видеорегистрация поведения инфузорий. Камера фиксирует движения в течение установленного интервала в 60 с, выбранного с учетом скорости реакции микроорганизмов на токсическое воздействие. Параметры видеосъемки поддерживаются автоматически: освещенность остается стабильной, блики исключены, геометрия кадра не меняется. Общая продолжительность эксперимента составляет 30 мин, поскольку в течение этого периода проявляются как ранние, так и замедленные формы токсических реакций. За первые минуты фиксируются быстрые поведенческие отклонения, связанные с первичным контактом с токсикантом, а оставшийся интервал позволяет отследить изменение распределения популяции и устойчивость двигательных реакций, что и обусловило выбор именно такого временного окна в методике.

После завершения регистрации видеоряд автоматически передается в модуль цифровой обработки. Программа выполняет предобработку изображений, сегментацию, выделение объектов, оценку характера перемещения и расчет интегральных характеристик поведения популяции [10].

Эти этапы полностью автоматизированы, что исключает влияние субъективного фактора и повышает сравнимость результатов. Оператор участвует только в подготовке культуры, рабочей среды и кюветы и должен иметь базовые навыки обращения с микроскопической культурой и лабораторной посудой, а также работать в условиях стабильной температуры и отсутствия вибраций. Оператор также обеспечивает чистоту оптики, контролирует уровень жидкости и отсутствие вибраций, а также запускает запись. Все остальные этапы – сбор, обработка и анализ данных – выполняются системой автоматически, в связи с чем эксперимент технически устойчив и воспроизводим.

Для оценки применимости разработанного метода для решения экологических задач был проведен ряд исследований по оценке токсичности растворов различной концентрации модельного токсиканта – сульфата меди ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Эксперименты направлены на регистрацию изменений в поведении инфузорий *Paramecium caudatum* при воздействии исследуемых сред. Была приготовлена серия растворов модельного токсиканта с концентрациями 0, 0,125, 0,25, 0,5, 0,75; 1 мг/дм³. Эти значения подобраны с равномерным логарифмическим шагом, что позволяет охватить спектр реакций – от слабых изменений на минимальных концентрациях до выраженного снижения активности культуры при максимальных значениях. Такой диапазон необходим для последующего построения калибровочной зависимости, применяемой при анализе неизвестных образцов. Перед внесением растворы выдерживаются при температуре 20–25 °С и проверяются на прозрачность и отсутствие пузырьков и оптических включений.

Основная видеорегистрация выполнялась в двух временных режимах. Короткая запись фиксирует первичную реакцию инфузорий, проявляющуюся в первые минуты после изменения условий. Длительная регистрация (до 30 мин) позволяет наблюдать динамику хемотаксической реакции и формирование устойчивого распределения популяции. На протяжении регистрации поддерживаются стабильная освещенность, отсутствие вибраций и неизменное положение камеры. Система фиксирует изменения средней подвижности и распределения клеток между камерами, а также особенности поведения в области градиента.

По завершении видеорегистрации данные автоматически передаются на персональный компьютер для обработки специализированным программным обеспечением. Выполняются предобработка изобра-

жений, выделение объектов, оценка характера перемещения инфузорий и вычисление интегральных показателей состояния популяции. Алгоритмы анализа реализованы на основе разработанной математической модели, обеспечивающей автоматическое и объективное выделение объектов и минимизацию влияния субъективных факторов при анализе видеопотока. В процессе обработки на каждом кадре для всех значимых объектов вычисляется геометрический центр масс, который трактуется как координата отдельного микроорганизма. В результате формируется массив положений $x_k(t)$, $y_k(t)$, являющийся основой для количественной оценки состояния популяции. Для расчета средневзвешенного вертикального положения всех микроорганизмов используется выражение

$$\bar{z}^*(t) = \frac{1}{M_t} \sum_{k=1}^{M_t} y_k(t),$$

где M_t – число значимых объектов в кадре; $y_k(t)$ – вертикальная координата k -го микроорганизма, мм (с учетом калибровки). Этот параметр отражает коллективные миграционные реакции популяции на присутствие токсикантов.

Для оценки двигательной активности рассчитывается средняя скорость перемещения популяции по формуле

$$\bar{v}(t) = \frac{1}{\dot{M}_t} \sum_{p=1}^{\dot{M}_t} \frac{\sqrt{(x_p(t+\Delta t) - x_p(t))^2 + (y_p(t+\Delta t) - y_p(t))^2}}{\Delta t},$$

где \dot{M}_t – количество валидных пар объектов с установленным межкадровым соответствием; Δt – временной интервал между анализируемыми кадрами. Для надежного сопоставления вводится ограничение на максимальное допустимое смещение центра масс между последовательными кадрами, устраняющее ошибочные соответствия.

Полученные временные ряды $\bar{z}^*(t)$, $\bar{v}(t)$ дополнительно сглаживаются медианным фильтром в скользящем окне с целью устранения единичных выбросов, обусловленных артефактами регистрации или случайной потерей объектов. Все показатели пересчитываются в физические единицы измерения, что обеспечивает сопоставимость результатов при анализе токсичности различных водных сред.

Обработанные данным образом параметры используются для количественной оценки токсичности исследуемых сред. Изменения этих показателей обусловлены двумя основными механизмами – поведенческой реакцией *Paramecium caudatum* избегания при низких концентрациях токсиканта и угнетением жизнедеятельности/гибелью микроорганизмов при более высоких концентрациях. Выбор именно этих параметров связан с их способностью фиксировать как ранние таксические реакции клеток (смещение по вертикали), так и физиологическое угнетение движений (снижение средней скорости). Такой подход позволяет количественно различать характер отклика тест-организмов на воздействие токсиканта.

Результаты проведенных экспериментов представлены в табл. 1, где отражены значения основных поведенческих параметров *Paramecium caudatum* при различных концентрациях модельного токсиканта ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).

Таблица 1

Концентрация, мг/дм ³	Средневзвешенная высота положения клеток	Средняя скорость, мм/с	Индекс токсичности (Биотестер-2М)	Группа токсичности согласно ПНД Ф Т 16.3.16-10
0	4,47±0,71	0,38±0,04	0,14±0,03	I (допустимая степень токсичности)
0,125	5,58±0,67	0,19±0,02	0,58±0,05	II (умеренная степень токсичности)
0,25	6,14±0,56	0,062±0,007	0,67±0,06	
0,5	6,68±0,24	0,048±0,003	0,84±0,08	III (высокая степень токсичности)
0,75	7,04±0,32	0,027±0,016	0,91±0,09	
1	7,35±0,68	0,005±0,002	0,96±0,09	

Для каждой концентрации были усреднены показатели средней скорости движения и средневзвешенной высоты распределения популяции, полученные в десяти независимых сериях измерений. Представленные данные позволяют проследить закономерное изменение динамики поведения инфузорий под воздействием токсиканта. Дополнительно для каждого диапазона концентраций выполнено сопоставление полученных значений с результатами, зарегистрированными с использованием прибора «Биотестер-2М», что дало возможность оценить степень метрологической эквивалентности и подтвердить корректность измерений.

В случае низких концентрациях (0,125–0,25 мг/дм³) поведенческий отклик инфузорий остается близким к контрольному: наблюдается умеренное снижение скорости движения и небольшие сдвиги в вертикальном распределении. Эти изменения не нарушают общей структуры пространственного распределения популяции и соответствуют слабым стрессовым воздействиям. В диапазоне средних концентраций (0,5 мг/дм³) поведенческие реакции становятся более выраженными: скорость движения заметно снижается, а средневзвешенная вертикальная координата смещается, отражая более сильное воздействие раствора CuSO₄·5H₂O. Данный уровень токсичности приводит к формированию устойчивых поведенческих паттернов, свидетельствующих об адапционном ответе популяции. В случае высоких концентраций (0,75–1,0 мг/дм³) отмечается значительное подавление подвижности, почти до полного прекращения активного движения. Вертикальное распределение становится резко неравномерным: микроорганизмы концентрируются в нижней части кюветы, избегая зоны повышенной токсичности.

Экспериментальные данные показали, что реакция *Paramecium caudatum* на присутствие CuSO₄·5H₂O проявляется в двух устойчивых и независимых поведенческих изменениях – снижении средней скорости движения и смещении средневзвешенного положения популяции по высоте кюветы. Эти показатели отражают различные механизмы адапционного ответа микроорганизмов и монотонно изменяются по мере роста концентрации токсиканта. В связи с этим оба параметра могут использоваться как самостоятельные количественные индикаторы токсического воздействия.

В ходе эксперимента были построены калибровочные зависимости, полученные на основе стационарных значений поведенческих параметров, усредненных после завершения переходных процессов.

Средняя скорость движения описывается экспоненциальной функцией

$$\bar{v}(C) = 0,295e^{-3,825C},$$

где коэффициент 3,825 отражает чувствительность тест-организма к токсическому воздействию, а 0,295 соответствует уровню подвижности в контроле.

Средневзвешенная высота положения клеток согласуется с экспоненциальной зависимостью

$$H(C) = 7,70 - 3,23e^{-2,30C},$$

где коэффициент 7,7 – среднее положение популяции в отсутствии токсиканта, а 2,53 характеризует смещение при увеличении концентрации.

Эти модели отличаются высокой степенью согласованности с экспериментальными данными и позволяют выполнять устойчивое обратное преобразование при оценке концентрации.

На основе полученных экспериментальных зависимостей было предложено ввести параметр, позволяющий напрямую связать наблюдаемые поведенческие изменения инфузорий с концентрацией токсиканта. Такой параметр должен был обеспечить возможность перевода биологических реакций в количественный формат, сопоставимый с физическими величинами. В качестве такого параметра была сформулирована биологически эквивалентная концентрация. Ее введение позволяет выразить комплексный поведенческий отклик инфузорий через эквивалентную концентрацию модельного токсиканта. При этом создается единый измерительный критерий для сравнения проб различного происхождения и состава. Биологически эквивалентная концентрация β выполняет функцию универсального индикатора, обеспечивающего объективность и воспроизводимость оценки токсичности, а также независимость результатов от специфических условий отдельных измерений.

На основе аппроксимаций определяются количественные оценки концентрации токсиканта:
 - оценка на основе экспоненциального подавления скорости

$$C_{\bar{v}} = \frac{\ln(0,295) - \ln(\bar{v})}{3,825} = \frac{-1,220 - \ln(\bar{v})}{3,825};$$

- оценка на основе вертикального смещения распределения

$$C_{\bar{H}} = -\frac{1}{2,30} \ln\left(\frac{7,70 - \bar{H}}{3,23}\right).$$

Каждый из показателей отражает отдельный механизм реакции популяции, и при использовании только одного из них метод был бы уязвим к случайным колебаниям данных. Для повышения устойчивости и воспроизводимости результатов введен интегральный показатель

$$\beta = \frac{1}{2} [C_{\bar{H}} + C_{\bar{v}}] = \frac{1}{2} \left[-\frac{1}{2,30} \ln\left(\frac{7,70 - \bar{H}}{3,23}\right) + \frac{-1,22 - \ln \bar{v}}{3,82} \right].$$

Объединение двух независимых оценок создает эффект взаимного резервирования. Если один из параметров отклоняется вследствие биологических или технических флуктуаций, второй компенсирует это за счет сохранения чувствительности к токсическому воздействию. Итоговое значение биологически эквивалентной концентрации представляет собой непрерывную, метрологически интерпретируемую шкалу токсического воздействия, мг/дм³, по CuSO₄·5H₂O. На основе экспериментальных параметров (см. табл. 1) были получены количественные значения значение биологически эквивалентной концентрации (табл. 2).

Таблица 2

Концентрация, мг/дм ³	Средневзвешенная высота положения клеток	Средняя скорость, мм/с	Биологически эквивалентная концентрация
0	4,47±0,71	0,38±0,04	-0,033 ± 0,050
0,125	5,58±0,67	0,19±0,02	0,149 ± 0,070
0,25	6,14±0,56	0,062±0,007	0,362 ± 0,079
0,5	6,68±0,24	0,048±0,003	0,488 ± 0,052
0,75	7,04±0,32	0,027±0,016	0,658 ± 0,131
1	7,35±0,68	0,005±0,002	1,017 ± 0,426

Практическая значимость биологически эквивалентной концентрации заключается в возможности сопоставлять токсичность разных проб независимо от условий измерений, формировать пороговые значения для принятия решений, интегрировать метод в автоматизированные системы контроля качества воды, сравнивать результаты с аттестованными методиками биотестирования.

Биологически эквивалентная концентрация выполняет функцию калибровочного преобразования, переводя комплексный поведенческий отклик инфузорий в универсальный физически интерпретируемый параметр. Это позволяет сопоставлять токсичность растворов различной химической природы и формировать единую количественную шкалу, пригодную для долговременного экологического мониторинга.

Физический смысл биологически эквивалентной концентрации заключается в том, что эта величина выражает эквивалентную концентрацию токсиканта, приводящую к тем же наблюдаемым изменениям поведения тест-организма, что и исследуемая проба. Биологически эквивалентная концентрация фактически заменяет сложный многокомпонентный отклик инфузорий одним числовым параметром, непосредственно связанным с дозой токсического вещества. Таким образом, поведенческие характеристики приобретают метрологическую значимость и могут использоваться для классификации токсичности, отслеживания динамики загрязнения и интеграции данных в системы экологического контроля.

Таким образом, разработаны метод и аппаратно-программное устройство для оценки токсичности природных сред на основе таксических реакций инфузорий *Paramecium caudatum*. Проведенные эксперименты показали высокую чувствительность и воспроизводимость метода.

Полученные калибровочные зависимости – экспоненциальное снижение скорости и линейное смещение распределения – демонстрируют высокое соответствие экспериментальным данным.

Введенный показатель биологически эквивалентной концентрации позволяет объединить оба поведенческих индикатора – среднюю скорость движения и средневзвешенную вертикальную позицию инфузорий – и получить устойчивую количественную оценку токсичности. Благодаря данному показателю повышается надежность разработанного метода за счет компенсации случайных отклонений одного параметра другим и обеспечивается устойчивая интерпретация результата.

Сопоставление результатов измерения с результатами, полученными с помощью прибора «Биотестер-2М», показало высокую степень согласованности, что подтверждает валидность предложенного подхода. В связи с этим разработанный аппаратно-программный комплекс обеспечивает автоматизированную регистрацию данных и их обработку, что обуславливает пригодность метода для оперативного контроля качества водных сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голицын А.Н. Промышленная экология и мониторинг загрязнения природной среды. М.: Оникс, 2007. 335 с.
2. Тихановская Г.А., Машихина Ю.В. Биологический контроль окружающей среды. Вологда: ВоГУ, 2016. 39 с.
3. Олькова А.С. Разработка стратегии биотестирования водных сред с учетом многофакторности ответных реакций тест-организмов: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Киров, 2020. 40 с.
4. Захаров И.С., Завгородний А.В. Биотестовые аппаратные средства и методы контроля локомоций инфузорий // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2008. № 5 (82). С. 205–209.
5. Захаров И.С., Завгородний А.В., Ковалевская А.С. Биологические реакции для комплексного тестирования токсичности среды // Нейробиотелеком-2006: Тр. 2-го Междунар. науч. конгресса, г. Санкт-Петербург, 5–8 дек. 2006. СПб.: СПбГУТ, 2006. С. 209–210.
6. Щеткина Т.Н. Использование автоматизированной биотехнической системы и простейших одноклеточных организмов для биотестирования объектов окружающей среды: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Калуга, 2007. 27 с.
7. Чеснокова С.М., Чугай Н.В. Биологические методы оценки качества объектов окружающей среды: в 2 ч. Владимир: ВлГУ, 2008. Ч. 2. Методы биотестирования. 92 с.
8. Лисицкая Т.Б. Биотестирование с использованием инфузорий: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб.: СПбГТИ, 2007. 120 с.
9. Виноходов Д.О. Научные основы биотестирования с использованием инфузорий: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2007. 40 с.
10. Соколов А., Кустов Т.В. Разработка метода количественной оценки плотности распределения микроорганизмов в градиенте химического раздражителя для оценки токсичности // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2025. № 1. С. 104–110
11. ФР.1.39.2015.19242. Методика определения токсичности проб природных, питьевых, хозяйственно-питьевых, хозяйственно-бытовых сточных, очищенных сточных, сточных, талых, технологических вод экспресс-методом с применением прибора серии «Биотестер» [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293758/4293758204.htm> (дата обращения: 20.12.2025).

Поступила в редколлегию 4.12.25

DEVELOPMENT OF A HARDWARE AND SOFTWARE METHOD FOR BIOTESTING WATER SAMPLES BASED ON THE ANALYSIS OF VERTICAL DISTRIBUTION AND MOTOR ACTIVITY OF PARAMECIUM CAUDATUM CILIATES

A. Sokolov, I.V. Vezhenkova, and M.I. Semenova

The article discusses the results of the development and testing of a hardware-software biotesting method based on the analysis of the vertical distribution and motor activity of *Paramecium caudatum* infusoria. Experimental data reflecting changes in the behavioral parameters of ciliates

under the influence of a model toxicant (copper sulfate) are presented. Calibration dependences of the movement speed and the weighted average height of the cell position on the concentration of the toxicant were obtained. An integral indicator is proposed – biologically equivalent concentration (BEC) for quantitative assessment of toxicity. The high consistency of the results with the certified Biotester-2M device is shown.

Keywords: biotesting, Paramecium caudatum, digital image processing.

Соколов Алексей – ассистент (СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург)

E-mail: asokolov@etu.ru

Веженкова Ирина Владимировна – канд. биол. наук (СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург)

E-mail: ivvezhenkova@etu.ru

Семенова Маргарита Игоревна – канд. техн. наук (СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург)

E-mail: misemenova@etu.ru

АНАЛИЗ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОГО ВЕЙВЛЕТА МОРЗЕ

О.В. Шиндор, Д.Е. Чикрин, М.С. Азов, П.А. Кокунин, Д.М. Пашин

Предлагается методика выделения локальных особенностей вибродиагностического сигнала на основе вейвлет-преобразования с использованием комплексного обобщенного вейвлета Морзе. Показана равнозначная эффективность использования суммы модуля вейвлет-коэффициентов, вещественной и мнимой части коэффициентов при проведении анализа сигнала. Установлено, что эффективность выделения локальных особенностей сигнала с помощью вейвлета Морзе на 15 % выше по сравнению с вейвлетом Морле. Выявлено преимущество предложенного алгоритма обработки данных – определение на основе анализа среднеквадратических отклонений вейвлет-коэффициентов частотного характера изменения вибрации с последующим детальным анализом соответствующих составляющих.

Ключевые слова: вибродиагностический анализ, вейвлет-анализ, обобщенный вейвлет Морзе, гидрогенератор.

Введение

Современные технологические решения формируют новые требования и создают дополнительные сложности в области технического обслуживания оборудования, включая объекты критической инфраструктуры. В течение нескольких десятилетий с момента постройки гидроэлектростанций до текущего момента обслуживание оборудования осуществляется на основании документов, регламентирующих данные процедуры, в том числе и локальных. Как показано в работах [1, 2], диагностическим параметром технического состояния оборудования является качественная и количественная оценка уровня вибрации. Согласно внутренним регламентам гидроэлектростанций ремонтные работы проводятся в установленные сроки вне зависимости от состояния оборудования. Одной из мер оценки качества ремонтных работ является анализ вибрации до и после ремонта. Зачастую такое обслуживание является экономически неэффективным, так как сопровождается простоем оборудования. Развитие методов и технологий машинного обучения позволяет строить системы диагностики и предиктивной аналитики для мониторинга состояния оборудования, что обеспечит своевременное обнаружение возникновения неисправностей, а также увеличивает экономическую выгоду от использования оборудования. В этом случае отсутствует простой оборудования, который возникает при обслуживании по регламенту. При решении такой задачи актуально определение критериев нарушения работоспособности оборудования. Одним из возможных вариантов построения систем диагностики оборудования является использование вибрационного сигнала в качестве носителя диагностической информации.

Вибродиагностический сигнал содержит информацию о состоянии вращающегося оборудования и его возможных неисправностях. Традиционным подходом к анализу вибрационных сигналов является спектральный анализ [3–6]. Наряду с этим диагностическую значимость имеют такие параметры, как виброперемещение, пиковые значения и среднеамплитудный размах вибрации [6].

На основании контролируемых параметров разрабатываются модели кластерного анализа [7]. Активно используются методики машинного обучения для построения систем вибродиагностики вращающихся механизмов. В работах [8–12] рассматриваются вопросы машинного обучения, кластеризации данных, построения нейронных сетей. В качестве диагностических признаков при построении систем оценки технического состояния вращающегося оборудования на основе анализа вибродиагностических сигналов являются рассмотренные ранее методы и значения сигналов. Спектральный метод используется при выводе оборудования в ремонт и определении уровня вибрации до и после ремонта. На основе полученных данных делается вывод о проведенных ремонтных процедурах. В случае построения систем диагностики с возможностью прогнозирования изменения технического состояния оборудования эффективным инструментом выявления локальных особенностей сигнала является вейвлет-преобразование. В ра-

ботах [13–16] показана возможность применения вейвлет-анализа для выделения информативных параметров вибродиагностических сигналов. В качестве материнских вейвлетов используются вещественные вейвлеты. При этом нерешенной остается задача определения диагностических признаков вибрационных сигналов, содержащих информацию о зарождении и постепенном развитии дефекта. При анализе параметров вибрации вращающегося оборудования в режиме реального времени данные признаки необходимы для построения систем мониторинга и принятия решений.

Целью данной работы является модификация алгоритма обработки вибродиагностических сигналов на основе вейвлет-преобразования для увеличения точности выделения локальных особенностей сигналов с помощью применения комплексного вейвлета Морзе.

Методика анализа вибрационного сигнала на основе вейвлет-преобразования

Вейвлет-преобразование позволяет получить представление сигнала в частотной и временной областях одновременно, в области низких и высоких частот за счет подвижного частотно-временного окна [17].

Для анализа предлагается использовать непрерывное вейвлет-преобразование, характеризующееся избыточностью, что в данном случае является положительным эффектом. Непрерывное вейвлет-преобразование выполняется через свертку анализируемого сигнала $f(t)$ с материнским вейвлетом $\psi(t)$. Материнский вейвлет $\psi(t)$ представляет собой квадратично-интегрируемую функцию $\psi \in L^2(R)$ с нулевым средним значением, нормализованную и центрированную при $t = 0$. К материнскому вейвлету $\psi(t)$ применяются операции сдвига и масштабирования по переменным b (сдвиг по оси времени) и a (масштаб сжатия или растяжения вейвлета), на основании которых получается множество вейвлет-функций:

$$\Psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (1)$$

В результате преобразования получено множество коэффициентов, демонстрирующих степень корреляции между исследуемым сигналом $f(t)$ и материнским вейвлетом $\psi(t)$ при различных значениях параметров b, a :

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \Psi_{a,b}^*(t) dt, \quad (2)$$

где $\Psi_{a,b}^*(t)$ – комплексно-сопряженная величина.

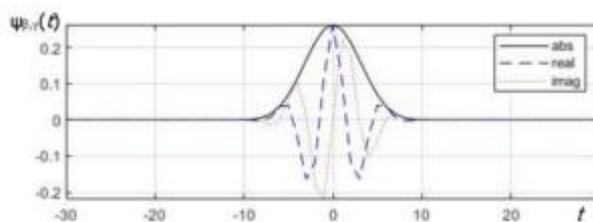
Эффективность анализа определяется выбором материнского вейвлета, который выполняет функцию адаптивного окна и характеризуется различными параметрами частотно-временного разрешения. Вместо вещественного вейвлета предлагается использовать комплексный обобщенный вейвлет Морзе, который является двухпараметрическим вейвлетом и в частотной области описывается выражением [18, 19]

$$\Psi_{\beta,\gamma}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{\beta,\gamma}(t) e^{-i\omega t} dt = U(\omega) a_{\beta,\gamma} \omega^\beta e^{-\omega^\gamma},$$

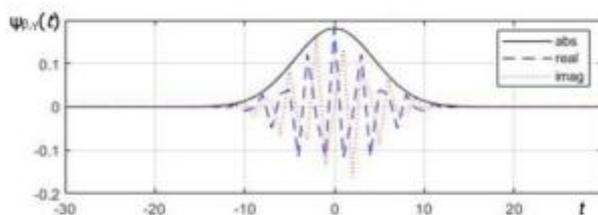
где $a_{\beta,\gamma} \equiv 2(e\gamma / \beta)^{\beta/\gamma}$ – постоянный нормирующий коэффициент; $U(\omega)$ – единичная функция; $\psi_{\beta,\gamma}(t)$ – вейвлет-функция во временной области; β, γ – параметры, определяющие форму вейвлета и его частотные характеристики, связанные выражением $p^2 = \beta\gamma$ [18, 19].

Рассмотрим случай обобщенного вейвлета Морзе ($\gamma = 3$).

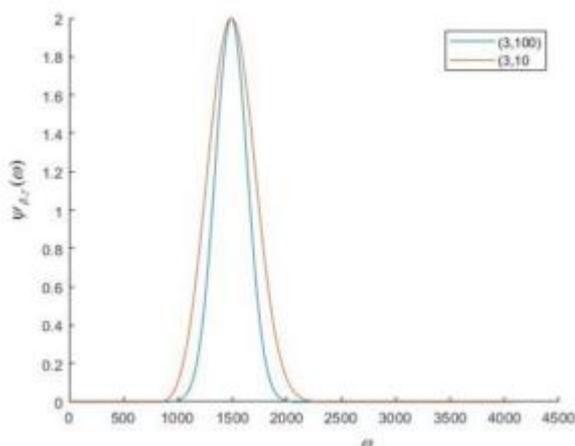
Приведем осциллограмму во временной области при значениях $p^2 = 10$ (рис. 1, а) и $p^2 = 100$ (рис. 1, б). Осциллограмма частотной области приведена на рис. 1, в.



a



б



в

Рис. 1

Как видим (см. рис. 1, а, б), больших значениях p^2 происходит увеличение числа осцилляций вейвлета во временной области и одновременное сужение его представления в частотной области, что обеспечивает изменение разрешающих параметров вейвлета. Оптимальные фильтрующие свойства вейвлета наблюдаются при значениях 50–60, в этом случае получаем примерно одинаковое разрешение по времени и по частоте.

Обработка вибродиагностического сигнала осуществляется на основании алгоритма.

1. Ввод измерительной информации с вибродатчиков, установленных на вращающихся устройствах в блок обработки данных.
2. Непрерывное вейвлет-преобразование сигнала с вейвлетом Морзе ($\gamma = 3$, $p^2 = 10$).
3. Вычисление квадрата модуля вейвлет-коэффициентов и визуализация результатов вычислений.

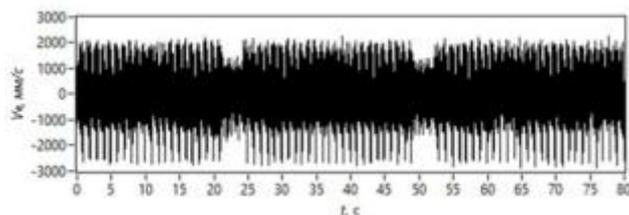
Данная методика позволяет выполнять оценку вибрации вращающегося оборудования и определение изменения режимов его работы, что важно при построении систем мониторинга.

Анализ вибродиагностического сигнала гидрогенератора

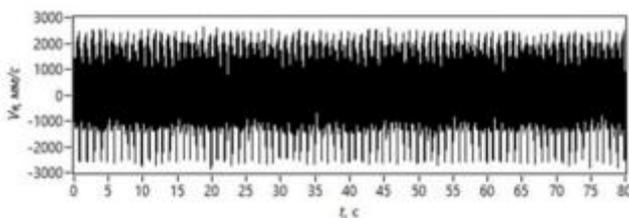
Рассмотрим применение предложенного алгоритма для анализа экспериментальных данных виброскорости, измеренных на стыке секций статора гидрогенератора до и после проведения ремонта при различных режимах его работы. Измерения проводились в течение 80 с, что соответствует регламенту при анализе вибрации с помощью спектрального метода до ремонта и после ремонта гидрогенератора, с частотой дискретизации 1000 Гц.

Применение вещественных вейвлетов показало, что в качестве диагностических признаков эффективно использовать квадрат модуля суммы вейвлет-коэффициентов $|W_{\text{im}}(a,b)|^2$ [16]. Обобщенный вейвлет Морзе является комплексным вейвлетом, поэтому необходимо определить, какие составляющие вейвлет-коэффициентов отличаются наибольшей информативностью.

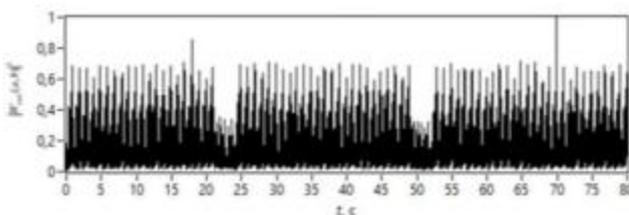
На рис. 2 показан сигнал виброскорости гидрогенератора (20 МВт): *a* – до ремонта; *б* – после ремонта. Вещественная часть вейвлет-коэффициентов до ремонта приведена на рис. 2, *в*, после ремонта – на рис. 2, *г*. Также приведена мнимая часть вейвлет-коэффициентов до ремонта (рис. 2, *д*) и после ремонта (рис. 2, *е*). Квадрат модуля суммы вейвлет-коэффициентов в случае $p^2 = 10$ до ремонта приведен на рис. 2, *ж*, после ремонта – на рис. 2, *з*. Квадрат модуля суммы вейвлет-коэффициентов в случае $p^2 = 100$ до ремонта демонстрирует рис. 2, *и*, после ремонта – рис. 2, *к*.



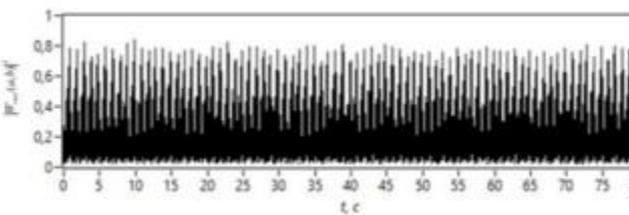
a



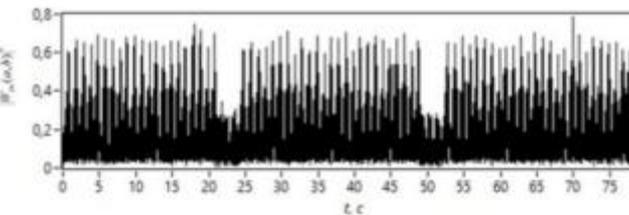
б



в



г



д

Рис. 2 (Начало)

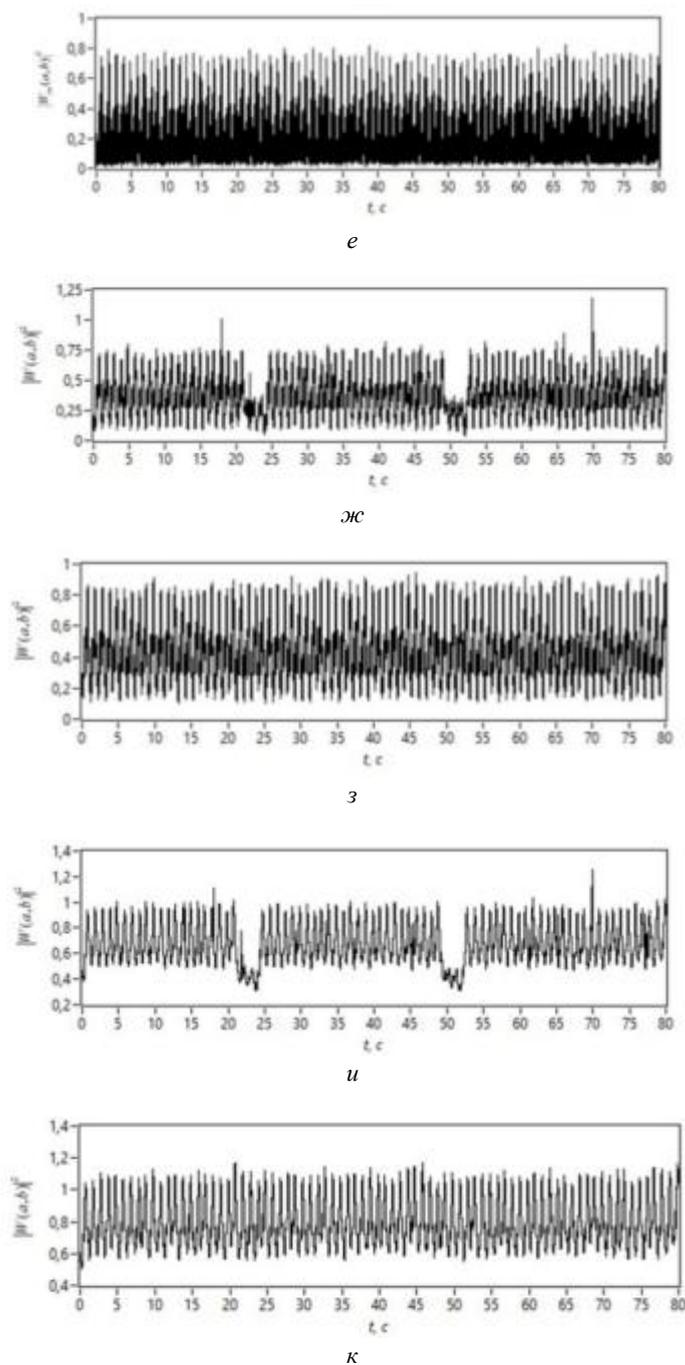


Рис. 2 (Окончание)

На рис. 2, в, г приведен квадрат модуля суммы вещественных значений вейвлет-коэффициентов, на рис. 2, д, е – мнимых. Видно, что общий уровень вещественной и мнимой части одинаковы, также аналогично уменьшение вейвлет-коэффициентов до уровня 0,4 (см. рис. 2, в, д) на интервалах, соответствующих уменьшению виброскорости. Графическое представление квадрата модуля суммы вейвлет-коэффициентов (см. рис. 2, ж, з) не отличается по характеру от составляющих вейвлет-коэффициентов. Таким образом, можно сделать вывод о том, что вейвлет-коэффициенты и их составляющие характеризуются одинаковой информативностью. В дальнейшем будем рассматривать квадрат модуля суммы вейвлет-коэффициентов.

Как видим (см. рис. 2), после ремонта виброскорость и вейвлет-коэффициенты имеют однородный характер, при этом их уровень и среднеквадратическая ошибка выше, чем до ремонта, как и уровень вибрации.

На рис. 2, в–з представлены результаты анализа при использовании вейвлета Морзе с параметрами $\gamma = 3, p^2 = 10$.

Рис. 2, з, к демонстрирует, что при изменении параметров вейвлета, в частности его длительности p^2 , происходит увеличение значений квадрата модуля суммарной величины вейвлет-коэффициентов как до ремонта, так и после, при этом характер коэффициентов не меняется. Также по данным таблицы видно, что происходит увеличение среднеквадратической ошибки вейвлет-коэффициентов.

Вейвлет-коэффициенты	$\gamma = 3, p^2 = 10$		$\gamma = 3, p^2 = 100$	
	До ремонта	После ремонта	До ремонта	После ремонта
$ W_{\text{real}}(a, b) ^2$	0,22	0,25	0,36	0,42
$ W_{\text{im}}(a, b) ^2$	0,22	0,25	0,36	0,42
$ W(a, b) ^2$	0,40	0,47	0,68	0,81

На рис. 3 приведена зависимость среднеквадратической ошибки вейвлет-коэффициентов от параметра вейвлета Морзе p^2 . Кривая 1 демонстрирует изменение среднеквадратической ошибки коэффициентов до ремонта, кривая 2 – после ремонта.

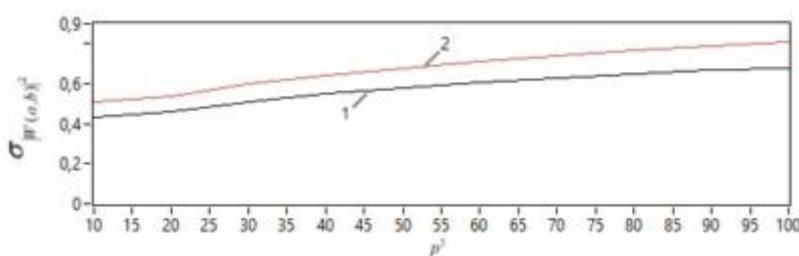


Рис. 3

Из графиков (см. рис. 3), видно что при увеличении ширины вейвлета во временной области (увеличение p^2) происходит пропорциональное увеличение вейвлет-коэффициентов. Отсюда следует, что при использовании в качестве диагностического признака оценки вибрации квадрата модуля суммы вейвлет-коэффициентов выбор параметра p^2 является непринципиальным. Среднее значение среднеквадратической ошибки вейвлет-коэффициентов в 1,2 раза выше при $p^2 = 100$ по сравнению со значениями среднеквадратической ошибки при $p^2 = 10$.

Увеличение среднеквадратической ошибки вейвлет-коэффициентов после ремонта по сравнению со значениями до ремонта может говорить об увеличении высокочастотной вибрации. Данное свойство может быть использовано при первичном анализе вибрации для определения дальнейших уточнений причин их возникновения.

Для эффективности использования обобщенного вейвлета Морзе при выделении локальных особенностей вибродиагностического сигнала рассмотрим проведение вейвлет-преобразования с помощью вейвлета Морле. Среднеквадратическая ошибка вейвлет-коэффициентов при анализе данных до ремонта составляет 0,53. При использовании вейвлета Морзе $p^2 = 50$, соответствующего хорошему соотношению разрешений по времени и частоте, среднеквадратическая ошибка составляет 0,61. Соответственно, применение вейвлета Морзе с такими параметрами разрешения позволит выявлять локальные особенности сигнала на 15 % точнее, чем при использовании вейвлета Морле.

Выводы

В работе рассмотрена возможность применения алгоритма обработки вибродиагностического сигнала на основе вейвлет-преобразования с использованием обобщенного вейвлета Морзе ($\gamma = 3$). Использование вейвлета Морзе ($p^2 = 50$) позволяет выявить локальные особенности сигнала, при этом показано, что разрешение при их выявлении выше, чем у вейвлета Морле, на 15 %. Кроме того, изменение пара-

метров вейвлета, в частности его длительности, на основе оценки среднеквадратического отклонения квадрата модуля вейвлет-коэффициентов позволяет оценить частотный диапазон изменения вибрации. В работе показано, что вещественная и мнимая части вейвлет-коэффициентов, а также квадрат модуля суммы вейвлет-коэффициентов имеют одинаковые диагностические свойства. В качестве критерия оценки использовалась среднеквадратическая ошибка квадрата модуля суммы вейвлет-коэффициентов.

Предложенная методика может использоваться при построении систем диагностики и мониторинга вращающегося оборудования с целью прогнозирования изменения режимов его работы или выхода из строя. Методика может быть адаптирована для анализа отдельных частотных составляющих сигнала и проведения в режиме реального времени, а также может быть использована при построении систем машинного зрения вибродиагностического анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 34.31.303-96 Методические указания по эксплуатационному контролю вибрационного состояния конструктивных узлов гидроагрегатов. М.: РАО «ЕЭС России», 1996. 48 с.
2. Методики оценки технического состояния основного оборудования гидроэлектростанций СТО 17330282.27.140.001-2006. М.: РАО «ЕЭС России», 2006. 378 с.
3. Способ мониторинга возникновения недопустимой вибрации гидроагрегата вследствие гидродинамических пульсаций: пат. 2680105 Рос. Федерация, № 2017121727; заявл. 20.06.2017; опубл. 15.02.2019.
4. Кликушин Ю.Н. и др. Алгоритм оценки состояния гидроагрегата на основе идентификационных измерений вибросигналов // Дефектоскопия. 2014. № 7. С. 44–50.
5. Flegner P. et al. Evaluation of the Acceleration Vibration Signal for Aggregates of the Horizontal Drilling // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Iss. 8. Article № 3984.
6. Бондаренко Н.Е., Латышов К.В., Зенина Е.Г. Математическая модель влияния повышенных вибраций на работу гидроагрегата // Евразийский союз ученых. 2020. № 7-1 (76). С. 14–19.
7. Flegner P. et al. Application of Cluster Analysis for Classification of Vibration Signals from Drilling Stand Aggregates // Applied Sciences. 2023. № 13. Article № 6337.
8. Клячкин В.Н., Санталов А.А. Разработка нейронной сети для оценки исправности гидроагрегата по результатам вибромониторинга // Программные продукты и системы. 2020. № 4. С. 629–634.
9. Клячкин В.Н., Жуков Д.А., Алексеева А.В. Применение машинного обучения для вибродиагностики гидроагрегата // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2020. № 1. С. 1–5.
10. Бранцевич П.Ю. Компьютерная обработка длинных реализаций вибрационных сигналов // BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: Сб. науч. ст. 7-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 19–20 мая 2021. Минск: Бестпринт, 2021. С. 423–437.
11. Золотухина М.А., Золотухин С.А., Ивченко В.Д. Интеллектуальная система регулирования технической диагностикой роторного оборудования с помощью машинного обучения // International Journal of Professional Science. 2021. № 6. С. 68–73.
12. Яблоков А.Е., Жила Т.М., Генералов А.С. Диагностика оборудования по спектрограммам вибросигнала методами машинного обучения // Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. 2021. № 15. С. 288–297.
13. Эльхуттов С.Н., Литвинцева Т.В. Вейвлет-анализ в задачах вибродиагностики // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2011. Т. 1. С. 9–009.
14. Подклетнов С.Г. Применение методов преобразования Фурье и вейвлет-преобразования для вибродиагностики технического состояния тоннельных эскалаторов // Изв. СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2023. Т. 16. № 5. С. 24–32.
15. Шиндор О.В. и др. Анализ вибродиагностических сигналов высокоэнергетических установок методами вейвлет-преобразования // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: Материалы 8-й Междунар. науч.-техн. конф., г. Чебоксары, 22 нояб. 2024. Чебоксары: ЧГУ, 2024. С. 333–337.
16. Shindor O., Svirina A. Methods of Signal Analysis for Vibration Control at Hydropower Plants // Modeling and Dynamic Behaviour of Hydropower Plants / Eds. N. Kishor, J. Fraile-Ardanuy. Stevenage: IET, 2017. P. 131–145.
17. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. № 11. С. 1145–1170.
18. Lilly J.M., Olhede S.C. Generalized Morse Wavelets as a Superfamily of Analytic Wavelets // IEEE Transactions on Signal Processing. 2012. Vol. 60. Article № 60366041.

ANALYSIS OF VIBRATION SIGNALS BASED ON THE GENERALIZED MORSE WAVELET

O.V. Shindor, D.E. Chickrin, M.S. Azov, P.A. Kokunin, and D.M. Pashin

The paper proposes a technique for extracting local features of a vibrodiagnostic signal based on wavelet transform using a complex generalized Morse wavelet. It is shown that using the sum of the modulus of wavelet coefficients, as well as the real and imaginary parts of the coefficients, is equally effective when analyzing the signal. It is established that the efficiency of extracting local signal features using the Morse wavelet is 15% higher compared to the Morlet wavelet. The advantage of the proposed data processing algorithm is demonstrated: it enables identification of the frequency nature of vibration changes based on the analysis of the root mean square deviations of the wavelet coefficients, followed by a detailed analysis of the corresponding components.

Keywords: vibration diagnostic analysis, wavelet analysis, generalized Morse wavelet, hydrogenerator.

Шиндор Ольга Владимировна – канд. техн. наук (КФУ, Казань)
E-mail: OVShindor@kpfu.ru

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

Азов Максим Сергеевич – канд. техн. наук (УКБП, Ульяновск)
E-mail: m.azov@ukbp.ru

Кокунин Петр Анатольевич – канд. техн. наук (КФУ, Казань)
E-mail: pkokunin@mail.ru

Пашин Дмитрий Михайлович – д-р техн. наук (КФУ, Казань)
E-mail: DMPashin@kpfu.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 подрисовочных подписях или в тексте статьи. Внутрисовочные 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. Подрисовочная подпись: размер шрифта – 9 пт, пояснение к подрисовочным 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**

2025, № 4 (122)

Ответственный за выпуск *Е.М. Зиннатуллина*
Компьютерная верстка – *А.А. Золина*

Подписано в печать 20.12.25. Выход в свет 25.12.25
Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 13,5.
Тираж 200. Заказ А46. 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