

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Мукатдаров А.А., Вафин Д.Б.</i> Температурное поле в туннельной печи обжига керамических кирпичей.....	3
<i>Попов И.А., Гуреев М.В., Жукова Ю.В., Лукманов Р.Р., Попов И.А.</i> Гидродинамические процессы в героторном масляном насосе системы смазки дизельного двигателя: компьютерное моделирование.....	9
<i>Радаев А.В., Сабирзянов А.Н., Васенева Н.А.</i> Экспериментальное исследование растворимости сверхкритических флюидов в углеводородах при наличии пористой среды.....	20
<i>Тимеркаев Б.А., Мухаметзянов Г.Р., Захарова А.Д., Байрамгулов А.А.</i> Электродуговой синтез карбида молибдена.....	27
<i>Тукмаков Д.А., Ахунов А.А., Тукмаков А.Л.</i> Анализ транспортных свойств конечно-разностной схемы предиктор – корректор при моделировании нестационарной динамики двухкомпонентного газа.....	33
<i>Тукмаков Д.А., Ахунов А.А., Тукмаков А.Л.</i> Анализ транспортных свойств конечно-разностной схемы предиктор – корректор при моделировании нестационарной динамики полидисперсной газовой смеси.....	39

МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Валиев А.И., Хисамиев И.Л., Мильчаков В.А., Низамутдинов Р.И.</i> Воздушное судно с программно-управляемым распределением тяги вертикального взлета и посадки.....	44
<i>Габдрахманов А.Т., Галиакбаров А.Т., Баимаков Д.А., Рахимов Р.Р.</i> Сравнительная характеристика изделий, полученных методами лазерной и дуговой сварки.....	54
<i>Галимов Э.Р., Шарафутдинова Э.Э., Галимова Н.Я., Кузьмина И.А., Галимов Р.И.</i> Технологии получения, структура и свойства углеродных пен на основе природного сырья, продуктов их обработки и отходов производств (обзор).....	62
<i>Галиновский А.Л., Болдырев В.С., Янко М.А.</i> Абразивно-жидкостная диагностика рабочих органов сельскохозяйственных машин: методология и перспективы применения.....	70
<i>Гуреев В.М., Футин В.А., Сидоров А.В., Шарафеев Р.Ф., Чучкалов М.В.</i> Определение параметров силовой осевой турбины газотурбинного двигателя газоперекачивающего агрегата при изменении угла установки соплового аппарата и постоянном перепаде давления.....	77
<i>Субаева А.К., Глуценко А.А., Салахутдинов И.Р., Замальдинов М.М.</i> Методика оптимизации выбора технологий регенерации отработанных масел.....	85

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

<i>Азов М.С., Галиуллин И.Г., Густов Е.С., Чикрин Д.Е., Фахрутдинов А.Ф.</i> Универсализованная процедура формирования АНRS-оценки беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа.....	92
<i>Морозов О.Г., Морозов Г.А., Никишина О.В.</i> Коаксиальные кабельные интерферометры Фабри – Перо в задачах контроля диэлектрической проницаемости жидких сред.....	103
<i>Морозов О.Г., Морозов Г.А., Никишина О.В., Фархутдинов Р.В.</i> Термокомпенсированный измеритель уровня жидкости на полом воздушном и двух металлокерамических коаксиальных кабельных интерферометрах Фабри – Перо.....	112
<i>Мухаметзянов О.А., Седов С.С., Салдаева П.А.</i> Алгоритм регистрации локальных максимумов электрических сигналов сердца для задач электрокардиографии высокого разрешения.....	122
<i>Щербакова Т.Ф., Седов С.С., Запорожец Р.Ю.</i> Алгоритм и система регистрации и предварительной обработки динамических параметров движения весел в академической гребле.....	127

CONTENTS

PHYSICAL SCIENCE

<i>Mukatdarov A.A. and Vafin D.B. Temperature field in a tunnel kiln for firing ceramic bricks</i>	3
<i>Popov I.A., Gureev M.V., Zhukova Yu.V., Lukmanov R.R., and Popov I.A. Hydrodynamic processes in a gerotor oil pump of a diesel engine lubrication system: computer modeling</i>	9
<i>Radaev A.V., Sabirzyanov A.N., and Vaseneva N.A. Experimental study of solubility of supercritical fluids in hydrocarbons in the presence of porous medium</i>	20
<i>Timerkaev B.A., Mukhametzyanov G.R., Zakharova A.D., and Bayramgulov A.A. Electric arc synthesis of molybdenum carbide</i>	27
<i>Tukmakov D.A., Akhunov A.A., and Tukmakov A.L. Analysis of the transport properties of a finite-difference predictor–corrector scheme in modeling the non-stationary dynamics of a two-component gas</i>	33
<i>Tukmakov D.A., Akhunov A.A., and Tukmakov A.L. Analysis of the transport properties of a finite-difference predictor–corrector scheme in modeling non-stationary dynamics of a polydisperse gas suspension</i>	39

MECHANICAL ENGINEERING

<i>Valiev A.I., Khisamiev I.L., Milchakov V.A., and Nizamutdinov R.I. A vertical take-off and landing aircraft with software-controlled thrust vectoring</i>	44
<i>Gabdrakhmanov A.T., Galiakbarov A.T., Bashmakov D.A., and Rakhimov R.R. Comparative characteristics of products obtained by laser and arc welding methods</i>	54
<i>Galimov E.R., Sharafutdinova E.E., Galimova N.Ya., Kuzmina I.A., and Galimov R.I. Production technologies, structure and properties of carbon foams based on natural raw materials, their processing products and industrial waste: a review</i>	62
<i>Galinovskii A.L., Boldyrev V.S., and Yanko M.A. Abrasive-liquid diagnostics of working parts of agricultural machinery: methodology and application prospects</i>	70
<i>Gureev V.M., Futin V.A., Sidorov A.V., Sharafeev R.F., and Chuchkalov M.V. Determination of the parameters of a power axial turbine of a gas turbine engine of a gas pumping unit with a change in the angle of installation of the nozzle apparatus and a constant pressure drop</i>	77
<i>Subaeva A.K., Glushchenko A.A., Salakhutdinov I.R., and Zamaldinov M.M. A method for optimizing the selection of technologies for the regeneration of used oils</i>	85

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT MAKING AND COMMUNICATIONS

<i>Azov M.S., Galiullin I.G., Gustov E.S., Chikrin D.E., and Fakhrutdinov A.F. Universalized procedure for forming AHRS estimates for multirotor unmanned aerial vehicles</i>	92
<i>Morozov O.G., Morozov G.A., and Nikishina O.V. Coaxial cable Fabry–Perot interferometers in liquid media dielectric control</i>	103
<i>Morozov O.G., Morozov G.A., Nikishina O.V., and Farkhutdinov R.V. A thermocompensated liquid level meter based on a hollow air and two metal-ceramic coaxial cable Fabry–Perot interferometers</i>	112
<i>Mukhametzyanov O.A., Sedov S.S., and Saldaeva P.A. Algorithm of electrical heart signals’ local maxima registration for high-resolution electrocardiography tasks</i>	122
<i>Scherbakova T.F., Sedov S.S., and Zaporozhets R.Yu. Algorithm and system for registration and primary processing of dynamic oar movement parameters in academic rowing</i>	127

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ В ТУННЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ОБЖИГА КЕРАМИЧЕСКИХ КИРПИЧЕЙ

А.А. Мукатдаров, Д.Б. Вафин

Экспериментальным путем определяется температурное поле в туннельной печи для обжига облицовочного керамического кирпича с улучшенными эстетическими свойствами, предназначенного для строительства жилых помещений. Представлены результаты температурных измерений, выполненных с помощью термопар, закрепленных на пачках кирпичей, перемещаемых на вагонах вдоль печного канала. Температура регистрировалась на различных участках объема промышленной туннельной печи, оснащенной скоростными газовыми горелками, установленными в зоне обжига. Полученные данные представлены в виде графических зависимостей температуры от времени обжига для каждой из использованных термопар. Проведенные эксперименты показали, что при расположении горелок исключительно на своде зоны обжига формируется значительный температурный градиент между верхней и нижней частями печного туннеля, а также внутри садки кирпича. Данное обстоятельство может приводить к браку готовых изделий в отдельных слоях загрузки.

Ключевые слова: керамический кирпич, туннельная печь, обжиг, горение, газовые горелки, теплообмен, температура.

Для отделки наружных поверхностей строящихся домов в последнее время широко применяются керамические кирпичи разного цвета и высокого качества. Актуальной задачей является повышение качества, надежности и эстетических параметров облицовочных кирпичей при использовании местного сырья. Свойства кирпичей зависят от состава сырья и во многом обеспечиваются организацией процесса теплообмена в зоне обжига кирпичей. При производстве большинства строительных и теплоизоляционных материалов важную роль играют процессы тепловой обработки [1–3]. Качество керамических кирпичей во многом определяется составом сырья и энергоемкими этапами сушки и обжига. В процессе обжига, проводимого при температурах до 1000 °С, происходят физико-химические процессы, изменяющие фазовый состав и теплофизические свойства материала кирпичей. При нагреве кирпича-сырца примерно до 120 °С удаляется влага, при 300–400 °С выгорают примеси органического происхождения. Основные фазовые превращения наблюдаются при температурах выше 550 °С. При 600 °С разрушаются глинистые минералы, при $t > 870$ °С возникает стекловидная жидкая фаза, которая заполняет поры. Процесс обжига происходит при возникновении эндо- и экзотермических пирохимических реакций. Материал кирпичей при медленном охлаждении от 1000 до 700 °С из пиропластического состояния переходит в твердое состояние. На завершающем этапе охлаждения после 500 °С фазовые превращения прекращаются.

Термическая обработка кирпича-сырца происходит в пачках (садках) в виде прямоугольного параллелепипеда достаточно большого объема, которые установлены на вагонах в печах обжига. Важно обеспечить необходимый температурный режим обжига для кирпичей во всех местах пачек. Возникновение большой неравномерности температуры обжига в различных местах пачек может привести к увеличению доли некачественных кирпичей. В данной работе приводятся некоторые результаты измерения температур в туннельной печи обжига Кошачковского кирпичного завода.

Обжиг кирпичей на заводе происходит в длинной туннельной печи прямоугольного сечения (рис. 1). Длина туннеля печи – 172 м, внутренняя ширина канала – 9 м. Одновременно в печи находится 41 вагон.

Вагоны с пачками кирпичей перемещаются вдоль туннельной печи навстречу потоку продуктов сгорания скоростных газовых горелок, расположенных на своде зоны обжига печей. Физико-химические превращения реализуются за счет теплообмена, организованного по противоточной схеме при обтекании теплоносителем пачек кирпича.

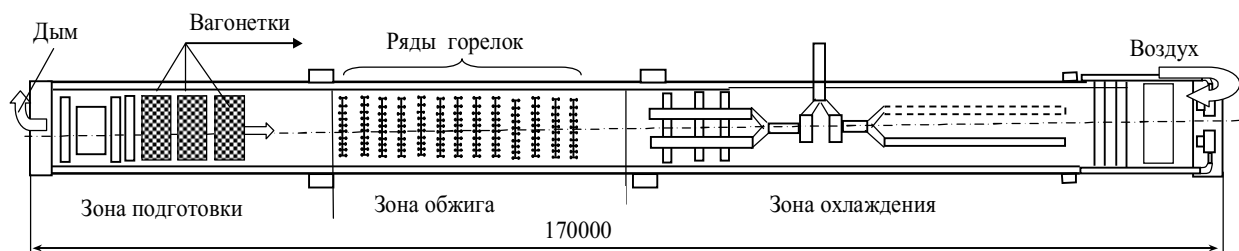


Рис. 1

Туннельную печь можно условно разделить на зону подготовки, зону обжига и зону охлаждения. В конечной зоне охлаждения установлены вентиляторы, нагнетающие воздух снаружи. Охлаждая пачки кирпичей, воздух аккумулирует отводимую от изделий тепловую энергию, последовательно повышая свою температуру. Подогретый таким образом воздух в дальнейшем подается в зону горения, где используется в качестве окислителя для формирования газовой смеси, поступающей через горелочные устройства.

Измерения проводились при обжиге кирпичей марки М-125, М1501НФ. На одном вагоне размещаются 32 пачки кирпичей, в каждой пачке 616 кирпичей. Длина вагона печи – 4,2 м, ширина – 8,85 м. 8 пачек расположены по ширине туннеля и в три ряда вдоль вагона. Расстояние между рядами пачек примерно 0,4 м. Вагон подается в туннель в торец зоны охлаждения из сушильной камеры. Данное перемещение приводит к синхронному продвижению всех вагонов, находящихся в технологическом канале печи, на расстояние, эквивалентное длине одного вагона. За один день вдоль туннеля перемещается 9 вагонов. Ряды горелок, работающих на природном газе, при остановках вагонов оказываются между рядами пачек на вагоне, и горелки запускаются. Одиннадцать рядов горелок типа BERNINI расположены на своде зоны обжига. Дополнительная подача воздуха на горелки производится одним общим вентилятором мощностью 7,5 кВт, расположенном на своде, и еще восемнадцатью вентиляторами мощностью 3 кВт. Средний расход воздуха одной горелки – 0,3 м³/с при $t = 3,3$ °С. Для местного сырья в зависимости от состава кирпич-сырец в зоне обжига должен выдерживаться 9–13 ч при температуре 960–980 °С.

Температурное поле исследовалось с помощью термопар CeriDry, подключенных к системе радиотелеметрии типа Dataq Kiln Tracker.

На рис. 2 показаны места размещения термопар на пачках вагона с кирпичами. Термопары Т1, Т2, Т3, Т4, Т6, Т7 размещены на садках со стороны продуктов сгорания, Т5 находился над загрузкой. Термопары Т8 и Т9 были замурованы в кирпичи, размещение которых в пачке также показано на рис. 2.

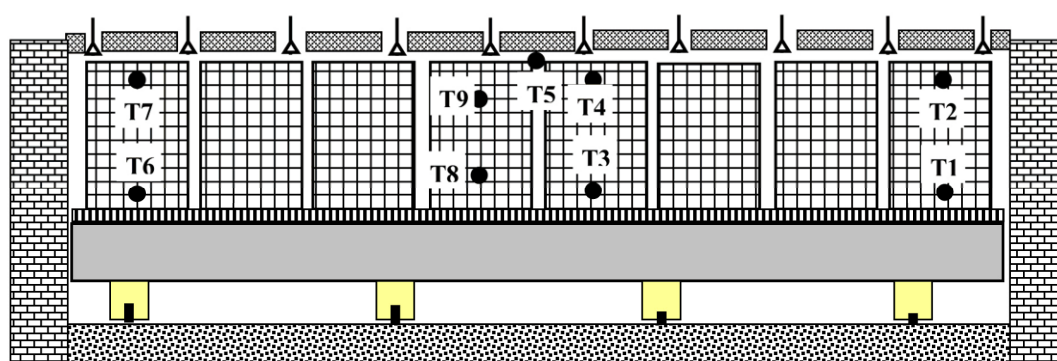


Рис. 2

На тележке, перемещающейся рядом с каналом туннельной печи, синхронно с вагоном кирпичей в туннеле был расположен персональный компьютер, подключенный к дистанционному регистратору. Регистратор с опцией FullRadio считывал сигналы термопар по беспроводной связи в режиме реального времени. Данные каждой термопары практически каждую секунду регистрировались компьютером при перемещении вагона с кирпичами вдоль туннеля печи. Интерфейс связи регистратора с компьютером обеспечивал двустороннюю передачу данных в программу обеспечения TMI-Orion Qlever.

Опыты повторялись для нескольких циклов обжига кирпичей в разные периоды работы печи. Некоторые результаты без замурованных в кирпичи термопар были опубликованы в работе [4].

Режим обжига печи регулировался с пульта управления с использованием показаний штатных датчиков температуры и датчиков давления (25 шт.), расположенных вдоль свода канала печи.

На рис. 3 показаны кривая контроля температуры в туннеле печи и график изменения температуры газов, полученный по показаниям штатных датчиков. Сплошная линия построена по показаниям датчиков температуры для разных позиций вагона. Штриховой линией обозначены необходимые значения температуры для режима обжига. Штатные датчики показывают температуру теплоносителя только над пачками кирпичей. Для установления равномерности нагрева кирпичей в разных местах туннеля печи и были проведены данные эксперименты.

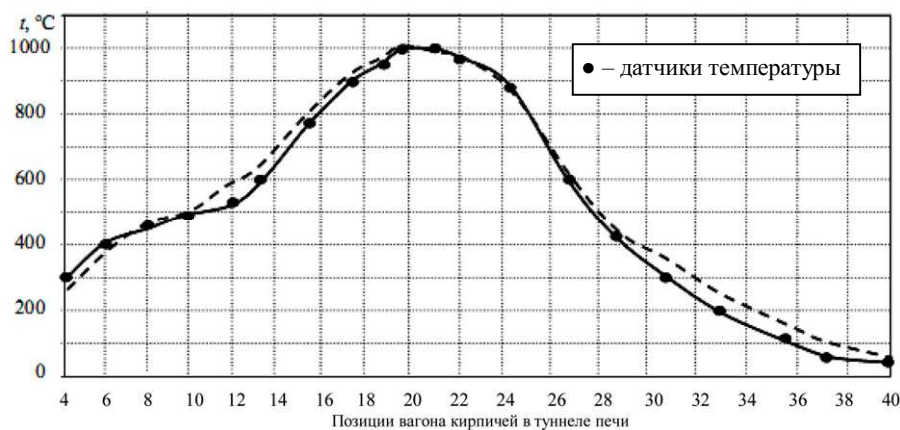


Рис. 3

На рис. 4 представлены графики изменения температуры теплоносителя по времени перемещения вагона кирпичей в течение цикла обжига, построенные по показаниям термопар Т1–Т7. Как было отмечено, эти термопары не замурованы в кирпичи. Общий цикл обжига – 1001 ч.

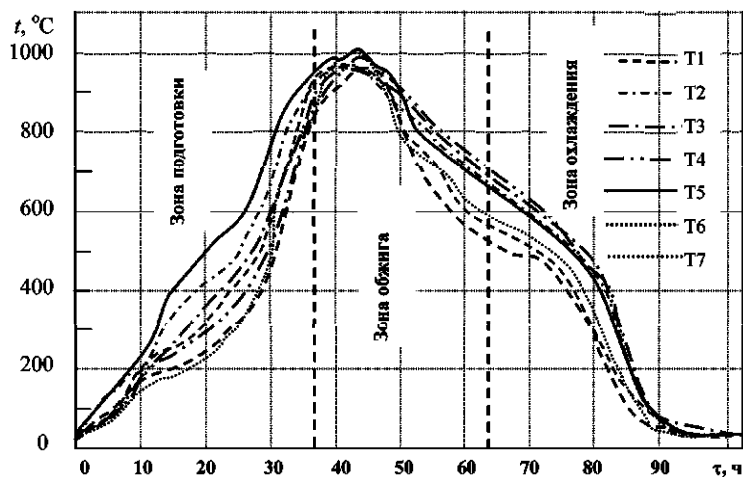


Рис. 4

Вытяжка продуктов сгорания производилась через щель в своде с помощью основного вентилятора с вариатором скорости и вентилятора разбавления, расположенного на стенке зонта вытяжки. Температура вытяжки печи составляла около 98 °C. В начальной зоне печного канала, непосредственно после входа, в верхней части загрузки кирпича реализуется режим интенсивного нагрева. В течение 1 ч температура материала повышается с 25 до 200 °C.

На начальном участке зоны поджога осуществляется смешение теплоносителя, поступающего на стадию обжига. Для этого используются два вентилятора, которые обеспечивают забор воздуха через пять боковых щелей, симметрично расположенных с обеих сторон печного канала, с последующей его

подачей через пять щелей, выполненных в своде печи. В результате указанной рециркуляции наблюдается выравнивание температурных полей по высоте загрузки в интервале времени, приближающемся к 10 ч технологического цикла. При этом температура в верхней части загрузки незначительно снижается, а в нижней части – повышается. Однако на выходе из участка смешения, непосредственно перед зоной обжига, разница значений температуры между верхом и низом загрузки увеличивается, достигая величины 250–270 °С.

Все рампы с горелками BERNINI в зоне обжига регулируются шкафом управления. Воздух для горения регулируется сервомотором. Общий расход сухого воздуха на горение – 0,3 кг/с при 33 °С. Максимально достигнутые температуры (995...1005 °С) фиксируются в левой части печи (Т6), минимально достигнутые температуры наблюдаются в зоне обжига (958...968 °С) (Т1, Т2).

Как видно из рис. 4, максимальная температура теплоносителя в зоне подготовки и начале зоны обжига наблюдается над загрузками кирпичей (Т5). На этапе предварительного нагрева температура нижней части загрузки оказывается более чем на 200 °С ниже по сравнению с верхней. Устранение указанного перепада в зоне обжига технически затруднено. Вся загрузка находится при температуре выдержки только в середине зоны обжига. Правая нижняя загрузка (Т1) в конце зоны обжига остается самой холодной. Это, видимо, связано с разреженностью зоны обжига печи, что осложняет нагрев низа загрузки.

Система быстрого охлаждения включает четыре простых чередующихся ряда и пять простых рядов рекуперации, которые в совокупности оснащены 40 соплами. Каждая полурампа (или каждая из полурамп) снабжена собственным вентилятором. На выходе из зоны обжига наблюдается изменение температуры с левой стороны печи. Температура остатка загрузки выше температуры воздуха (Т5). Разница температур достигает 180 °С на выходе рекуперации.

Можно заметить, что вся загрузка проходит точку кварца с низким градиентом температуры 10 °С, что способствует отсутствию трещин при охлаждении кирпичей. При выходе рекуперации вся загрузка охлаждается до температуры ниже 60 °С.

Система наддува печи состоит из четырех простых щелевых каналов, которые, в свою очередь, разделены на два щелевых канала – правый и левый. В этих же каналах расположены правый и левый боковые воздухопроводы наддува. Рис. 4 иллюстрирует эффективность наддува загрузки печи: вся загрузка на выходе из печи охлаждается примерно до 30 °С.

На рис. 5 показано изменение температуры в зависимости от времени обжига. Графики построены по данным термопар Т3, Т4, Т8, Т9. Термопары Т3, Т4 были установлены снаружи пачки кирпичей, а Т8 и Т9 были замурованы внутри кирпичей в средней части соседней пачки.

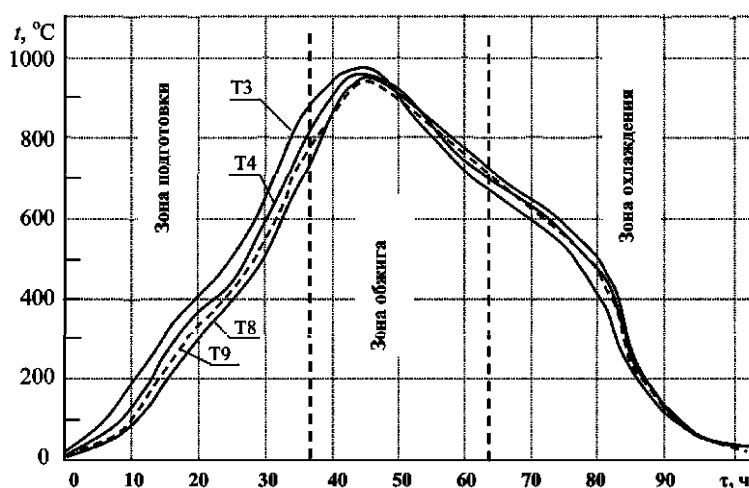


Рис. 5

Таким образом, проведены одновременные измерения температуры снаружи и внутри садок кирпичей, расположенных в разных местах вагона в процессе всего его перемещения вдоль туннеля действующего кирпичного завода. Результаты исследования представляют научную ценность.

При только сводовом расположении газовых горелок в зоне обжига в туннельной печи большой протяженности система нагрева полностью не обеспечивает необходимый температурный режим для физико-химических процессов обжига кирпичей во всех объемах садов, расположенных в разных местах вагонов, перемещаемых вдоль туннеля печи. Эффективность работы печи не удастся полностью обеспечить только автоматизацией регулирования работы горелок по данным штатных датчиков температуры, расположенных вдоль туннеля печи.

Согласно результатам эксперимента в процессе перемещения вагонов кирпичей возникает существенная разница нагрева низа и верха пачек при существующем только верхнем расположении горелок в зоне обжига. Температура низа загрузки при предварительном нагревании более чем на 200 °С ниже, чем верхних рядов. Наблюдаются существенные расхождения значений температуры на поверхности пачки кирпичей и внутри пачки. Прогрев кирпичей в глубине пачки почти до конца зоны обжига происходит медленнее, чем на поверхности. В зоне охлаждения внутренние кирпичи остывают медленнее, чем наружные. Это связано с особенностями теплообмена на поверхностях и внутри пачек. Снаружи происходит лучистый и конвективный теплообмен кирпичей с продуктами сгорания. Внутри садки в основном наблюдается конвективный теплообмен с просочившимся между кирпичами теплоносителем, а также поступление теплоты за счет теплопроводности полупроницаемой садки.

Из рис. 5 видно, что внутри садки кирпичи нижних рядов в зоне обжига не достигают требуемой температуры 960 °С. Непосредственно в зоне обжига степень неравномерности обжига кирпичей в пределах пачки может составлять 25 %. Вследствие этого возможно возникновение неоднородности окраски поверхности кирпичей, черной сердцевины и трещин. Уменьшение неравномерности прогрева пачки кирпичей нельзя выполнить за счет увеличения температуры теплоносителя, так как это может привести к ухудшению качества кирпичей верхних слоев. Предлагается уменьшить количество кирпичей на верхних рядах пачки для увеличения проходных сечений для теплоносителя или несколько изменить форму пачек.

Рекомендуется установить ряд горелок в предобжиговой зоне для уменьшения разницы температур между верхними и нижними рядами кирпичей в пачках.

Для определения оптимальных мест установления этих горелок предполагается провести численные эксперименты по установлению особенностей теплообмена по методу, использованному в работах [2, 5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Наумов В.Л. и др.* Состояние вопроса и перспективы математического моделирования термической обработки керамических изделий в обжиговых печах. Иваново: ИГХТУ, 2005. 56 с.
2. *Садыков А.В.* Тепловой расчет печи производства керамзита // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2024. № 3. С. 8–12.
3. *Рахматуллина Р.Г. и др.* Моделирование и методика проведения исследований теплофизических характеристик конструкционных и теплоизоляционных материалов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2023. № 1. С. 36–39.
4. *Вафин Д.Б., Мукатдаров А.А., Мукатдарова Д.А.* Тепловое состояние в туннельной печи обжига кирпичей со сводовым расположением горелок // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2024. № 3. С. 184–193.
5. *Вафин Д.Б., Садыков А.В.* Трехмерные области полей температуры и аэродинамических условий в технологических печах коробчатого типа // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2011. № 4. С. 13–19.

Поступила в редколлегию 23.12.25

TEMPERATURE FIELD IN A TUNNEL KILN FOR FIRING CERAMIC BRICKS

A.A. Mukatdarov and D.B. Vafin

The temperature field in a tunnel kiln for firing ceramic facing bricks with improved aesthetic properties, intended for residential construction, is experimentally determined. The results of

temperature measurements are presented, using thermocouples attached to brick stacks transported on wagons along the kiln channel. Temperature was recorded at various points within the industrial tunnel kiln, equipped with high-speed gas burners installed in the firing zone. The obtained data are presented as graphical plots of temperature versus firing time for each thermocouple used. Experiments have shown that when burners are positioned exclusively at the roof of the firing zone, a significant temperature gradient develops between the upper and lower sections of the kiln tunnel, as well as within the brick load. This circumstance can lead to defective finished products in certain layers of the charge.

Keywords: ceramic brick, tunnel furnace, firing, combustion, gas burners, heat transfer, temperature.

Мукатдаров Алик Альбертович – аспирант (КГЭУ, Казань)

E-mail: alikjan1155@yandex.ru

Вафин Данил Биалович – д-р техн. наук (КГЭУ, Казань)

E-mail: vafdanil@yandex.ru

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГЕРОТОРНОМ МАСЛЯНОМ НАСОСЕ СИСТЕМЫ СМАЗКИ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ: КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

И.А. Попов, М.В. Гуреев, Ю.В. Жукова, Р.Р. Лукманов, И.А. Попов

Представлены результаты, являющиеся методической основой для создания компьютерной модели героторного масляного насоса системы смазки дизельного двигателя. Предложен метод реверс-инжиниринга рабочих характеристик насоса и построена его рабочая характеристика. Модель героторного масляного насоса масштабирована на различные типоразмеры. Компьютерная модель валидирована на основе экспериментальных данных. С использованием результатов проведенных расчетов выработаны рекомендации по повышению точности построения компьютерной модели героторного масляного насоса.

Ключевые слова: система смазки, масляный насос, рабочая характеристика насоса, численное моделирование, компьютерная модель.

Введение

Численное моделирование гидродинамических процессов в системах смазки является актуальной задачей при проектировании новых образцов дизельных двигателей. Масляный насос играет ведущую роль в функционировании систем смазки, обеспечивая постоянное и равномерное снабжение двигателя необходимым количеством масла, что, в свою очередь, гарантирует эффективную и стабильную работу всей системы.

Современные дизельные двигатели оснащаются шестеренчатыми насосами для масляных систем. Разновидностью подобных насосов являются героторные насосы. Героторный насос – это разновидность объемного шестеренного насоса с внутренним зацеплением (рис. 1). Внутренний подвижный приводной зубчатый ротор планетарно вращается во внешнем подвижном зубчатом роторе. Внутренний зубчатый ротор установлен в статоре с эксцентриситетом (рис. 2, *а*). Внешний зубчатый ротор (рис. 2, *б*) имеет обычно на один зуб больше, чем на роторе. При движении ротора в насосе образуются замкнутые камеры, объем которых изменяется во времени. Область, в которой объем рабочей камеры увеличивается, соединена с линией всасывания. В момент увеличения объема рабочей камеры жидкость заполняет полость героторного насоса. Область, в которой объем камеры уменьшается, соединена с линией нагнетания, где жидкость вытесняется в напорный трубопровод. Функционирование привода насоса обеспечивается коленчатым валом двигателя через систему шестерней (рис. 2, *в*).

Для создания цифровых двойников систем смазки двигателей могут применяться подходы одномерного [1, 2] и трехмерного [3–5] численного моделирования. В данной работе использованы подходы трехмерного численного моделирования.

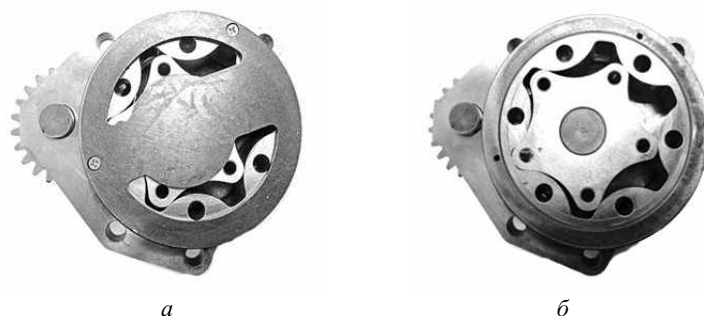


Рис. 1. Героторный масляный насос с пятизубчатым ротором в сборке (*а*) и со снятой крышкой с окнами подвода и отвода масла (*б*)



Рис. 2. Внутренний приводной подвижный ротор (а), внешний подвижный ротор (б) и система приводных шестерен насоса (в)

Объектом исследования являлся героторный масляный насос с пятью зубьями на роторе.

Компьютерная модель насоса

На первом этапе создания компьютерной модели разрабатывалась цифровая 3D CAD-модель конструкции героторного масляного насоса. Для разработки твердотельной 3D-модели базовой конструкции героторного масляного насоса производилось сканирование ведомого и ведущего роторов на оптическом стационарном сканере с получением поверхностей, сформированных облаком точек. Далее с использованием облака точек формировалась твердотельная 3D-модель в программном комплексе Siemens NX. Так как роторы имеют прямые образующие, то на основе 2D-сканирования создается скан плоских базовых поверхностей изделия, из которых выделяются эскизы профилей деталей совместно с отверстиями вырезов. Затем производится вытягивание по образующим на высоту, соответствующую толщине роторов (рис. 3, а). Таким образом, построение трехмерных моделей ведущего и ведомого роторов героторного насоса осуществляется без применения 3D-сканирования, на основе исключительно двухмерных сканированных данных. На следующем шаге производится виртуальная сборка изделия (рис. 3, в) – ведомого и ведущего роторов, вала ведущего ротора, корпуса и крышки героторного масляного насоса (рис. 3, б), проверяется сопряжение конструкции, точность сборки изделия и его виртуальная работоспособность.

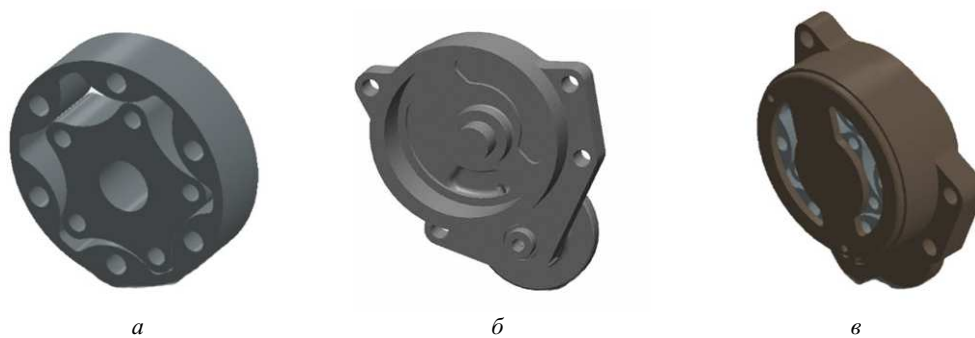


Рис. 3. Формирование твердотельных 3D-моделей ведущего и ведомого роторов (а) и корпуса насоса (б), результат виртуальной сборки героторного масляного насоса (в)

Проверка размеров модели героторного масляного насоса производится с использованием конструкторской документации, включающей сборочный чертеж насоса.

Основы математической модели гидродинамических процессов в насосе, компьютерная модель и расчетные сетки

На втором этапе создания компьютерной модели производилось математическое и численное моделирование гидродинамических процессов в насосе в программном комплексе ANSYS CFX.

Математическая модель реализуется решением дискретных аналогов системы уравнений гидродинамики, включающей уравнения неразрывности и количества движения [6]. При этом для дискретизации уравнений применяется метод конечных объемов с привлечением решателя на основе расчета давления.

Расход масла в системе достаточно велик, а вязкость мала в связи с высокой температурой масла, что обеспечивает высокие значения числа Рейнольдса. Для численного моделирования выбран метод URANS (решение нестационарных уравнений Навье – Стокса), который предполагает решение нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса и уравнения неразрывности. Временной шаг выбирается равным времени поворота геротора на 1° . Проблема замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса сводилась к определению рейнольдсовых напряжений и записи дополнительных дифференциальных уравнений для характеристик турбулентности. Для замыкания рейнольдсовых напряжений применена k - ω -модель переноса сдвиговых напряжений Ментера [7]. Данная модель сформулирована и реализована таким образом, что позволяет с достаточной степенью точности описывать как процессы в пограничных слоях около стенок, так и особенности эволюции свободных, закрученных и струйных течений. Стыковочная функция в модели Ментера конструируется с целью наиболее адекватного учета переноса напряжения трения в пределах пограничного слоя. Благодаря указанной особенности SST-модель сочетает преимущества стандартных k - ϵ - и k - ω -моделей турбулентности.

Теплофизические свойства рабочего тела (моторное масло 15W40) выбирались при рабочей температуре 107°C .

Граничные условия задавались на входе в расчетную область (условие нулевого среднеинтегрального давления (атмосферное давление)), на выходе из расчетной области задано давление в зависимости от расхода и частоты вращения. Рассматривались частоты вращения внутреннего ведущего ротора насоса 1050, 1750, 2450, 3675 об/мин, которые соответствуют частотам вращения коленчатого вала 600, 1000, 1400, 2100 об/мин. Оценочно интенсивность турбулентности на входе в расчетную область задавалась 5 %, поскольку не была известна предыстория течения. На стенках, контактирующих с маслом, задавалось условие прилипания (равенство нулю скоростей).

Вследствие особенностей работы объемных насосов такого типа при моделировании гидродинамических процессов в них применять классический подход моделирования вращающихся систем (интерфейсная поверхность между статором и ротором) Multiple Frames of Reference не представлялось возможным. Был применен подход погруженного твердого тела, при котором вращающаяся твердотельная область (внутренний ротор) погружена в жидкую область (масляная среда) (рис. 4). В процессе взаимного вращения двух областей в каждый расчетный шаг при пересечении ячеек сетки жидкой области ячейками сетки твердого тела назначается условие стенки, для каждого расчетного шага формируется соответствующая расчетная область. Перекрытые элементы жидкости исключаются из расчета.

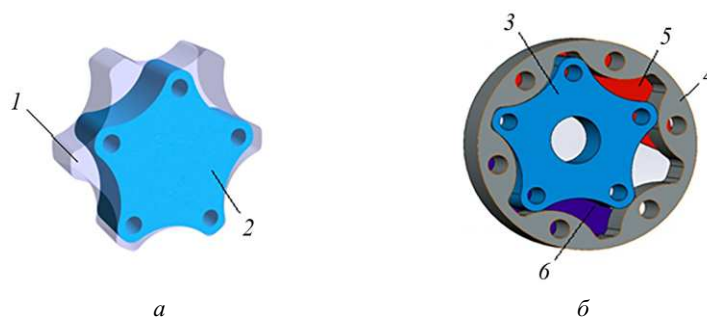


Рис. 4. Расчетные области масляного героторного насоса (а) и модели элементов насоса (б):
 1 – область жидкости; 2 – область твердого тела; 3 – внутренний ведущий ротор; 4 – внешний ведомый ротор;
 5 – патрубок высокого давления; 6 – патрубок низкого давления

Для создания конечно-объемной модели расчетной области насоса использовался сеточный генератор ANSYS Meshing. Конечно-объемная сетка покрывала стационарные патрубки (высокого и низкого давления) и две вращающиеся расчетные области (твердую и жидкую) (рис. 5, а). Так как перекрывающиеся элементы жидкости исключаются из расчета, то на каждом временном шаге расчета происходит перестроение расчетной сетки. Общая расчетная сетка насоса и прилегающих патрубков (рис. 5, б) состояла из 3,28 млн элементов (максимальный размер элемента – 2 мм, призматические пристеночные элементы содержат шесть слоев с коэффициентом роста 1,2). При этом жидкая и твердотельная области

описывались полиэдрическими элементами, а патрубки высокого и низкого давления – тетрагексагональными.

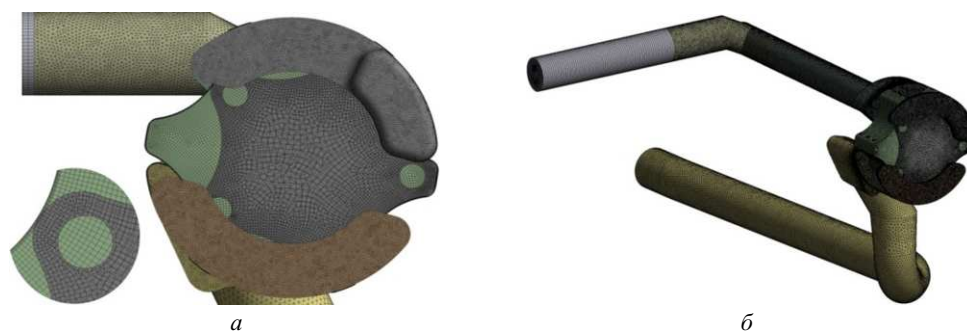


Рис. 5. Фрагменты расчетной сетки для моделирования гидродинамических процессов в масляном насосе (а) и подводящем и отводящем патрубках (б)

Расчетная модель передавалась в решатель ANSYS CFX Solver на высокопроизводительный вычислительный комплекс Altix UV 100 (60 ядер, 400 Гб оперативной памяти). Требуемая сходимость и установление постоянных значений основных интегральных параметров достигались для каждого временного шага после 400-й внутренней итерации.

В ходе проведения CFD-расчета гидродинамических процессов в насосе в нестационарной постановке наблюдались периодические колебания значения расхода масла. Для детального изучения данной особенности выполнен расчет трех полных оборотов ротора твердого тела. Анализ расчетных результатов показал, что при заданной частоте вращения коленчатого вала двигателя 1400 об/мин и среднем значении избыточного давления на выходе из насоса 0,2 МПа в проточной части насоса наблюдается локальное повышение давления до 0,3 МПа и понижение на 0,05 МПа. При оборотах двигателя 2100 об/мин и избыточном давлении на выходе 0,42 МПа в проточной части насоса наблюдается локальное повышение давления до 0,5 МПа и понижение на 0,1 МПа. Соответственно, присутствуют и пульсации расхода масла. При дальнейшем анализе используются средние значения давления и расхода масла.

Валидация и результаты численного исследования гидродинамических процессов в насосе

Основой для верификации является непротиворечивость полученных результатов сути происходящих процессов, т. е. должно соблюдаться сохранение баланса расхода между входом в расчетную область и выходом из нее. В процессе расчетов баланс соблюдался с точностью до 10^{-9} кг/с.

С целью валидации расчетного алгоритма проводилось численное моделирование для имеющихся технических данных (опорных точек), приведенных в технических характеристиках насоса в конструкторской документации. Сравнительный анализ паспортных и расчетных данных показал, что отклонение расчетного значения расхода масла (1,875 кг/с при давлении масла на выходе из насоса 420 кПа) при использовании моторного масла SAE 15W40 при температуре 107 °С от паспортного (1,916 кг/с) при частоте вращения ротора насоса 3675 об/мин (частоте вращения двигателя 2400 об/мин) составляет 2,19 %, а отклонение расчетного значения расхода масла (1,293 кг/с при давлении масла на выходе из насоса 211 кПа) от паспортного (1,396 кг/с) при частоте вращения ротора насоса 3675 об/мин (частоте вращения двигателя 2400 об/мин) составляет 7,96 %.

Валидация была проведена и для случая использования моторного масла SAE 10W40 при температуре 106 °С. Данные для верификации получены экспериментально при испытаниях рядного шестицилиндрового дизельного двигателя с рабочим объемом 8,9 л на испытательном стенде, созданном компанией AVL. Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных показал, что отклонение расчетного значения расхода масла (1,143 кг/с при давлении масла на выходе из насоса 515,5 кПа) от экспериментального (1,145 кг/с) при частоте вращения ротора насоса 2076,4 об/мин (частоте вращения двигателя 1404,5 об/мин) составляет 0,14 %, а отклонение расчетного значения расхода масла (0,942 кг/с

при давлении масла на выходе из насоса 418,9 кПа) от экспериментального (0,997 кг/с) при частоте вращения ротора насоса 2457,9 об/мин (частоте вращения двигателя 1186,5 об/мин) составляет 5,8 %.

Таким образом, в ходе верификации показана адекватность построенных компьютерной и математической моделей цифрового двойника масляного героторного насоса, а валидация позволила достичь достаточной точности для построения цифрового двойника масляного героторного насоса. Таким образом, разработанные достоверная компьютерная и математическая модели цифрового двойника могут использоваться для виртуальных испытаний с целью восстановления рабочих характеристик, визуализации происходящих процессов и последующего изменения конструкции.

Результаты численного моделирования гидродинамических процессов в масляном героторном насосе показали наличие периодических колебаний значения расхода масла в насосе, характерных для насосов объемного типа. Для детального изучения данной особенности выполнен расчет для характерного времени трех полных оборотов ведущего ротора. Анализ результатов показал, что при частоте вращения коленчатого вала двигателя 1400 об/мин и среднем значении избыточного давления на выходе из насоса 200 кПа в проточной части насоса наблюдаются локальное повышение давления до 300 кПа и понижение на 50 кПа. При оборотах двигателя 2100 об/мин и избыточном давлении на выходе 420 кПа в проточной части насоса наблюдается локальное повышение давления до 650 кПа и понижение на 100 кПа. Соответственно, присутствуют и пульсации расхода масла G . Характерные изменения избыточного давления масла на выходе из насоса $P_{\text{вых}}$, расхода масла через насос G в зависимости от угла поворота коленчатого вала φ показаны на рис. 6. В дальнейшем анализе используются средние значения давлений и расходов масла.

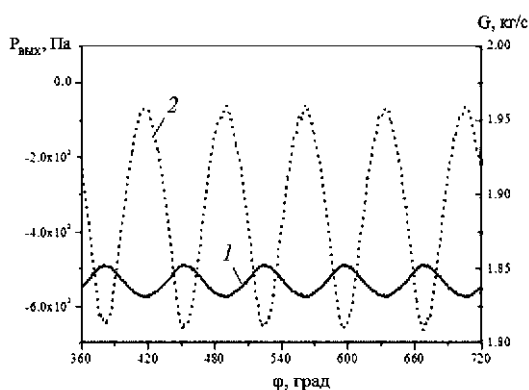


Рис. 6. Рабочие характеристики насоса в зависимости от угла поворота коленчатого вала φ :
1 – расход масла через насос; 2 – избыточное давление масла на выходе из насоса

Пульсации давления на выходе из насоса (см. рис. 6) обоснованы изменением давления в камерах сжатия и расширения в насосе, что демонстрирует рис. 7 (режим – 2100 об/мин (обороты ведущего ротора насоса – 3675 об/мин)).

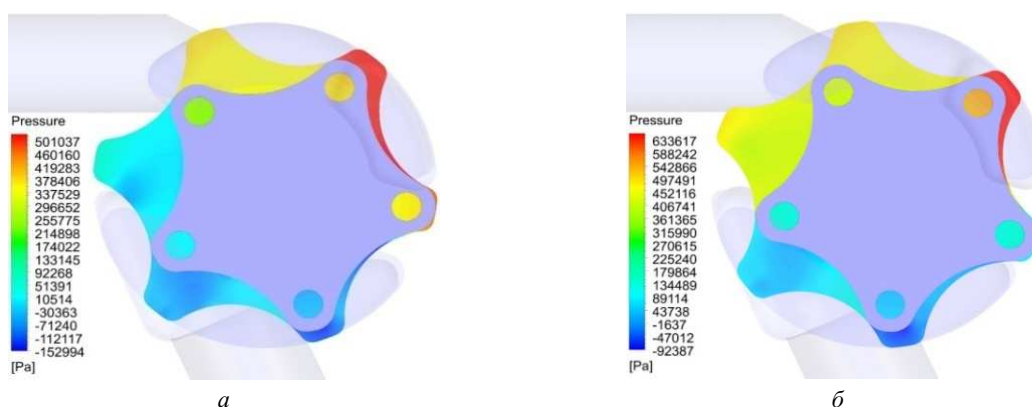


Рис. 7. Статическое давление масла в срединном сечении масляного насоса в различные моменты времени (углах):
а – 360°; б – 375°; в – 390°; г – 405°; д – 420°; е – 435°; жс – 450°; з – 465° (Начало)

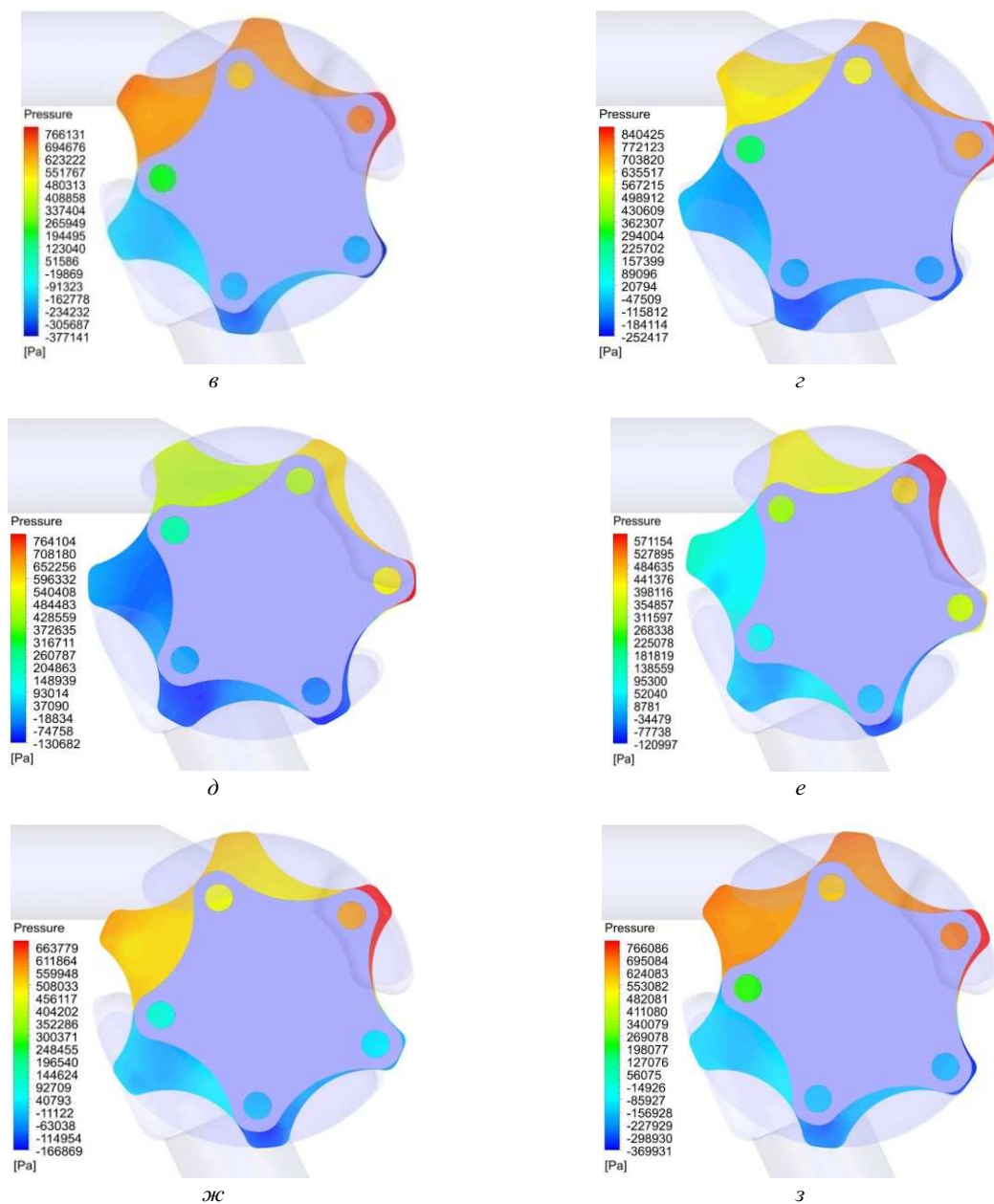


Рис. 7. Статическое давление масла в срединном сечении масляного насоса в различные моменты времени (углах):
a – 360°; *б* – 375°; *в* – 390°; *г* – 405°; *д* – 420°; *е* – 435°; *жс* – 450°; *з* – 465° (Окончание)

На рис. 8, 9 представлены поля давления масла в насосе, а также структура течения масла в насосе (режим – 2100 об/мин (обороты ведущего ротора насоса – 3675 об/мин)).

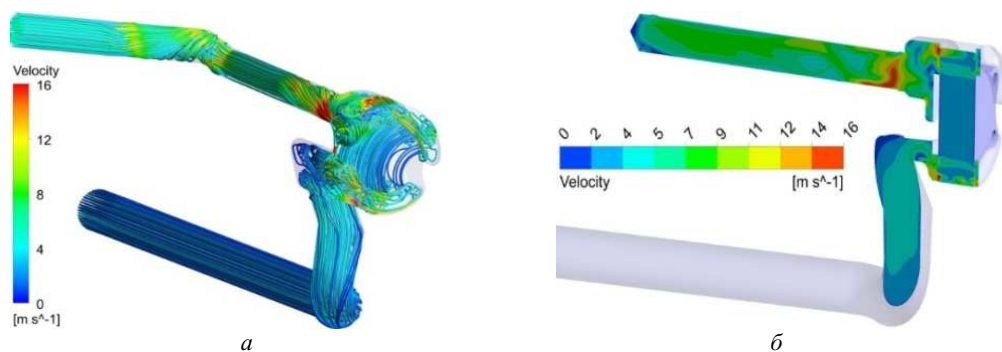


Рис. 8. Структура течения в масляном насосе:
a – объемное распределение скоростей; *б* – распределение скоростей в среднем сечении патрубков и насоса

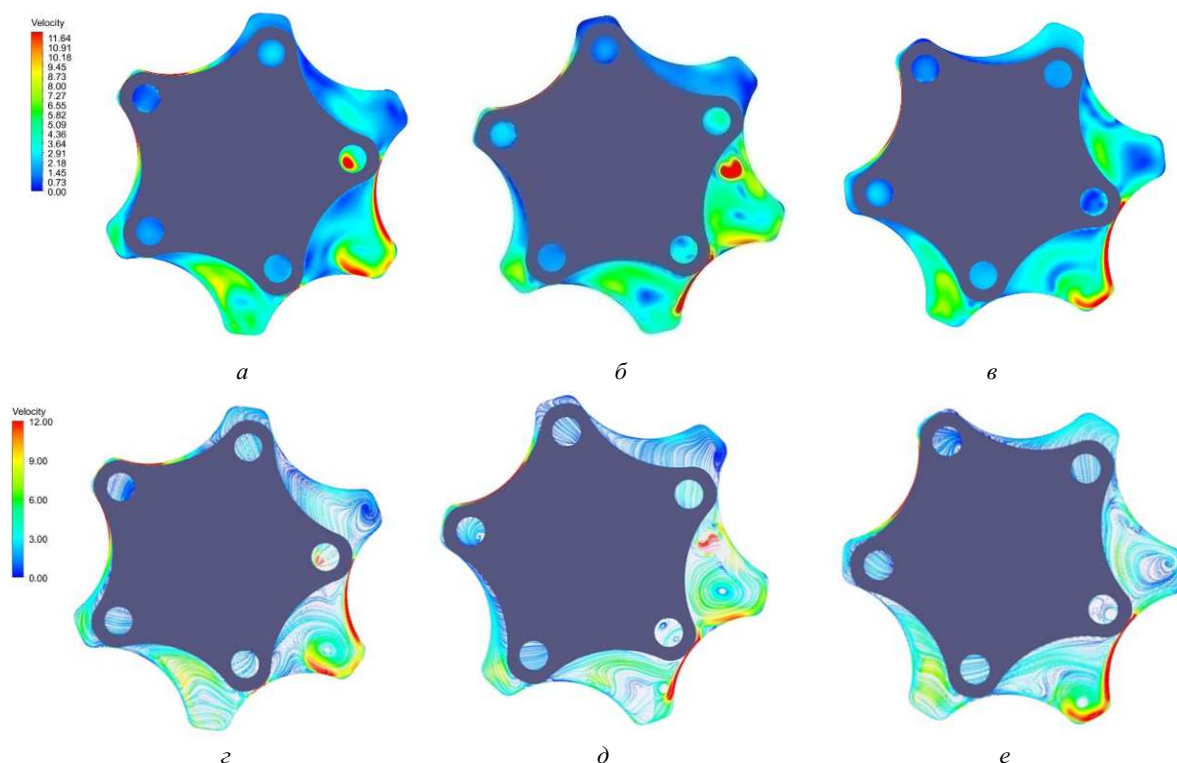


Рис. 9. Распределение скоростей (*а–в*) и линии тока (*г–е*) в срединном сечении масляного насоса в различные моменты времени (углах) : *а, г* – 370°; *б, д* – 390°; *в, е* – 420°

Результаты проведенного численного моделирования гидродинамических процессов в героторном насосе (см. рис. 9) выявили особенность процессов течения масла в межроторном пространстве. Между внутренним и внешним роторами практически всегда существуют радиальные зазоры. В каждый фиксированный момент времени контакт между внутренним и внешним роторами возможен лишь по единственной линии. В других точках между роторами имеется радиальный зазор. Установлено, что для данной конструкции максимальный радиальный зазор составляет около 0,065–0,09 мм. В конструкции насоса также предусмотрены боковые зазоры между роторами, крышкой и корпусом насоса. Наличие указанных зазоров обуславливает возникновение перетечек масла из области с повышенным давлением в зоны, где давление приближается к атмосферному значению, соответствующему условиям подачи масла из поддона картера двигателя. Для уменьшения боковых перетечек в рассматриваемой конструкции во внешнем и внутреннем роторах были выполнены сквозные отверстия, которые дополнительно улучшают смазку боковых поверхностей роторов.

Многовариантные расчеты насоса показали, что для увеличения точности расчетов протекающих процессов в межзубчатых зазорах насоса необходимо максимально увеличить количество расчетных ячеек. Например, увеличение количества узлов с 3,28 до 6,5 млн повысило точность расчетов примерно на 50 %. Уменьшение временного шага при изменении времени поворота геротора с 1 до 0,5° не оказало существенного влияния на точность получаемых результатов. В связи с этим необходим учет перетечек масла в данный момент взаимного расположения роторов, что реализуется за счет правильного выбора размеров ячеек расчетной сетки.

Реверс-инжиниринг рабочей характеристики насоса

Разработанные валидированные компьютерная и математическая модель цифрового двойника героторного масляного насоса позволили воссоздать расчетным путем рабочую характеристику насоса.

Виртуальное испытание насоса для воссоздания его рабочей характеристики производилось по приведенной математической модели. Изменению подверглись только граничные условия. Для расчета режима максимального расхода масла через насос при заданных оборотах вращения коленчатого вала на

выходе из расчетной области задавалось условие нулевого избыточного давления. Для расчета режима максимального давления масла на выходе из насоса при заданных оборотах вращения коленчатого вала на выходе из расчетной области задавалось условие стенки, т. е. нулевого расхода масла через насос. Затем производились расчеты расхода масла для промежуточных точек по избыточному давлению масла на выходе из насоса – от нулевого значения до максимального.

Рабочая характеристика насоса для случая течения в насосе (передаточное число от коленчатого вала к насосу – 1:1,75) моторного масла SAE 15W40 при температуре 107 °С показана на рис. 10.

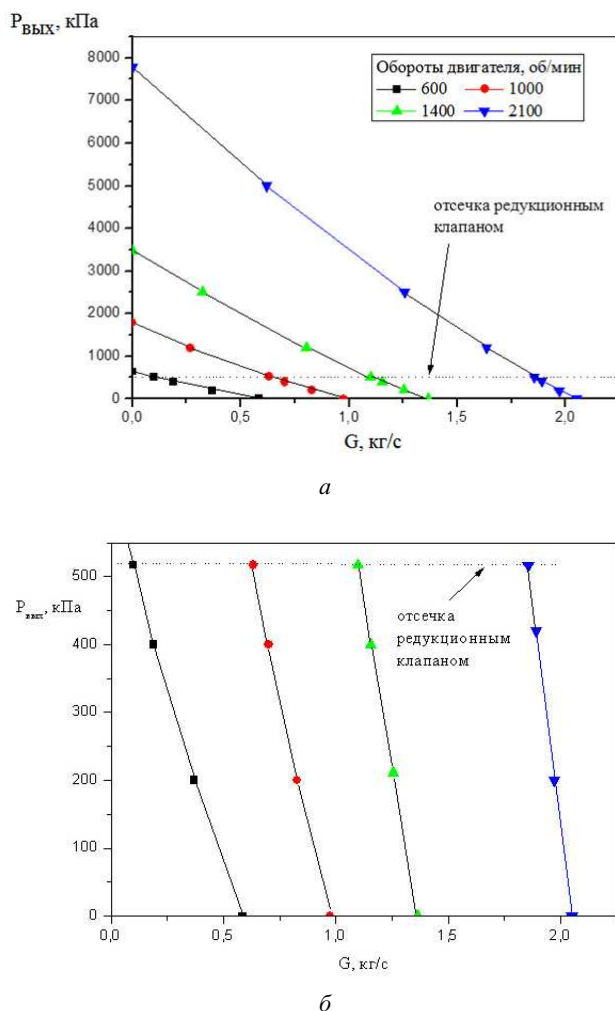


Рис. 10. Расчетная рабочая характеристика насоса:
a – полная характеристика; *б* – рабочая характеристика с учетом работы клапана регулировки давления

Для обеспечения работоспособности насоса в рамках системы установлен клапан регулировки давления, который обеспечивает поддержание давления в системе не выше 517 кПа. На основании этого на графике характеристики масляного насоса (см. рис. 10) проведено ограничение на уровне 517 кПа и все вышележащие значения параметров насоса не учитывались.

Масштабирование результатов исследования

Методы и подходы для героторного насоса с пятизубчатым ротором перенесены на насос с четырьмя зубьями на роторе (рис. 11).

По аналогии была создана компьютерная модель насоса, включающая твердотельную CAD-модель и математическую модель гидродинамических процессов течения масла в насосе. Общая расчетная сетка насоса состояла из 2,08 млн элементов, максимальный размер элементов составлял 2 мм для учета подробности сложных течений в насосе. Призматические пристеночные элементы имеют семь слоев. Также

был применен подход погруженного твердого тела (рис. 12, *a*), при котором расчетная область представляет собой и жидкую и твердую области насоса, а область течения определяется перед каждым шагом решения (рис. 12, *б*).



Рис. 11. Героторный масляный насос с четырехзубчатым ротором в сборке: *a* – вид со стороны шестеренчатого привода от коленчатого вала двигателя; *б* – вид со стороны впускного и выпускного окон для масла в насос

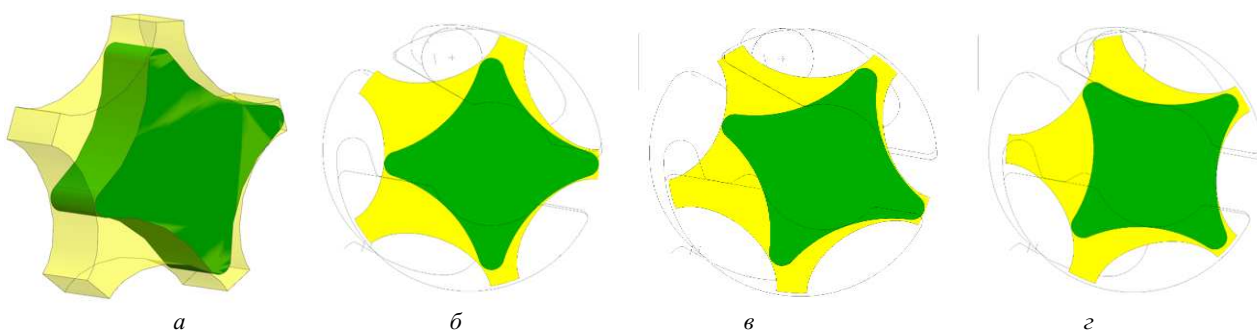


Рис. 12. Расчетная область масштабируемого масляного героторного насоса (*a*) и положение роторов насоса в различные моменты времени (углах): *б* – 390°; *в* – 420°; *г* – 450°

Результаты численного моделирования гидродинамических процессов в героторном насосе с варьированием количества зубьев продемонстрировали сходимость полученных данных.

Приведем структуру течения масла в проточной части насоса (рис. 13, *a*), а также распределение давления на поверхностях проточной части насоса (рис. 13, *б*).

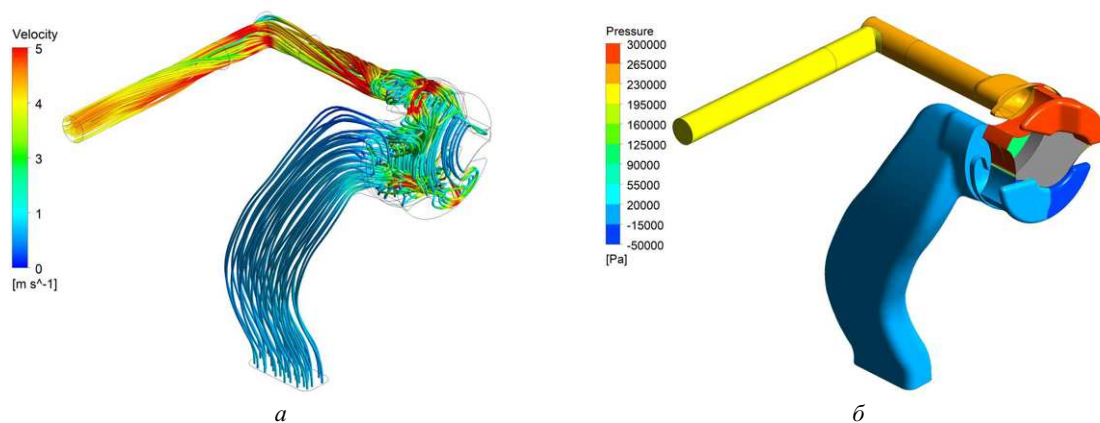
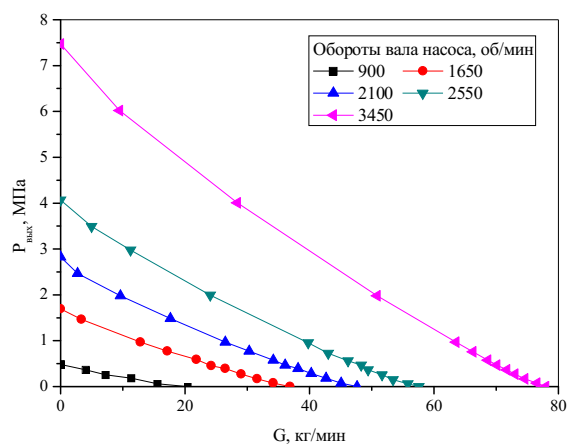


Рис. 13. Линии тока в проточной части насоса (*a*) и распределение давления на поверхностях проточной части насоса (*б*)

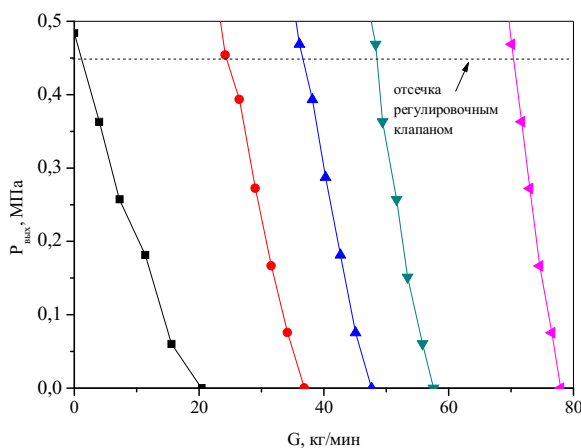
Валидация результатов расчета с экспериментальными данными показала, что отклонение расчетного значения по расходу масла от экспериментального значения при 4200 об/мин и давлении 0,4 МПа составляет 4,34 % (93,5 л/мин по эксперименту и 89,6 л/мин по расчету), при 1800 об/мин и давлении 0,2 МПа – 0,96 % (35 л/мин по эксперименту и 35,24 л/мин по расчету). Отклонение не превышает 5 %,

с учетом этого можно сделать вывод о том, что с помощью расчетной модели получены результаты, близкие к экспериментальным значениям.

Результаты виртуальных испытаний насоса для воссоздания его рабочей характеристики (передаточное число от коленчатого вала к насосу – 1:1,5) при использовании моторного масла SAE 30W40 при температуре 120 °С показаны на рис. 14, а.



а



б

Рис. 14. Расчетная рабочая характеристика насоса:
а – полная характеристика; б – рабочая характеристика с учетом работы клапана регулирования давления

Давление, развиваемое масляным насосом при уменьшении расхода, способно достигать нескольких мегапаскалей даже на минимальной частоте работы двигателя, теоретическое развиваемое давление составляет 0,55 МПа. Однако клапан регулирования давления, находящийся в системе перед масляным теплообменником, обеспечивает поддержание давления в системе не выше 449 кПа. В связи с этим на графике (см. рис. 14, а) характеристики масляного насоса можно провести ограничение на уровне 0,449 МПа и отбросить все вышележащие значения (рис. 14, б).

Заключение

Предложена технология создания компьютерной модели героторного масляного насоса с использованием программного комплекса ANSYS CFX.

Установлено, что для адекватного описания работы такого типа объемных насосов при моделировании гидродинамических процессов в них целесообразно применять подход погруженного твердого тела.

Многовариантные расчеты насоса показали, что для увеличения точности расчетов протекающих процессов в межзубчатых зазорах насоса необходимо максимально увеличить количество расчетных ячеек. Например, увеличение количества узлов с 3,28 до 6,5 млн повысило точность расчетов примерно

на 50 %. Уменьшение временного шага при изменении времени поворота геротора с 1 до 0,5° не оказало существенного влияния на точность получаемых результатов.

Создание и применение компьютерной модели насоса может быть актуально при реверс-инжиниринге насосов, а также при совершенствовании или оптимизации конструкции насосов – восстановлении рабочих характеристик для новых конструкций или новых теплофизических свойств рабочих жидкостей.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» и в рамках соглашения о консорциуме между КНИТУ-КАИ и Институтом тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Салахов Р.Р. и др.* Исследование параметров системы смазки двигателя грузового автомобиля при различных рабочих температурах моторного масла // Грузовик. 2022. № 4. С. 3–9.
2. *Щуровский Ю.М.* Особенности математического моделирования системы смазки газотурбинных двигателей // Труды МАИ [Электронный журнал]. 2017. № 92. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=76776> (дата обращения: 1.02.2026).
3. *Альдербас Р.Х.М., Сидоров А.В., Гуреев В.М.* Оценка на основе численного моделирования влияния плотности и вязкости нефтепродуктов на характеристики многоступенчатых центробежных нефтеперекачивающих насосов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2024. № 3. С. 18–24.
4. *Dhar S. et al.* Transient, Three Dimensional CFD Model of the Complete Engine Lubrication System // SAE International Journal of Engines. 2016. Vol. 9. № 3. P. 1854–1862.
5. *Zoz, S. et al.* Engine Lubrication System Model for Sump Oil Temperature Prediction // Proc. of the World Congress, March 5, 2001, Detroit, USA. SAE Technical Paper № 2001-01-1073.
6. *Patankar S.V.* Computation of Conduction and Duct Flow Heat Transfer. CRC Press, 1991. 370 p.
7. *Menter F.R.* Review of the Shear-Stress Transport Turbulence Model Experience from an Industrial Perspective // International Journal of Computational Fluid Dynamics. 2009. Vol. 23. Iss. 4. P. 305–316.

Поступила в редколлегию 1.03.26

HYDRODYNAMIC PROCESSES IN A GEROTOR OIL PUMP OF A DIESEL ENGINE LUBRICATION SYSTEM: COMPUTER MODELING

I.A. Popov, M.V. Gureev, Yu.V. Zhukova, R.R. Lukmanov, and I.A. Popov

This paper presents the results that served as a methodological basis for developing a computer model of a gerotor oil pump for a diesel engine lubrication system. A method for reverse engineering the pump's performance characteristics is proposed, and its performance curve is constructed. The gerotor oil pump model is scaled to various standard sizes. The computer model is validated using experimental data. Based on the calculation results, recommendations are formulated to improve the accuracy of the gerotor oil pump computer model.

Keywords: lubrication system, oil pump, pump performance, numerical simulation, computer model.

Попов Игорь Александрович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: popov-igor-alex@yandex.ru

Гуреев Михаил Викторович – науч. сотрудник (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: gureev.mv@gmail.com

Жукова Юлия Владимировна – канд. физ.-мат. (Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова Национальной Академии наук Беларуси, Минск, Беларусь)

E-mail: julia_zhukova@rambler.ru

Лукманов Руслан Рушанович – канд. техн. наук (Казанский ГАУ, Казань)

E-mail: look-rus@mail.ru

Попов Игорь Александрович – студент (Казанский ГАУ, Казань)

E-mail: iapopov-2004@yandex.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСТВОРИМОСТИ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ФЛЮИДОВ В УГЛЕВОДОРОДАХ ПРИ НАЛИЧИИ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

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

Разработана методика проведения исследований растворимости сверхкритических флюидов в углеводородах, основанная на использовании уравнений материального баланса. С использованием разработанной методики проведены пробные опыты по измерению растворимости диоксида углерода в циклогексане на изотерме 344 К. Проведен расчет неопределенности измерения растворимости диоксида углерода в углеводородах. Проведены исследования по измерению растворимости диоксида углерода в керосине на изотермах 313 и 333 К. Показано увеличение растворимости диоксида углерода в керосине с увеличением давления.

Ключевые слова: сверхкритический флюид, измерение растворимости, пористая среда, неопределенность измерения.

В настоящее время особую актуальность приобретает экспериментальное определение термодинамических характеристик многокомпонентных систем, а именно измерение растворимости жидкостей в сверхкритических флюидах и сверхкритических флюидов в жидкостях. Преобладающая часть исследований сосредоточена на изучении растворимости нефтехимических соединений, фармацевтических субстанций и биодизеля в сверхкритических флюидах [1–3], что продиктовано запросами промышленности. Наряду с этим в литературе представлены экспериментальные данные по растворимости сверхкритических флюидов в жидких углеводородах [4–7]. Например, в работе [5] получены надежные экспериментальные результаты по растворимости диоксида углерода в воде при высоких параметрах состояния.

Вместе с тем достоверные экспериментальные сведения о растворимости сверхкритических флюидов в углеводородах как в свободном объеме, так и в присутствии пористой среды в настоящее время практически отсутствуют. Получение надежных экспериментальных данных подобного рода представляет собой исключительно актуальную научно-практическую задачу, поскольку они являются необходимым условием для составления материальных балансов, а также для разработки технологических и технико-экономических рекомендаций при проектировании процессов закачки сверхкритического диоксида углерода в нефтяные пласты. Указанная проблематика имеет особую значимость для нефтедобывающей промышленности Российской Федерации.

Экспериментальная установка для исследования растворимости сверхкритических флюидов в углеводородах при наличии пористой среды, рассмотренная в работе [8], предназначена для проведения фильтрационных исследований в широком диапазоне давлений и температур и позволяет получать термодинамически согласованные результаты по растворимости сверхкритических флюидов в углеводородах и количеству вытесняемого из пористой среды углеводородов. Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента аттестована (ТУ 4211-003-46526536-03).

Приведем технические характеристики экспериментальной установки: максимальное пластовое давление – 25 МПа; максимальная температура – 473 К; неопределенность измерения абсолютного давления – $\pm 0,5$ %; неопределенность измерения температуры экспериментальной ячейки – 0,5 %; время непрерывной работы не лимитируется.

Общая схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Приведены следующие системы и узлы: I – система создания, поддержания и измерения давления; II – система насыщения экспериментальной ячейки нефтью; III – система термостатирования и измерения температуры; IV – экспериментальная ячейка с пористой средой; V – система разделения фаз; VI – система газожидкостного равновесия. Система газожидкостного равновесия включает регулировочные вентили 1, 3; обратный регулятор давления (ABPR) 2; расходомер диоксида углерода 4; сосуд газожидкостного равновесия 5.

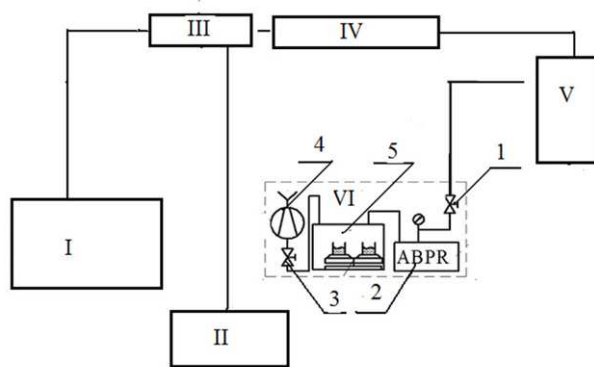


Рис. 1

Экспериментальная ячейка представляет собой цилиндрический сосуд высокого давления, набиваемый пористой средой и насыщаемый углеводородом. Пористость набивки экспериментальной ячейки пористой средой определяется по ГОСТ 2645026450.1-85. Начальная нефтенасыщенность пористой среды создается методом вытеснения с предварительной прокачкой керосина.

Система создания, поддержания и измерения давления состоит из газового мембранного компрессора, накопительных баллонов, рабочих баллонов, образцовых манометров, установленных на входе и выходе из экспериментальной ячейки, а также блока манометров, располагающихся по всей длине экспериментальной ячейки на расстоянии 200 мм друг от друга. Количество манометров по длине экспериментальной ячейки соответствует количеству термодпар, т. е. в одном сечении измеряется одновременно давление и температура. В схеме экспериментальной установки предусмотрен также дифференциальный манометр, измеряющий градиент давления по длине экспериментальной ячейки с погрешностью $\pm 0,05$ МПа.

Давление диоксида углерода, нагнетаемого в экспериментальную ячейку, создается с помощью мембранного компрессора МК-80-3,5/350 в случае исследования вытеснения углеводорода диоксидом углерода в газовом состоянии либо насоса высокого давления в случае исследования процесса вытеснения углеводорода жидким или сверхкритическим диоксидом углерода.

При исследовании газового воздействия давление в интервале 7,5...14 МПа, необходимое для проведения эксперимента, достигается в два этапа. На первом этапе диоксид углерода перекачивается мембранным компрессором из накопительных баллонов в рабочие баллоны. После заполнения рабочего баллона вентиль закрывается, и подача диоксида углерода в баллон прекращается.

В случае исследования вытеснения углеводорода жидким или сверхкритическим диоксидом углерода используется насос фирмы Waters (модель P-20) со встроенным датчиком давления, благодаря чему в данном узле устанавливается давление нагнетаемого диоксида углерода в диапазоне 5...МПа и расход 0,01...20 г в минуту. Для измерения массового расхода закачиваемого диоксида углерода с погрешностью не более 0,01 г/мин применяется расходомер Siemens.

Контроль расхода диоксида углерода осуществляется с помощью системы задания и контроля расхода (на рис. 1 не приведена). Система состоит из массового расходомера Siemens, устанавливаемого на выходе из баллона и на входе в экспериментальную ячейку, автоматического обратного регулятора давления фирмы Waters (США) и электромагнитных клапанов. Обратный регулятор давления и электромагнитные клапаны установлены на выходе из модели пласта и подключены к компьютеру. Компьютер управляет заданием расхода насоса, устанавливает необходимое давление на обратном регуляторе давления и в соответствии с заданным значением расхода углекислого газа регулирует величину открытия электромагнитных клапанов. Эксперименты проведены на изотермах 313 и 333 К, расход газа на них составлял $1,6 \cdot 10^{-5}$ и $2,16 \cdot 10^{-5}$ кг/с.

Система насыщения – сосуд, наполняемый углеводородом, – подключается к экспериментальной ячейке. Насыщение экспериментальной ячейки углеводородом осуществляется под вакуумом. Вначале происходит вакуумирование экспериментальной ячейки, затем углеводород под действием перепада давления в 0,1 МПа поступает в экспериментальную ячейку. При проведении исследований по измерению

растворимости диоксида углерода в углеводородах необходимо исключить появление микропузырьков углекислого газа в углеводороде, поэтому методика подготовки эксперимента в данном случае предусматривает предварительное насыщение экспериментальной ячейки углекислым газом при сверхкритических параметрах состояния. Для более равномерного насыщения углеводорода углекислым газом в схеме узла насыщения экспериментальной ячейки используется буферная емкость с инертным газом. Насыщение считается завершенным после прокачки через пласт не менее десяти поровых объемов углеводорода.

Соответствие параметров во время проведения опытов реальным пластовым условиям достигается системой термостатирования и измерения температуры экспериментальной ячейки и вытесняющего агентов.

Схема системы термостатирования экспериментальной ячейки приведена на рис. 2.

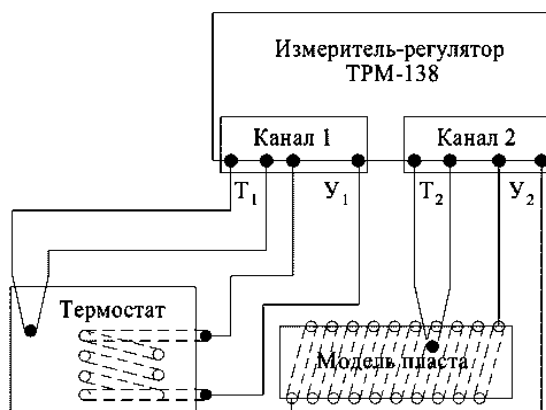


Рис. 2

Термостатирование экспериментальной ячейки и вытесняющего агента производится в течение всего периода проведения эксперимента. В систему термостатирования и измерения температуры входят термостат и девять хромель-капельных термопар, устанавливаемых по всей длине модели пласта с шагом 200 мм. Необходимость измерения температуры обусловлена тем, что растворяющие способности диоксида углерода зависят от давления и температуры, и уменьшение температуры ниже критического значения (31,5 °С) приведет к тому, что смешивающийся режим не будет достигнут.

Проведение эксперимента начинается с вывода экспериментальной установки на рабочий температурный режим. Контроль за постоянством температуры по длине экспериментальной ячейки ведется с помощью системы термостатирования.

Методика проведения эксперимента заключается в следующем. Перед экспериментом сверхкритический диоксид углерода подается в экспериментальную ячейку, в которой происходит процесс многокомпонентной фильтрации. Из экспериментальной ячейки смесь углекислого газа и нефти поступает в систему разделения фаз, в которой давление и температура контролируются образцовым манометром и двумя хромель-алюмелевыми термопарами. Углеводород с растворенным газом поступает в систему газожидкостного равновесия, при этом углеводород накапливается в сосуде газожидкостного равновесия. Из сосуда газожидкостного равновесия углеводород выливается в мерные цилиндры, которые взвешиваются на электронных весах с погрешностью $\pm 0,05$ г. Для сосуда газожидкостного равновесия составляется уравнение материального баланса по диоксиду углерода и углеводороду.

Растворимость сверхкритического флюида в углеводороде определяется на основании уравнений материального баланса по диоксиду углерода и углеводороду в сосуде отбора проб углеводорода карусельного типа и приемной емкости газов.

Материальный баланс по диоксиду углерода в сосуде отбора проб углеводорода карусельного типа:

$$m_{\text{CO}_2}^{\text{CP}} = \sum m_p + \sum m_c, \quad (1)$$

где $\sum m_p$ – масса диоксида углерода, сливаемая из сосуда; $\sum m_c$ – масса пустого сосуда.

Материальный баланс по углеводороду в сосуде отбора проб углеводорода

$$m_{cP}^{yB} = \sum m_k + \sum m_{\text{колб}}, \quad (2)$$

где $\sum m_k$ – масса углеводорода, сливаемого из сосуда газожидкостного равновесия в сосуды отбора проб углеводорода карусельного типа; $m_{\text{колб}}$ – масса углеводорода, выходящего вместе с диоксидом углерода в резиновую колбу, определяется по массе резиновой колбы с углеводородом после измерения массы диоксида углерода в резиновой колбе.

Растворимость сверхкритического флюида в углеводороде определяется по уравнению

$$x = \frac{\frac{m_{\text{CO}_2}^{cP}}{M_{\text{CO}_2}}}{\frac{m_{cP}^{yB}}{M_{yB}} + \frac{m_{\text{CO}_2}^{cP}}{M_{\text{CO}_2}}}, \quad (3)$$

где $m_{\text{CO}_2}^{cP}$, m_{cP}^{yB} – масса диоксида углерода и углеводорода, находящихся в сосуде отбора проб углеводорода карусельного типа; M_{CO_2} , M_{yB} – молярная масса диоксида углерода и углеводорода.

В настоящей работе проведены пробные опыты по измерению растворимости диоксида углерода в циклогексане при температуре 343 К. Результаты пробных измерений приведены на рис. 3.

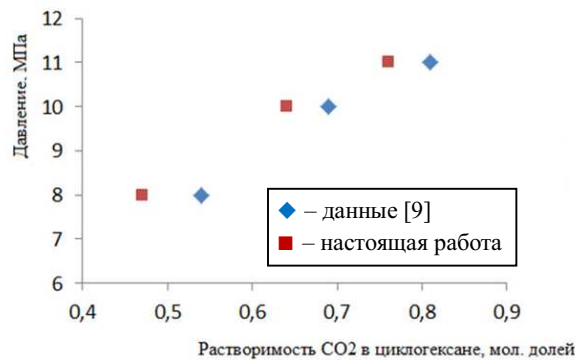


Рис. 3

В ходе экспериментов и обработки их результатов получен набор величин для одной группы экспериментов: $m_{\text{CO}_2} = 0,28$ кг; $m_{yB} = 0,31$ кг; $\Delta m_{\text{CO}_2} = 0,025$ кг; $\Delta m_{yB} = 0,025$ кг. Используя эти данные, а также известные значения $M_{\text{CO}_2} = 0,44$ кг/кмоль, $M_{yB} = 0,88$ кг/кмоль, определим величину относительной неопределенности измерения растворимости диоксида углерода в углеводородах в соответствии с работой [10]. После обработки всего массива экспериментальных данных получено значение относительной неопределенности измерения растворимости: $\delta x_i = 0,088 = 8,8 \%$.

Систематическая составляющая неопределенности измерения из рассмотрения исключена, так как предварительно проводится калибровка мерных цилиндров.

На рис. 4 представлены результаты измерения растворимости диоксида углерода в керосине вязкостью 1,2 мПа·с на изотермах 313 и 333 К.

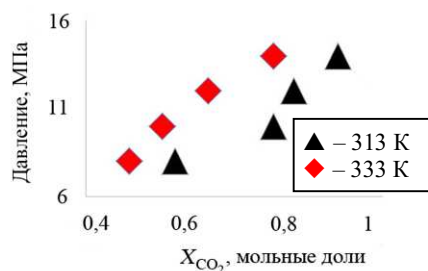


Рис. 4

Согласно результатам измерения растворимость диоксида углерода в керосине увеличивается с увеличением давления. В работе [11] это объясняется тем, что с увеличением давления система «углеводород – сверхкритический диоксид углерода» стремится к переходу в однофазное состояние.

Справедливость указанного предположения подтверждается результатами, представленными на рис. 5, где отображена область смешения в системе «керосин – сверхкритический диоксид углерода» при температуре 313 К в интервале давлений 8...16 МПа. На рис. 5, а показана область при давлении до 7,5 МПа; на рис. 5, б – переходный режим при давлениях 7,5–9,3 МПа; на рис. 5, в – состояние системы при давлении свыше 9,3 МПа.



Рис. 5

Как видно (см. рис. 5), столб смеси углекислого газа с керосином имеет слабый окрас по сравнению с окрасом керосином. В дальнейшем по окончании переходного процесса в углекислом газе растворяется углеводород, газ приобретает более насыщенный окрас, а цвет углеводорода, наоборот, становится более бледным. При давлениях выше 9,3 МПа устанавливается термодинамическое равновесие, и наблюдается режим полной смешимости.

В ходе эксперимента измерялось время проведения процесса вытеснения углеводорода. Результаты измерения времени вытеснения представлено в таблице.

Вещество	Температура, К	Давление, МПа	Время проведения эксперимента, ч
Керосин	313	7,5	14
		9	20
		10	36
		12	40–42
	333	7,5	7–8
		9	12
		10	26
		12	32

Как видно из таблицы, с увеличением давления, а значит, с увеличением растворимости диоксида углерода в углеводороде наблюдается резкое увеличение времени проведения эксперимента, определяемое моментом прорыва диоксида углерода из экспериментальной ячейки. Время проведения опытов на изотерме 313 К увеличилось с 14 до 40 ч, а на изотерме 333 К – с 12 до 32 ч. Существенное увеличение времени проведения эксперимента связано, вероятнее всего, с тем, что внутри пористой среды движется не отдельно углеводород и диоксид углерода, а единая смесь углеводорода со сверхкритическим диоксидом углерода.

Таким образом, показана однозначная зависимость времени проведения эксперимента от давления в системе «углеводород – CO₂»: с увеличением давления время проведения эксперимента существенно увеличивается.

Проведены пробные опыты по измерению растворимости сверхкритического диоксида углерода в циклогексане на изотерме 344 К. Показано, что полученные экспериментальные данные согласуются с литературными.

Проведен расчет неопределенности измерения растворимости сверхкритического диоксида углерода в углеводородах. Максимальное значение неопределенности измерения составляет не более 8,8 %.

Проведены опыты по измерению растворимости диоксида углерода в керосине на изотермах 313 и 333 К. Показано увеличение растворимости с увеличением давления и снижение растворимости с увеличением температуры.

Измерено время проведения фильтрационных экспериментов по вытеснению углеводорода диоксидом углерода. Согласно экспериментам с увеличением давления время проведения эксперимента увеличивается, а с увеличением температуры снижается. Сделано предположение о том, что с увеличением давления происходит переход системы «керосин – диоксид углерода» в однофазное состояние.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Билалов Т.Р.* Термодинамические и теплофизические свойства систем экстракционных и импрегнационных процессов с растворителями в сверхкритическом флюидном состоянии: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2019. 48 с.
2. *Хайрутдинов В.Ф.* Термодинамические основы и технологические закономерности процессов диспергирования, экстракции и пропитки с использованием сверхкритических флюидных сред применительно к задачам полимерной химии, фармацевтики и нефтехимии: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2019. 48 с.
3. *Гильмутдинов И.М.* Термодинамика процессов дросселирования, десорбции и импрегнации сверхкритических растворов и расплавов с образованием высокодисперсных нано-, субмикро-, микро-размерных и структурированных материалов и композитов: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2021. 44 с.
4. *Maria Y. Dwia et al.* Solubility of Acetophenone in Supercritical Carbon Dioxide // *Open Chemical Engineering Journal*. 2016. № 10 (Supplement 1). P. 18–28.
5. *Шагиахметов Р.А. и др.* Растворимость диоксида углерода в воде в сверх- и субкритических условиях // *Теоретические основы химической технологии*. 2003. № 1. С. 54–57.
6. *Devjyoti Natha, Amr Henni.* Solubility of Carbon Dioxide (CO₂) in Two Based Ionic Liquids at (303.15, 323.15, and 343.15) K and Pressures up to 12 Bar // *Proc. of the International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, Oct. 21–25, 2019, Melbourne, Australia. P. 1–12.
7. *Diamond L.W., Akinfiev N.N.* Solubility of CO₂ in Water from –1.5 to 100 °C and from 0.1 to 100 MPa: Evaluation of Literature Data and Thermodynamic Modelling // *Fluid Phase Equilibria*. 2003. № 208. P. 265–290.
8. *Радаев А.В., Мухамадиев А.А., Сабирзянов А.Н.* Экспериментальный стенд для исследования растворимости и фазовых переходов в системе «углеводород – сверхкритический CO₂» в широком диапазоне давлений и температур // *Приборы и техника эксперимента*. 2022. № 1. С. 148–153.
9. *Merker T., Vrabec J., Hasse H.* Molecular Simulation Study on the Solubility of Carbon Dioxide in Mixtures of Cyclohexane + Cyclohexanone // *Fluid Phase Equilibrium*. 2012. № 315. P. 77–83.
10. ГОСТ 34100.3. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. М.: Стандартинформ, 2017. 105 с.
11. *Aleidan Ahmed Abdulaziz S.* Experimental and Simulation Studies to Evaluate the Improvement of Oil Recovery by Different Modes of CO₂ Injection in Carbonate Reservoirs. Texas, 2010. 478 p.

Поступила в редколлегию 12.03.26

EXPERIMENTAL STUDY OF SOLUBILITY OF SUPERCRITICAL FLUIDS IN HYDROCARBONS IN THE PRESENCE OF POROUS MEDIUM

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

A methodology for conducting studies of the solubility of supercritical fluids in hydrocarbons, based on the use of equations of material lance. Using the developed procedure, test runs were

carried out to measure solubility of carbon dioxide in cyclohexane at isotherm 344 K. Conducted calculation of uncertainty of carbon dioxide solubility measurement in hydrocarbons. Studies were carried out to measure the solubility of carbon dioxide in kerosene on isotherms 313 and 333 K. An increase in the solubility of carbon dioxide in zero is shown blue with increasing pressure.

Keywords: supercritical fluid, solubility measurement, porous medium, measurement uncertainty.

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

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

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

E-mail: sabirzyanov_2026@mail.ru

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

E-mail: vaseneva@agni-rt.ru

ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СИНТЕЗ КАРБИДА МОЛИБДЕНА

Б.А. Тимеркаев, Г.Р. Мухаметзянов, А.Д. Захарова,
А.А. Байрамгулов

Рассмотрен метод электродугового синтеза карбида молибдена в атмосфере аргона. На поверхности катода получены кристаллы карбида молибдена микро- и наноразмерного диапазона. Проанализированы особенности формирования карбидной фазы в условиях дугового разряда, исследованы морфология и размерные характеристики полученных продуктов. Выявлено формирование цепочечных наноструктур, содержащих частицы карбида молибдена, а также наночастиц молибдена. Показана возможность получения карбидных материалов молибдена с различной структурной организацией кратковременным плазменным воздействием.

Ключевые слова: дуговой разряд, электродуговой синтез, карбид молибдена.

В современной науке повышенный интерес к карбидам металлов и полуметаллов обусловлен их уникальными функциональными характеристиками, открывающими широкие перспективы для применения в различных областях. Карбиды демонстрируют высокую твердость и тугоплавкость наряду с хорошей электропроводностью и теплопроводностью, что делает их востребованными в электронике, машиностроении и материаловедении. Кроме того, данные соединения привлекают внимание исследователей возможностью реализации иных специализированных применений.

В приведенном ряду соединений карбид молибдена занимает особое положение. Карбиды молибдена относятся к классу тугоплавких соединений переходных металлов с углеродом и характеризуются комплексом физико-химических свойств, представляющих значительный интерес для современных научных исследований и технологических приложений [1, 2]. Для карбида молибдена также характерны высокая термическая и химическая стабильность, износ- и коррозионная стойкость, а также сравнительно высокая электрическая проводимость. Карбидам молибдена, кроме того, свойственны электрокаталитические характеристики [3–5]. В процессе синтеза карбида молибдена, аналогично случаю карбидов железа, возможно образование $Mo-C$ и Mo_2C [6]. В связи с этим поиск альтернативных методов получения карбидов молибдена представляет собой исключительно актуальную научно-техническую задачу.

К числу наиболее распространенных подходов к синтезу карбидов молибдена относятся химическое газофазное осаждение, пиролиз органометаллических прекурсоров, механохимический и самораспространяющийся высокотемпературный синтез [7, 8]. При общей эффективности перечисленных методов их практическая реализация зачастую сопряжена либо с высокими температурными режимами и длительным временем обработки, либо с применением дорогих прекурсоров и высокотехнологичного оборудования. Указанные ограничения стимулируют растущий научный интерес к плазмохимическим технологиям, использующим энергию электродуговой плазмы. Плазменные методы обеспечивают высокую плотность энергии, интенсивный массо- и теплоперенос, а также широкие возможности управления параметрами среды, что делает их особенно перспективными для синтеза тугоплавких соединений [9, 10].

Электродуговой синтез относится к числу плазмохимических методов и основан на использовании плазмы дугового разряда постоянного тока для создания атомарных молибдена и углерода. Образование атомарных углерода и молибдена в дуговом разряде происходит в результате их испарения с материала анода за счет его высокой температуры. В зоне ядра электрической дуги реализуются температуры порядка нескольких тысяч градусов, что обеспечивает интенсивное взаимодействие молибдена с углеродом, и при выходе за пределы электродугового канала облако исходных атомов осаждается в виде карбидных фаз. В современной литературе описаны различные варианты дугового синтеза карбида молибдена, реализуемые как в атмосферных условиях, так и в контролируемых газовых средах [11–13]. Показано, что электродуговой метод позволяет получать порошковые материалы с нано- и субмикронной

структурой, при этом фазовый состав и морфология частиц существенно зависят от параметров разряда, геометрии электродной системы и характеристик газовой среды.

Состав и давление рабочего газа, материалы электродов, межэлектродное расстояние, взаимное расположение электродов по отношению к направлению силы тяжести, величина тока, система охлаждения электродов, продолжительность процесса синтеза являются ключевыми факторами, которые влияют на свойства синтезируемых материалов. Для достижения качественного результата требуется предварительное установление хотя бы диапазонных значений указанных параметров дугового разряда, при которых процесс синтеза становится реализуемым. Только после фиксации данных условий возможно последующее проведение оптимизации процесса синтеза.

Использование инертных газов, в частности аргона, позволяет минимизировать окислительные процессы, стабилизировать разряд и повысить воспроизводимость результатов [14]. Пониженное давление по сравнению с атмосферным изменяет характеристики плазмы, включая температуру, плотность частиц и длину свободного пробега, что оказывает существенное влияние на кинетику образования карбидных фаз. Современные исследования показывают, что переход к вакуумным и квазивакуумным условиям дугового разряда открывает дополнительные возможности для управления фазовым составом карбида молибдена и снижения доли побочных фаз, включая оксиды и свободный углерод [15, 16].

С помощью современных вычислительных методов возможно достаточно точно определить условия зажигания и поддержания электрической дуги в определенных газах с учетом испарения материалов электродов, а также участия их атомов в создании плазмы. Такие расчеты были проведены в работах [17–20], где были достаточно точно определены характеристики и состав плазмы, включая распределения в разрядной области электронов, положительных ионов, температуры газа. Именно эти параметры позволяют прогнозировать состояние плазмы и возможные области для синтеза тех или иных наноструктур.

Экспериментальные исследования по синтезу наноструктурированного карбида молибдена проводились в вакуумной камере, в которой предусмотрены возможности перемещения электродов, наблюдения за ходом эксперимента, создания контролируемой газовой среды. В качестве рабочего газа использовался аргон. Эксперименты проводились при разных давлениях, разных межэлектродных расстояниях и разных длительностях горения дуги. В данной работе представлены результаты, полученные при давлении 16 кПа. Именно при таком давлении катодные и анодные пятна на электродах локализуются на площадях, полностью охватывающих площадь тигля с приготовленной смесью порошков графита и молибдена. В настоящей работе применялась электродная система, включающая графитовый катод и анод. На поверхности графитового анода была сформирована одиночная цилиндрическая лунка (тигель). Перед проведением эксперимента был приготовлен мелкодисперсный порошок молибдена, который смешали с мелкодисперсным графитовым порошком в массовом соотношении 2:1. Температура плавления молибдена – 2620 °С, температура кипения – 4639 °С, в то время как углерод плавится при температуре порядка 3900 °С и кипит при температуре около 4200 °С. В литературе обычно принимают, что графит в жидкой фазе практически не существует, непосредственно превращаясь из твердого состояния в газообразное. Для обеспечения сравнительно равномерного испарения обоих компонентов карбида молибдена требуется поддержание достаточно высоких значений силы тока.

Определим, какие значения тока являются удовлетворительными для получения карбида молибдена. Главным условием равномерного испарения атомов углерода и молибдена должна быть температура поверхности анода, соответствующая температуре кипения молибдена. Температура кипения молибдена определена опытным путем в серии экспериментов. При более низких температурах молибден испаряется незначительно, в то время как графит испаряется интенсивно. При более высоких температурах наблюдается выброс молибдена в капельной фазе. Углерод после пребывания в ядре дуги и попадания на поверхность катода может создавать различные аллотропные соединения. Однако появление в этой же области атомарного молибдена приводит к тому, что в этих структурах атомы молибдена начинают замещать атомы углерода, создавая условия карбидообразования.

Инициацию дугового разряда осуществляли соприкосновением электродов и последующим вытягиванием дуги между молибденовым анодом и графитовым катодом. Были апробированы различные ва-

рианты организации процесса синтеза карбидов молибдена. Например, при токах порядка 75 А при давлении 20 кПа карбиды не образовывались. Даже за 40 с дуговой разряд при силе тока 75 А не приводил к разрушению наростов на катоде. При таких небольших токах для обеспечения необходимой для испарения молибдена температуры необходимо увеличить давление. В этом случае уменьшается токовое пятно на аноде, и локальный нагрев может обеспечить значения температуры, необходимые для поверхностного кипения молибдена. Наиболее выраженные положительные результаты наблюдались при силе тока 120 и 150 А. Длительность эксперимента составляла 10...15 с. В указанном диапазоне энергозатрат фиксировался интенсивный перенос материала анода на поверхность катода. Ограничение времени разряда обусловлено возникновением перегрева материала катода. Этого можно избежать либо организацией охлаждения катода, либо установлением электродов в горизонтальной плоскости и размещением в камере подложки. Образовавшиеся продукты синтеза, локализованные преимущественно на поверхности графитового катода, были проанализированы на оптическом и электронном микроскопах.

Отобранные образцы были подвергнуты всесторонним исследованиям. Твердость проверяли на стекле. Образец оставлял на стекле глубокие царапины, что косвенно свидетельствует о присутствии твердых карбидных фаз в его составе. Морфологию полученных образцов предварительно проверяли на оптическом микроскопе. В оптическом микроскопе обнаружено наличие образований в несколько микрон, плотно расположенных на поверхности образца. Некоторые частицы имели острые грани и ровные боковые поверхности. Внешний вид и размеры отобранных образцов исследовали на электронном микроскопе. Результаты анализа морфологии полученных образцов на электронном микроскопе представлены на рис. 1–4.

На рис. 1 при увеличении $\times 5000$ визуализируется структура поверхности, полностью состоящая из частиц карбида молибдена микронного и субмикронного размеров.

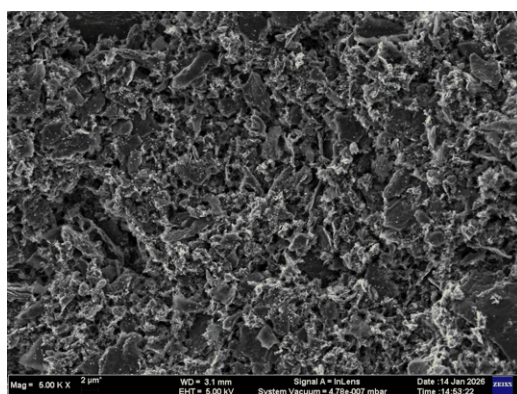


Рис. 1

При увеличении $\times 25000$ (рис. 2) более отчетливо проявляются грани отдельных кристаллитов карбида; одновременно с этим становится возможной идентификация наночастиц.

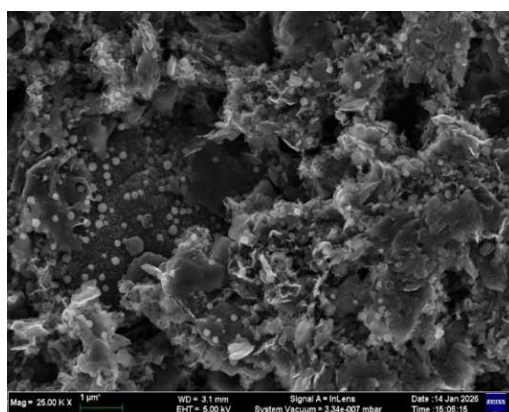


Рис. 2

Рис. 3 демонстрирует карбидные структуры остроугольной формы с размерами в диапазоне 1...2 мкм. Внешний вид этих карбидов соответствует алмазоподобной структуре. Следовательно, во время эксперимента сначала первоначально формируется углеродная алмазоподобная структура, а затем атомы углерода начинают замещаться атомами молибдена. На поверхности этих карбидов наблюдаются нанопоры.

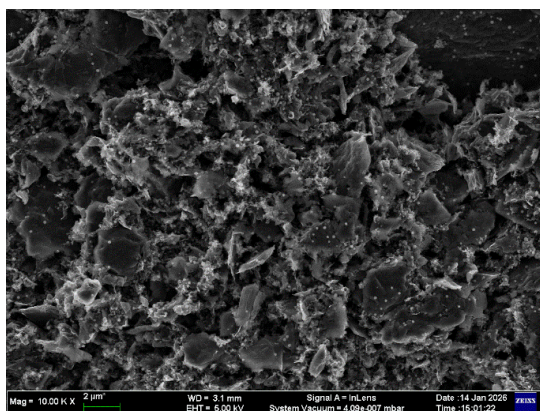
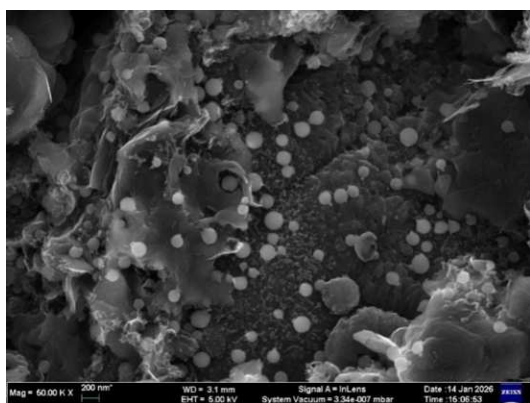
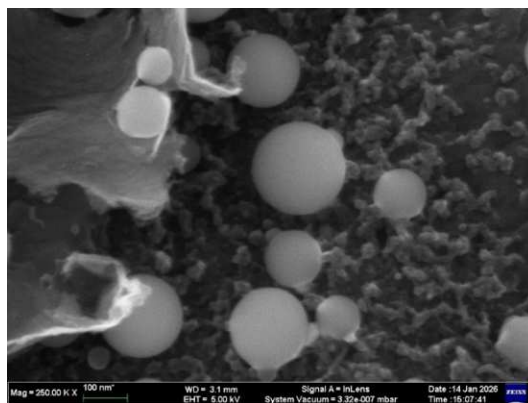


Рис. 3

При более высоких увеличениях – $\times 50000$ (рис. 4, а) и $\times 250000$ (рис. 4, б) – становится возможным детальный анализ морфологии указанных наноразмерных образований.



а



б

Рис. 4

В соответствии с рис. 4 наблюдается два типа структурных образований – карбид молибдена и нанопоры. Согласно данным элементного анализа нанопоры состоят преимущественно из молибдена. Формирование указанных объектов объясняется присутствием избыточного количества атомарного молибдена в ядре дуги. Покидая эту зону, атомы молибдена конденсируются из паровой фазы, а действие сил поверхностного натяжения придает им форму, близкую к идеальной сферической. Чистота их поверхности свидетельствует о том, что в жидкокапельную фазу молибдена атомы углерода не встраиваются. Этот факт еще раз подтверждает предположение об алмазоподобной кристаллической структуре карбида молибдена, в которой часть атомов углерода замещена атомами молибдена.

На рис. 4, б визуализируется поверхность образца с цепочечной структурой карбида молибдена, частицы которого имеют значительно меньшие размеры (20–40 нм), и все они являются единой структурой. В целом поверхность образца представляет пористую структуру с порами порядка 10–40 нм.

Таким образом, в условиях дугового разряда в среде аргона с углеродным катодом и графитовым анодом, содержащем в тигле шихту из смеси порошков молибдена и углерода, были получены композиционные структуры, представляющие собой углеродную матрицу со встроенными атомами молибдена. Данная структура может быть идентифицирована как карбид молибдена. На фоне карбидной фазы

наблюдается незначительное количество сферических частиц размером приблизительно 50–100 нм, локализованных на поверхности образца. Полученные данные позволяют предположить, что формирование указанных наносфер происходило на завершающей стадии эксперимента, по достижении точки росы для молибдена.

В работе продемонстрирована возможность эффективного синтеза карбида молибдена методом вакуумно-дугового разряда постоянного тока в среде аргона при давлении порядка 16–20 кПа. Показано, что при значениях тока 120–150 А обеспечивается интенсивное испарение компонентов анода и формирование карбидных фаз на поверхности катода. Также установлено, что ключевым условием образования карбида молибдена является достижение на поверхности анода температуры, соответствующей температуре кипения молибдена. Это обеспечивает сопоставимые скорости испарения молибдена и углерода.

Морфологический анализ показал формирование организованной структуры, включающей микронные и субмикронные кристаллы карбида молибдена (1–4 мкм); наночастицы карбида молибдена размером 20–40 нм, формирующие цепочечные структуры; сферические наночастицы молибдена размером 50–100 нм, образованные вследствие конденсации избытка паров молибдена. Показано, что формирование сферических частиц молибдена связано с конденсацией атомарного молибдена из паровой фазы при охлаждении плазмы дугового разряда, тогда как образование карбидной фазы происходит в условиях плазменно-химического взаимодействия молибдена и углерода с последующей карбидизацией при осаждении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hwu H.H., Chen J.G.* Surface Chemistry of Transition Metal Carbides // *Chemical Reviews*. 2005. Vol. 105. № 1. P. 185–212.
2. *Oyama S.T.* Preparation and Catalytic Properties of Transition Metal Carbides and Nitrides // *Catalysis Today*. 2015. Vol. 244. P. 3–13.
3. *Ma Y. et al.* Mo₂C-Based Catalysts or Hydrogen Evolution Reaction // *Journal of Materials Chemistry A*. 2014. Vol. 2. № 36. P. 15015–15022.
4. *Chen W. et al.* Hydrogen Production by Electrolysis of Water Using Molybdenum Carbide Catalysts // *Journal of the Electrochemical Society*. 2009. Vol. 156. № 6. P. B735–B740.
5. *Liu Y. et al.* Recent Advances in Molybdenum Carbide-Based Catalysts for Energy Applications // *Energy & Environmental Science*. 2017. Vol. 10. P. 1670–1692.
6. *Okamoto H.* Mo–C (Molybdenum–Carbon) // *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2006. Vol. 27. № 2. P. 195–196.
7. *Zhang X. et al.* Controlled Synthesis of Molybdenum Carbide Nanomaterials // *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. Vol. 688. P. 655–662.
8. *Li S. et al.* Synthesis Routes and Applications of Molybdenum Carbide Catalysts // *Catalysts*. 2018. Vol. 8. № 11. Article № 563.
9. *Bogaerts A., Neyts E.* Plasma Technology: An Emerging Technology for Energy Storage and Conversion // *ACS Energy Letters*. 2018. Vol. 3. № 4. P. 1013–1027.
10. *Tendero C. et al.* Atmospheric Pressure Plasmas: A Review // *Spectrochimica Acta Part B*. 2006. Vol. 61. № 1. P. 2–30.
11. *Пак А. Я.* Возможность синтеза наноразмерного карбида молибдена в атмосферной электроразрядной плазме // *Письма в ЖТФ*. 2019. Т. 45. № 17. С. 16–19.
12. *Пак А. Я. и др.* Синтез карбида молибдена в самоэкранирующейся электродуговой плазме // *Материаловедение. Энергетика*. 2021. № 2. С. 64–71.
13. *Anders A.* A Review of Cathodic Arc Deposition Technology // *Surface and Coatings Technology*. 2017. Vol. 120. P. 319–330.
14. *Lieberman M.A., Lichtenberg A.J.* Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. Hoboken: Wiley, 2005. 757 p.
15. *Keidar M., Beilis I.I.* Plasma Engineering: Applications from Aerospace to Bio and Nanotechnology. Amsterdam: Elsevier, 2013. 544 p.
16. *Zhou Y. et al.* Arc Plasma Synthesis of Transition Metal Carbides in Inert Gas Atmosphere // *Vacuum*. 2020. Vol. 173. Article № 109155.
17. *Сайфутдинов А.И., Тимеркаев Б.А., Сайфутдинова А.А.* Особенности переходных процессов в микро-разрядах постоянного тока в молекулярных газах: от тлеющего разряда в дугу с несвободным или свободным режимом катода // *Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2020. № 7. С. 443–450.

18. *Saifutdinov A.I. et al.* Numerical Study of a Plasma-Chemical Reactor Based on an Arc Discharge during the Synthesis of Germanium Nanocrystals // *High Energy Chemistry*. 2023. Vol. 57. P 182–187.
19. *Saifutdinov A., Timerkaev B.* Modeling and Comparative Analysis of Atmospheric Pressure Anodic Carbon Arc Discharge in Argon and Helium–Producing Carbon Nanostructures // *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13. № 13. Article № 1966.
20. *Saifutdinov A., Timerkaev B.* Simulation of Arc Discharge in an Argon/Methane Mixture, Taking into Account the Evaporation of Anode Material in Problems Related to the Synthesis of Functional Nanostructures // *Nanomaterials*. 2025. Vol. 15. № 1. Article № 54.

Поступила в редколлегию 5.03.26

ELECTRIC ARC SYNTHESIS OF MOLYBDENUM CARBIDE

**B.A. Timerkaev, G.R. Mukhametzyanov, A.D. Zakharova, and
A.A. Bayramgulov**

A method for the electric arc synthesis of molybdenum carbide in an argon atmosphere is considered. Micro- and nanosized molybdenum carbide crystals were obtained on the cathode surface. The formation of the carbide phase under arc discharge conditions is analyzed, and the morphology and dimensional characteristics of the resulting products are investigated. The formation of chain nanostructures containing molybdenum carbide particles, as well as molybdenum nanospheres, is revealed. The possibility of producing molybdenum carbide materials with various structural organizations through short-term plasma exposure is demonstrated.

Keywords: arc discharge, electric arc synthesis, molybdenum carbide.

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

Мухаметзянов Гадель Рафаэлевич – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: gr.mukhametzyanov@gmail.com

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

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

АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНЫХ СВОЙСТВ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНОЙ СХЕМЫ ПРЕДИКТОР – КОРРЕКТОР ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ДИНАМИКИ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ГАЗА

Д.А. Тукмаков, А.А. Ахунов, А.Л. Тукмаков

При помощи явной 2D-схемы предиктор – корректор Мак-Кормака с расщеплением пространственного оператора по направлениям и схемой нелинейной коррекции рассматривается процесс установления равновесной концентрации газовых компонентов несущей среды при начальном неравновесном распределении по массе. Описаны две стадии процесса перехода системы в равновесное состояние (конвективная и диффузионная), характер протекания которых позволяет верифицировать расчетную методику. Результаты расчетов позволяют обосновать применение схемы для описания динамических процессов установления равновесных состояний в газодисперсных системах.

Ключевые слова: двухкомпонентный газ, численная схема, транспортные свойства, процесс установления, равновесное состояние, колебания.

Введение

В задачах динамики неоднородных сред со сжимаемой несущей фазой численная схема вычислительного метода и алгоритм решения аппроксимированной краевой задачи должны удовлетворять свойству транспортности, которое заключается в том, что обусловленное конвективным переносом возмущение параметров поля распространяется исключительно по направлению потока [1]. Направление распространения возмущения за счет диффузионных механизмов, явно присутствующих в системе уравнений вязкого сжимаемого теплопроводного газа, в общем случае изотропно и не определяется направлением потока. Поскольку при численной аппроксимации системы уравнений динамики газа конечно-разностные уравнения содержат аппроксимационную погрешность, которая проявляется как дополнительный диффузионный механизм, требуется анализ полученного приближенного решения с точки зрения его транспортных свойств. В случае сжимаемой среды транспортное свойство состоит в том, что акустическое возмущение распространяется со скоростью звука относительно несущей среды, которая может быть движущейся. Описание динамики резонансных явлений [2] в ограниченных объемах, заполненных сжимаемыми, в том числе неоднородными средами, возможно только при выполнении данного условия. Это требование приобретает особую значимость в случае протяженных продольных резонаторов при возбуждении колебаний на первой собственной частоте резонансной системы и ее гармониках и в существенно большей степени – при субгармонических колебаниях на частотах, меньших первой собственной. Если несущая среда является двухкомпонентным газом, составляющие которого в начальный момент времени распределены неравномерно, то схема должна обеспечить описание процесса выравнивания концентраций газовых компонентов с сохранением транспортного свойства при переходе к равновесному относительно плотности, температуры и давления состоянию газовой смеси.

Рассмотрим транспортные свойства явной схемы Мак-Кормака с расщеплением пространственного оператора по направлениям и схемой нелинейной коррекции на примере решения динамической задачи о переходе двухкомпонентной газовой смеси в равновесное состояние при начальном неравномерном пространственном распределении компонентов. Критерием работоспособности схемы наряду с переходом системы в равновесное состояние с прогнозируемыми параметрами является проявление резонансных динамических режимов, обусловленное скоростью распространения возмущений в численной модели процесса.

Математическая модель и метод решения системы уравнений динамики двухкомпонентного газа

Для верификации численной схемы Мак-Кормака с расщеплением пространственного двумерного оператора и схемой нелинейной коррекции решения при описании конвективно-диффузионных

процессов была решена задача о переходе газовой смеси в равновесное состояние при начальном неравномерном распределении одного из компонентов.

Модель процесса основывается на системе уравнений движения вязкого сжимаемого теплопроводного двухкомпонентного газа, в которой учитывается диффузия компонентов. Запишем такую систему в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_1 v)}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{12} \frac{\partial \rho_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{12} \frac{\partial \rho_1}{\partial y} \right); \\ \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_2 v)}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{12} \frac{\partial \rho_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{12} \frac{\partial \rho_2}{\partial y} \right); \\ \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u^2 + p - \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho uv - \tau_{xy}) &= 0; \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho uv - \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v^2 + p - \tau_{yy}) &= 0; \\ \frac{\partial(e)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left([e + p - \tau_{xx}]u - \tau_{xy}v + \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left([e + p - \tau_{yy}]v - \tau_{xy}u + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) &= 0; \\ p = \rho_1 R_1 T + \rho_2 R_2 T; e = \rho_1 C_{v1} T + \rho_2 C_{v2} T + \rho (u^2 + v^2) / 2; \\ \mu = \frac{\rho_1}{\rho} \mu_1 + \frac{\rho_2}{\rho} \mu_2; \lambda = \frac{\rho_1}{\rho} \lambda_1 + \frac{\rho_2}{\rho} \lambda_2; \\ \tau_{xx} = (\mu + \mu_T) \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} D \right); \tau_{xy} = (\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right); D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}. \end{aligned}$$

Здесь: $R_1, R_2, \rho_1, \rho_2, T, C_{v1}, C_{v2}$ – газовые постоянные, плотности, температуры и удельные теплоемкости газовых компонент; $\rho = \rho_1 + \rho_2$ – плотность газовой смеси; D_{12} – коэффициент взаимной диффузии газов:

$$D_{12} = \frac{n_1 D_1 + n_2 D_2}{n_1 + n_2},$$

где n_1, D_1, n_2, D_2 – концентрации и коэффициенты диффузии газов-компонентов $D_1 = (\mu_1 + \mu_t) / \rho$, $D_2 = (\mu_2 + \mu_t) / \rho$, μ_2, μ_t – молекулярная и турбулентная динамическая вязкость компонента с наибольшей концентрацией.

Система уравнений движения вязкого сжимаемого теплопроводного газа записывалась в обобщенных криволинейных координатах [3–5] и решалась явным конечно-разностным методом Мак-Кормака с расщеплением пространственного оператора по направлениям [6] и схемой нелинейной коррекции, обеспечивающей монотонность решения [7].

Физическая и математическая постановка задачи

Пусть в начальный момент времени в расчетной области, представляющей собой единичный квадрат со сторонами $0 < x < 1, 0 < y < 1$ (рис. 1), задано неравновесное распределение плотности неподвижной газовой смеси, содержащей два газовых компонента при температуре 240 К.

Компонент № 1 – метантиол, – теплоемкость которого $C_p = 750$ Дж/кг·К, $C_v = 577$ Дж/кг·К, $R = 173$ Дж/кг·К, постоянная адиабаты $\gamma = 1,3$. Компонент № 2 – метан, – теплоемкость которого $C_p = 2260$ Дж/кг·К, $C_v = 1742$ Дж/кг·К, $R = 518$ Дж/кг·К, постоянная адиабаты $\gamma = 1,3$. В начальный момент времени плотность компонента № 1 распределена по линейному закону вдоль переменной x и меняется от $\rho_1 = 0$ при $x = 0$ до $\rho_1 = 2$ кг/м³ при $x = 1$. От переменной y в начальный момент времени

газодинамические параметры компонента № 1 не зависят. Начальная плотность компонента № 2 – метана – во всей расчетной области постоянна и равна $0,75 \text{ кг/м}^3$. Вследствие того что в начальный момент времени система выведена из состояния равновесия, при $t > 0$ начинается переход системы в равновесное состояние. В равновесном состоянии плотность газовой смеси должна быть равна средней по пространству в начальный момент времени: $\rho_{\text{ср}} = 1,75 \text{ кг/м}^3$. Равновесная плотность компонента № 1 должна в этом случае составлять 1 кг/м^3 .

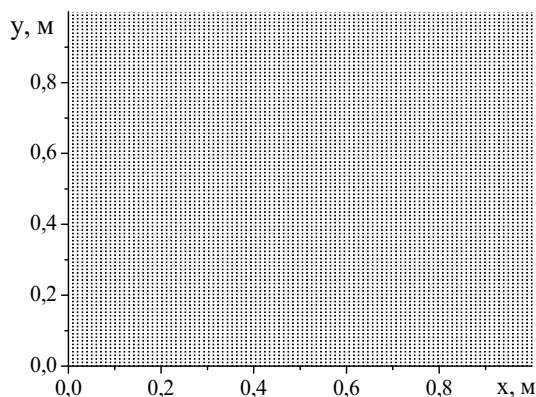


Рис. 1. Форма расчетной области

На рис. 2–5 представлены результаты тестовых расчетов процесса изменения плотности одного из компонентов двухкомпонентной газовой смеси при начальном неравномерном распределении его плотности в расчетной области.

На рис. 2 показана зависимость плотности компонента № 1 от времени при $t > 0$ в точках с координатами $x = 0,01 \text{ м}$, $x = 0,2 \text{ м}$, $x = 0,8 \text{ м}$, $x = 0,99 \text{ м}$, $y = 0,5 \text{ м}$. К моменту времени $t \approx 0,3 \text{ с}$ система переходит в равновесное состояние с плотностью компонента № 1 $\rho_1 = 1 \text{ кг/м}^3$.

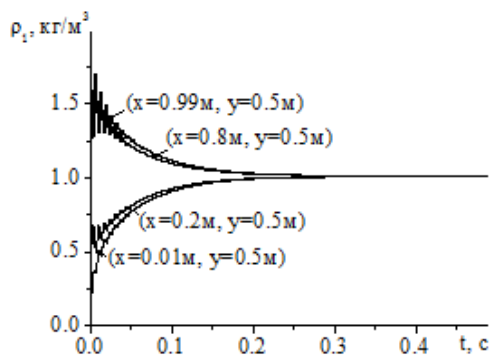


Рис. 2. Процесс выравнивания плотности компонента № 1 в различных точках на оси $y = 0,5 \text{ м}$

Процесс перехода системы в равновесное состояние включает две стадии. На первой конвективной стадии выравнивание плотности происходит преимущественно за счет колебаний газа вдоль оси $0x$. Колебания происходят с частотой $\nu = 156 \text{ Гц}$ (см. рис. 2). Эта частота приблизительно совпадает с первой собственной частотой колебаний смеси вдоль оси $0x$:

$$\nu_{11} = c / 2L = 315 / 2 = 157,5 \text{ Гц},$$

где $c = (\gamma RT)^{1/2}$ – скорость звука смеси; $\gamma = 1,3$ – постоянная адиабаты; $R = R_1 \rho_{1\text{ср}} / (\rho_{1\text{ср}} + \rho_{2\text{ср}}) + R_2 \rho_{2\text{ср}} / (\rho_{1\text{ср}} + \rho_{2\text{ср}})$ – газовая постоянная смеси, которая определяется на основе аддитивного осреднения по массе компонентов; $R_1 = 173 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ – газовая постоянная метантиола; $R_2 = 518 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ – газовая постоянная метана; $\rho_{1\text{ср}} = 1 \text{ кг/м}^3$ – средняя по площади плотность метантиола; $\rho_{2\text{ср}} = 0,75 \text{ кг/м}^3$ –

средняя по площади плотность метана. При температуре смеси $T = 240$ К и газовой постоянной смеси $R = 323$ Дж/(кг·К) скорость звука составляет 315 м/с. Первая собственная частота, полученная в численном расчете, $\nu_{11} = c/2L = 156$ Гц, тогда как по точной формуле для первой собственной частоты смеси получаем

$$\nu_{11} = \frac{c}{2L} = 157,5 \text{ Гц}.$$

Конвективная стадия перехода к равновесному состоянию оканчивается при $t \approx 0,08$ с. К этому моменту времени колебания затухают, газ можно считать неподвижным (рис. 3).

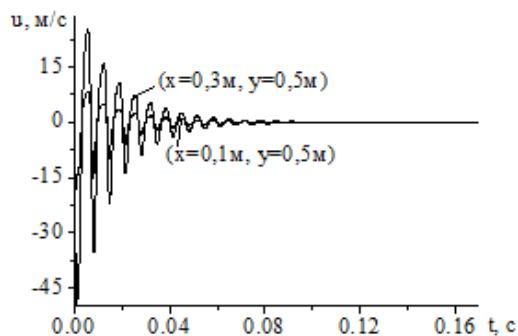


Рис. 3. Колебания скорости газа в процессе перехода к равновесному состоянию в различных точках на оси расчетной области

Затем при $t > 0,08$ с начинается диффузионная стадия, оканчивающаяся при $t \approx 0,3$ с установлением равновесного состояния с постоянной плотностью компонентов (см. рис. 2) и с постоянным давлением смеси (рис. 4).

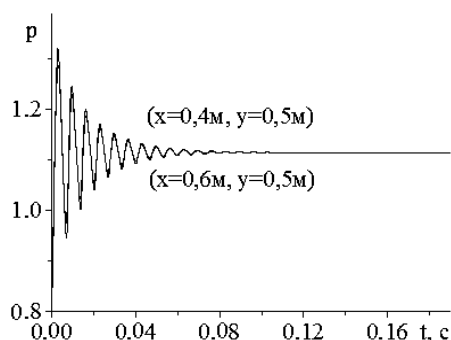


Рис. 4. Процесс установления равновесного давления

Пространственные формы колебаний давления, температуры, плотности газовой смеси и ее компонентов в момент времени $t = 0,03$ с приведены на рис. 5. Колебания происходят вдоль оси $0x$ на первой собственной частоте с узлами скорости при $x = 0$ м, $x = 1$ м, соответственно, при $x = 0$ м, $x = 1$ м располагаются пучности стоячих волн давления, температуры и плотности.

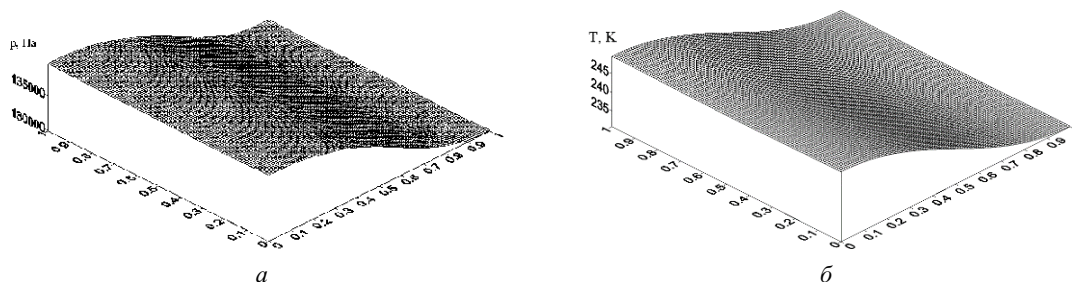


Рис. 5. Поля газодинамических функций двухкомпонентной газовой смеси в момент времени $t = 0,03$ с : а – давление; б – температура; в – плотность смеси; г – плотность компонента № 1; д – плотность компонента № 2 (Начало)

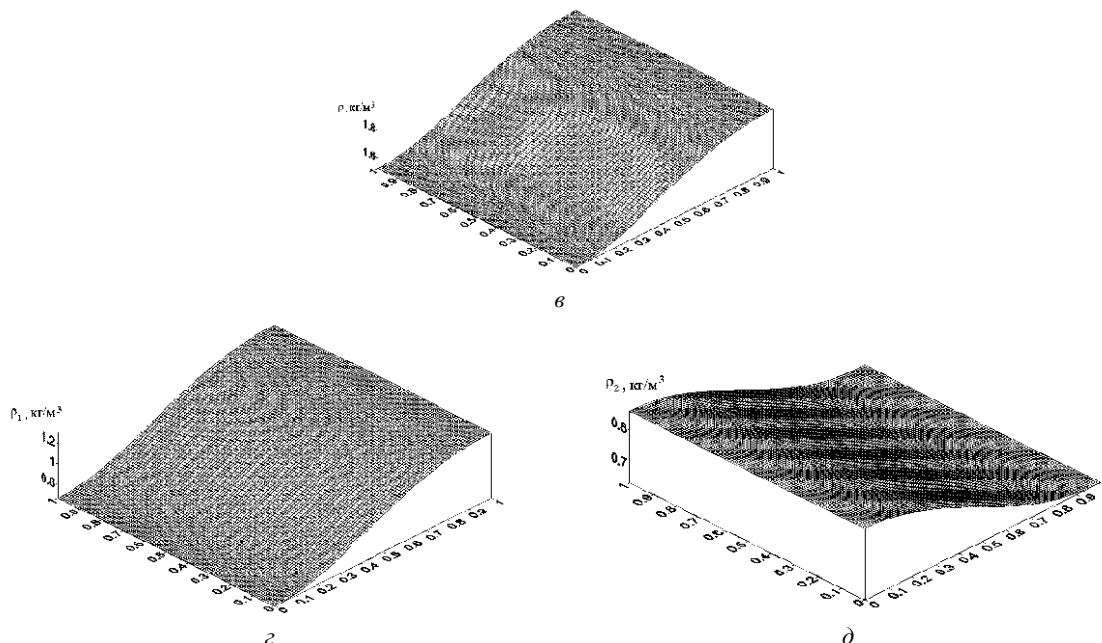


Рис. 5. Поля газодинамических функций двухкомпонентной газовой смеси в момент времени $t = 0,03$ с : a – давление; b – температура; c – плотность смеси; z – плотность компонента № 1; d – плотность компонента № 2 (Окончание)

Расчеты показывают, что процесс установления равновесного состояния в ограниченном объеме при неравновесном начальном распределении плотности одного из компонентов протекает в две стадии – в результате процесса конвекции и последующего процесса диффузии. Конвективная стадия выравнивания плотности происходит с частотой первого линейного резонанса для смеси равновесного состава. Время ее протекания меньше, чем время протекания диффузионной стадии (см. рис. 3, 4), по окончании которой параметры смеси принимают равновесные значения, равные средним по пространству начальным величинам.

Заключение

Таким образом, на основе анализа результатов расчетов можно сделать вывод о работоспособности вычислительного метода применительно к описанию конвективно-диффузионных процессов в двухкомпонентном газе, поскольку обе стадии процесса установления равновесного состояния при начальном неравновесном распределении плотности описываются с высокой точностью. На конвективной стадии достигается высокая точность определения частоты колебаний, что свидетельствует о том, что численная схема отличается хорошими транспортными свойствами, и при моделировании распространения возмущений скорость звука определяется с высокой точностью. Результатом работы схемы на диффузионной стадии является переход к установившимся параметрам, которые также практически совпадают с равновесными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 618 с.
2. Горелик Г.С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику. М.: Физматлит, 1959. 352 с.
3. Steger J.L. Implicit Finite-Difference Simulation of Flow about Arbitrary Two-Dimensional Geometries // AIAA Journal. 1978. Vol. 16. № 7. P. 679–686.
4. Тукмаков А.Л. Численное моделирование колебаний монодисперсной газовой смеси в нелинейном волновом поле // Прикладная механика и техническая физика. 2011. № 2. С. 36–43.
5. Тукмаков А.Л. Динамика коагулирующей полидисперсной газовой смеси в нелинейном волновом поле акустического резонатора // Инженерно-физический журнал. 2015. № 1. С. 11–19.
6. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. М.: Мир, 1991. Т. 2. 551 с.
7. Жмакин А.И., Фурсенко А.А. Об одной монотонной разностной схеме сквозного счета // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1980. № 4. С. 1021–1031.

Поступила в редколлегию 25.12.25

ANALYSIS OF THE TRANSPORT PROPERTIES OF A FINITE-DIFFERENCE PREDICTOR-CORRECTOR SCHEME IN MODELING THE NON-STATIONARY DYNAMICS OF A TWO-COMPONENT GAS

D.A. Tukmakov, A.A. Akhunov, and A.L. Tukmakov

In this work, using an explicit 2D predictor-corrector Mc-Cormack scheme with spatial operator splitting in directions and a nonlinear correction scheme, the process of establishing an equilibrium concentration of the gas components of the carrier medium is considered under an initial non-equilibrium distribution by mass. Two stages of the process of the system transition to an equilibrium state are described-convective and diffusive, the nature of which allows to verify the calculation technique. The results of calculations allow to substantiate the application of the scheme for describing the dynamic processes of establishing equilibrium states in gas-dispersed systems.

Keywords: two-component gas, numerical scheme, transport properties, establishment process, equilibrium state, oscillations.

Тукмаков Дмитрий Алексеевич – канд. физ.-мат. наук (ФИЦ КазНЦ РАН, Казань)
E-mail: tukmakovda@imm.knc.ru

Ахунов Адель Айратович – науч. сотрудник (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: white-bars95@yandex.ru

Тукмаков Алексей Львович – д-р физ.-мат. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: altukmakov@kai.ru

АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНЫХ СВОЙСТВ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНОЙ СХЕМЫ ПРЕДИКТОР – КОРРЕКТОР ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ДИНАМИКИ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ ГАЗОВЗВЕСИ

Д.А. Тукмаков, А.А. Ахунов, А.Л. Тукмаков

При помощи явной 2D-схемы предиктор – корректор Мак-Кормака с расщеплением пространственного оператора по направлениям и схемой нелинейной коррекции рассматривается процесс колебаний двухкомпонентной коагулирующей газовзвеси на частоте первого линейного резонанса газового столба в акустическом резонаторе. Процесс сопровождается установлением равновесной концентрации фракций коагулирующей газовзвеси с полным поглощением мелкодисперсной фракции-донора и возникновением в системе акустического резонанса из-за приближения резонансной частоты газовзвеси вследствие изменения дисперсности к частоте внешнего возбуждения, совпадающей с первой собственной частотой несущей среды. Результаты расчетов позволяют обосновать изменение схемы для описания динамических процессов установления равновесных состояний в газодисперсных системах.

Ключевые слова: двухкомпонентный газ, двухфракционная газовзвесь, численная схема, транспортные свойства, процесс установления, равновесное состояние, колебания.

При моделировании динамики неоднородных сред со сжимаемой несущей фазой численная схема и алгоритм решения приближенной краевой задачи обязаны удовлетворять условию транспортабельности. Данное свойство подразумевает, что возмущение параметров поля, обусловленное конвективным механизмом переноса, распространяется в направлении течения [1]. Направление распространения возмущения за счет диффузионных механизмов, как явно присутствующих в системе уравнений вязкого сжимаемого теплопроводного газа, так и возникающих при численной аппроксимации системы уравнений, изотропно не определяется направлением потока. По этой причине требуется анализ полученного приближенного решения с точки зрения его транспортных свойств. В случае сжимаемой среды транспортное свойство состоит в том, что акустическое возмущение распространяется со скоростью звука относительно несущей среды, которая может быть движущейся. Описание динамики резонансных явлений [2], в том числе в неоднородных средах с изменяющейся дисперсностью со сжимаемой несущей средой, возможно только при сохранении свойства переноса возмущения со скоростью звука, зависящей от параметров несущей среды и дисперсной фазы. Если неравновесность системы обусловлена изменением дисперсности в процессе коагуляции фракций дисперсной фазы, то численная схема также должна обеспечить описание перехода к равновесному состоянию дисперсной фазы и газовзвеси в целом с сохранением транспортных свойств.

Рассмотрим проявление транспортных свойств явной схемы Мак-Кормака с расщеплением пространственного оператора по направлениям и схемой нелинейной коррекции на примере решения динамической задачи о генерации резонансных колебаний двухкомпонентной коагулирующей газовзвеси в акустическом резонаторе при изменении состава дисперсной фазы.

Критерием работоспособности схемы наряду с переходом системы в равновесное состояние является проявление резонансных динамических режимов, обусловленное скоростью распространения возмущений в численной модели процесса.

Для верификации численной схемы Мак-Кормака с расщеплением пространственного двумерного оператора и схемой нелинейной коррекции решения при описании динамики полидисперсной газовзвеси со скоростным и температурным скольжением фаз и фракций была решена задача о переходе коагулирующей газовзвеси в равновесное состояние, характеризующееся резонансными свойствами, близкими к резонансным свойствам несущей среды.

Модель процесса основывается на системе уравнений движения полидисперсной многоскоростной и многотемпературной коагулирующей газовзвеси с вязкой сжимаемой теплопроводной несущей средой –

двухкомпонентным газом в полностью эйлеровой постановке [3–5]. Система решалась явным методом Мак-Кормака с расщеплением пространственного оператора по направлениям [6] и схемой нелинейной коррекции, обеспечивающей монотонность решения как для несущей среды [7], так и для дисперсных фракций.

Геометрия акустического резонатора, представляющего собой закрытый канал, представлена на рис. 1. Длина канала $L = 1$ м, высота $d = 0,06$ м. На левой границе канала располагается поршень, колеблющийся по гармоническому закону с частотой первого линейного резонанса для закрытой трубы $\omega_{11} = \pi c / L$, заполненной воздухом с температурой $T = 343$ К и плотностью $\rho = 1,2$ кг/м³. Здесь $c = (gRT)^{1/2}$ – скорость звука несущей среды, $R = 287$ Дж/кгК – газовая постоянная воздуха. Предполагается, что в воздухе взвешены две фракции частиц с диаметрами $d = 1$ мкм со средней плотностью 1 кг/м³ и диаметром $d = 200$ мкм со средней $\rho = 0,2$ кг/м³. Приведенные результаты расчетов получены для амплитуды колебаний поршня $a = 0,005$ м.

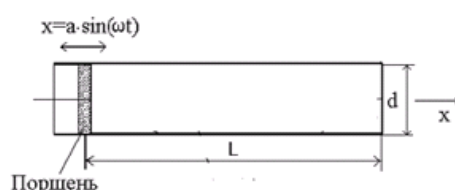


Рис. 1. Схема резонатора

На рис. 2–5 представлены результаты расчетов динамики коагулирующего аэрозоля в закрытом канале на основе модели многоскоростной и многотемпературной полидисперсной газозвеси [4, 5].

С течением времени происходит изменение дисперсности системы вследствие коагуляции частиц мелкой и крупной фракций, относительное скоростное скольжение которых в течение периода колебаний на оси трубы при $x = L/2$ достигает 4 м/с (рис. 2, а). Колебания газозвеси сопровождаются ростом давления вследствие повышения температуры газа (рис. 2, б).

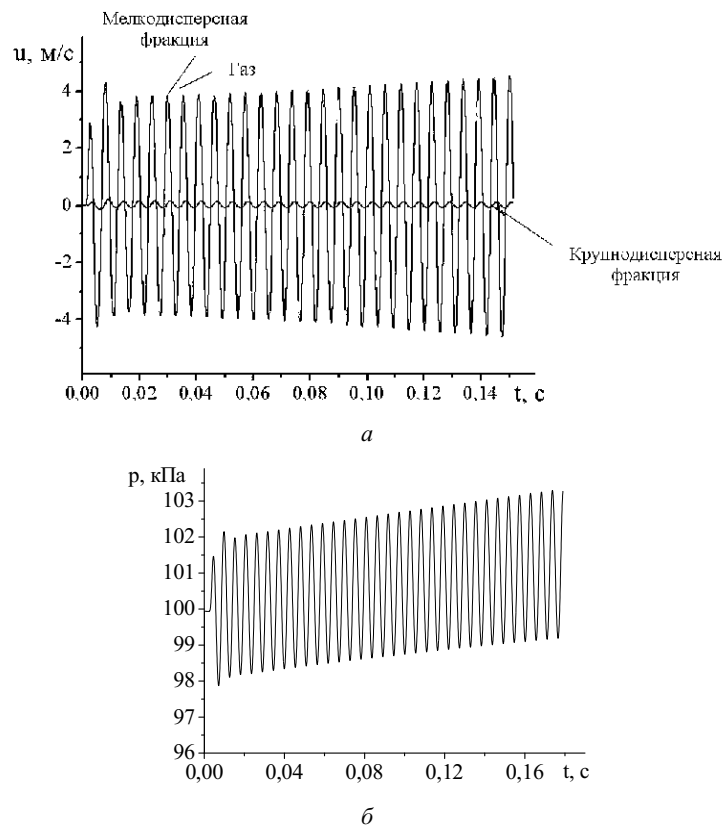


Рис. 2. Временные зависимости газодинамических функций: а – продольная составляющая скорости газа, мелкодисперсной и крупнодисперсной фракции; б – давление газа в точке $x = L/2$ на оси канала

Приведем временные зависимости плотностей газа, а также средних плотностей мелкодисперсной (рис. 3, кривая 1) и крупнодисперсной (рис. 3, кривая 2) фракций в точке $x = L/2$ на оси канала. Средняя плотность мелкодисперсной фракции монотонно снижается к моменту времени $t = 0,18$ с на величину $\Delta\rho \approx 0,51$ кг/м³. Приблизительно на ту же величину увеличивается средняя плотность крупной фракции (см. рис. 3). К моменту времени $t \approx 0,143$ с достигается равенство средних плотностей фракций. К моменту времени $t \approx 0,5$ с происходит снижение скорости коагуляции и установление стационарной структуры газозвеси с плотностью мелкодисперсной фракции 0,01 кг/м³ и плотностью крупнодисперсной фракции 1,19 кг/м³, что близко к дисперсности смеси при исчерпаниии компонента донорской фракции.

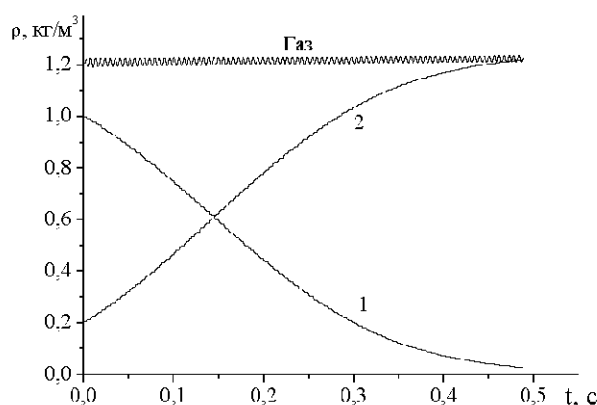


Рис. 3. Временные зависимости плотностей газа, средних плотностей мелкодисперсной и крупнодисперсной фракций в точке $x = L/2$ на оси канала

На рис. 4 представлена временная зависимость продольной составляющей скорости частиц мелкодисперсной фракции с диаметром частиц 2 мкм.

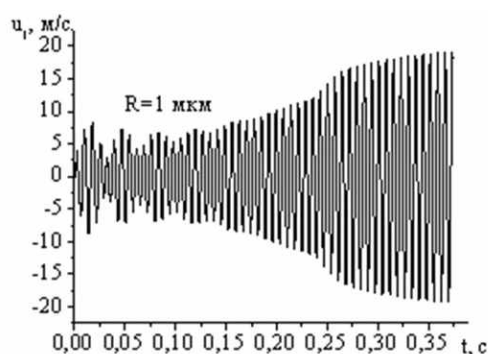


Рис. 4. Генерация резонансных колебаний при уменьшении средней плотности мелкодисперсной фракции

Поскольку мелкодисперсная фракция движется в несущей среде с малым скоростным скольжением, она играет основную роль в диссипации кинетической энергии несущей среды. В процессе коагуляции меняется состав газозвеси, которая представлена теперь преимущественно крупнодисперсной фракцией-акцептором со сравнительно малой концентрацией частиц. В результате снижается диссипация кинетической энергии смеси, возрастает добротность акустической системы, скорость звука в которой приближается к скорости звука в чистом газе. Поскольку частота внешнего воздействия совпадает с первой собственной частотой продольных колебаний газового столба, в закрытом канале генерируются резонансные колебания газозвеси (см. рис. 4).

На рис. 5 представлена временная зависимость для радиуса частиц крупнодисперсной фракции с начальным радиусом 100 мкм, полученная для точки на оси канала при $x = L/2$.

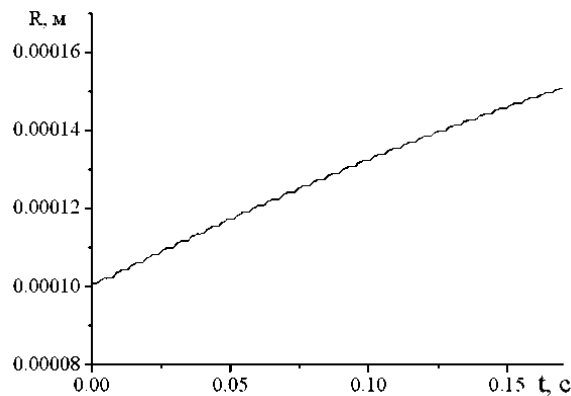


Рис. 5. Временная зависимость радиуса частиц крупной фракции в точке $x = L/2$ на оси канала

Расчеты позволяют сопоставить рост средней плотности крупнодисперсной фракции в точке $x = L/2$ на оси канала с изменением радиуса частиц этой фракции в той же точке. Ее средняя плотность возрастает в этой точке к моменту времени $t \approx 0,17$ с приблизительно в 3,375 раза относительно начальной средней плотности и достигает величины $\rho \approx 0,675$ кг/м³ (рис. 3, кривая 2), что достигается коагуляцией фракций и роста радиуса частиц-акцепторов приблизительно в 1,5 раза к этому моменту времени (см. рис. 5). Это обеспечивает рост объемного содержания фракции и ее средней плотности приблизительно в 3,375 раза – от $\rho = 0,2$ кг/м³ до $\rho \approx 0,675$ кг/м³.

Приведенные результаты, описывающие процесс коагуляции и изменение дисперсности системы, подтверждают сохранение транспортных свойств схемы, определяющей скорость звука в двухкомпонентной газозвеси, а также свидетельствуют о выполнении балансовых соотношений для средних плотностей фракций и в целом характеризуют работоспособность численного метода при описании процесса перехода газозвеси к равновесным концентрациям фракций при генерации резонансных колебаний смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 618 с.
2. Горелик Г.С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику. М.: Физматлит, 1959. 352 с.
3. Steger J.L. Implicit Finite-Difference Simulation of Flow about Arbitrary Two-Dimensional Geometries // AIAA Journal. 1978. Vol. 16. № 7. P. 679–686.
4. Тукмаков А.Л. Численное моделирование колебаний монодисперсной газозвеси в нелинейном волновом поле // Прикладная механика и техническая физика. 2011. № 2. С. 36–43.
5. Тукмаков А.Л. Динамика коагулирующей полидисперсной газозвеси в нелинейном волновом поле акустического резонатора // Инженерно-физический журнал. 2015. № 1. С.11–19.
6. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. М.: Мир, 1991. Т. 2. 551 с.
7. Жмакин А.И., Фурсенко А.А. Об одной монотонной разностной схеме сквозного счета // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1980. № 4. С. 1021–1031.

Поступила в редколлегию 25.12.25

ANALYSIS OF THE TRANSPORT PROPERTIES OF A FINITE-DIFFERENCE PREDICTOR–CORRECTOR SCHEME IN MODELING NON-STATIONARY DYNAMICS OF A POLYDISPERSE GAS SUSPENSION

D.A. Tukmakov, A.A. Akhunov, and A.L. Tukmakov

In this work, the process of oscillations of a two-component coagulating gas suspension at the frequency of the first linear resonance of a gas column in an acoustic resonator is considered

using an explicit 2D predictor–corrector McCormack scheme with a spatial operator split along the directions and a nonlinear correction scheme. The process is accompanied by the establishment of an equilibrium concentration of coagulating gas suspension fractions with complete absorption of the fine-grained donor fraction and the occurrence of acoustic resonance in the system due to the approach of the gas suspension resonance frequency to the external excitation frequency, which coincides with the first natural frequency of the carrier medium. The results of the calculations allow us to justify the use of the scheme for describing the dynamic processes of establishing equilibrium states in gas-dispersed systems.

Keywords: two-component gas, two-fraction gas suspension, numerical scheme, transport properties, establishment process, equilibrium state, oscillations.

Тукмаков Дмитрий Алексеевич – канд. физ.-мат. наук (ФИЦ КазНЦ РАН, Казань)
E-mail: tukmakovda@imm.knc.ru

Ахунов Адель Айратович – науч. сотрудник (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: white-bars95@yandex.ru

Тукмаков Алексей Львович – д-р физ.-мат. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: altukmakov@kai.ru

ВОЗДУШНОЕ СУДНО С ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТЯГИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВЗЛЕТА И ПОСАДКИ

А.И. Валиев, И.Л. Хисамиев, В.А. Мильчаков, Р.И. Низамутдинов

Представлена концепция малого летательного аппарата вертикального взлета и посадки, в котором переход между режимами полета осуществляется исключительно за счет программно-управляемого перераспределения тяги стационарно закрепленных электрических двигателей. Научная новизна работы заключается в реализации алгоритмического управления переходным режимом без применения механических средств изменения вектора тяги, что позволяет снизить массу конструкции и повысить ее надежность. Предложенная схема полностью исключает механические приводы поворота силовых установок и сложные трансмиссии, что снижает массу конструкции, повышает ее надежность и уменьшает энергопотребление в крейсерском режиме. Описаны архитектура системы управления, алгоритм перехода между режимами полета и этапы экспериментальной отработки прототипов. Показано, что использование программного распределения тяги обеспечивает плавный переход, высокую устойчивость и снижение энергетических потерь по сравнению с традиционными решениями.

Ключевые слова: VTOL, распределение тяги, программное управление, стационарные двигатели, переходный режим, беспилотный летательный аппарат, система управления.

В последнее время наблюдается повышенный научный интерес к малым летательным аппаратам вертикального взлета и посадки (VTOL), которые совмещают маневренность мультироторных систем и энергоэффективность самолетных схем. Такие аппараты широко применяются в мониторинге, картографии, доставке грузов и поисково-спасательных задачах, что формирует устойчивый спрос на компактные и надежные VTOL-платформы.

Ключевой технической проблемой в создании подобных аппаратов является обеспечение плавного и устойчивого перехода между режимами висения и горизонтального полета. Существующие решения основаны либо на мультироторных схемах с низкой крейсерской эффективностью, либо на механических поворотных механизмах и трансмиссиях, которые увеличивают массу, усложняют конструкцию и снижают надежность за счет наличия подвижных узлов и «точек отказа».

В связи с этим актуальна разработка VTOL-аппарата, в котором переход между режимами осуществляется без механических приводов, исключительно за счет программного регулирования тяги стационарно закрепленных двигателей. Такой подход позволяет рассматривать задачу переходного режима как задачу управления динамической системой, решаемую алгоритмическими методами.

Разработка эффективных малых летательных аппаратов вертикального взлета и посадки остается актуальной задачей, о чем свидетельствует значительное число патентов и публикаций. Существующие решения можно условно разделить на три основные группы, каждая из которых имеет критические ограничения.

1. Мультироторные схемы (рис. 1).

Аппараты с множеством подъемных винтов, хорошо управляются в режиме висения, однако характеризуются высоким аэродинамическим сопротивлением и низкой энергоэффективностью в горизонтальном полете [1]. Постоянная работа всех винтов ограничивает дальность и время полета, из-за чего такие схемы не используются в задачах с протяженными маршрутами.

2. Аппараты с поворотными двигателями.

На рис. 2 представлен аппарат с вертикальным расположением поворотных двигателей, на рис. 3 – с горизонтальным. Поворотные механизмы позволяют реализовать эффективный крейсерский режим, но

требуются сложные сервоприводы, приводы наклона и подвижные узлы [2, 3]. Это увеличивает массу конструкции, снижает надежность и создает «единичные точки отказа», что критично для беспилотных систем.

3. Аппараты с трансмиссией перераспределения мощности (рис. 4).

Применение механической трансмиссии обеспечивает возможность привода подъемных винтов от одного двигателя, однако подобные конструктивные решения характеризуются повышенной массой, сложностью синхронизации вращения винтов и низкой ремонтопригодностью [4]. Переход между режимами висения и горизонтального полета в таких схемах зачастую сопряжен с потерей устойчивости.

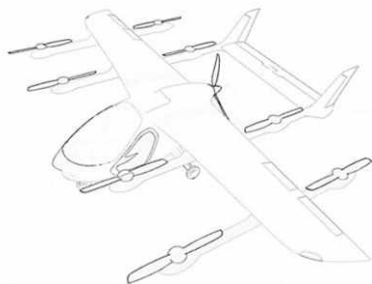


Рис. 1

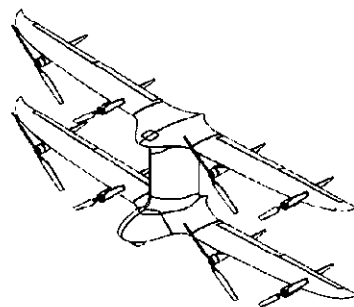


Рис. 2



Рис. 3



Рис. 4

Анализ имеющихся подходов подтверждает необходимость проектирования конструкции, характеризующейся устойчивостью при смене режимов полета, высокой надежностью и минимальной массой силовой установки [5, 6].

Наиболее близким аналогом устройства по совокупности технических признаков является техническое решение [7] – tailsitter (рис. 5). В отличие от указанного прототипа, требующего сложной координации силовых агрегатов и конструктивных решений для размещения полезной нагрузки, в предлагаемом летательном аппарате переход между режимами полета реализуется за счет программного перераспределения тяги при фиксированном расположении двигателей, что снижает конструктивную и алгоритмическую сложность системы.



Рис. 5

Цель работы состоит в разработке и экспериментальной отработке летающего прототипа VTOL-аппарата по схеме «tailsitter» с X-образной компоновкой крыльев, обеспечивающего вертикаль-

ный взлет и посадку без применения сложной механики (например, поворотных моторов или редукторов), с последующим переходом в горизонтальный полет за счет аэродинамического профиля крыла и дифференциального управления тягой электродвигателей.

Предлагаемое малое воздушное судно вертикального взлета и посадки реализует принципиально новый подход к управлению и переходу между режимами полета, основанный на программном распределении тяги. Ключевой идеей является отказ от каких-либо механических средств изменения вектора тяги в пользу алгоритмической системы, управляющей стационарно закрепленными силовыми установками.

Общий вид конструкции разработанного летательного аппарата приведен на рис. 6.

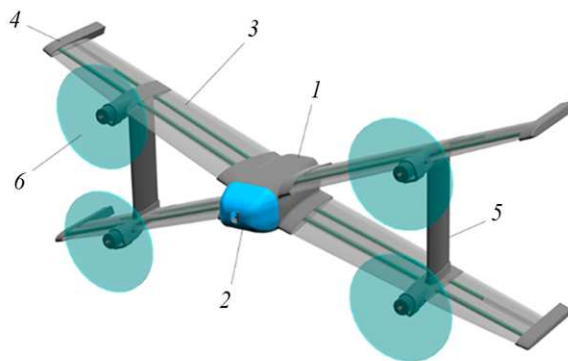


Рис. 6

На фюзеляж 1 крепится носовой обтекатель 2, обеспечивающий снижение лобового сопротивления и размещение элементов бортового оборудования. Крыло 3 устанавливается на фюзеляже и снабжено концевыми обтекателями 4, уменьшающими индуктивное сопротивление. Пары крыльев дополнительно связаны силовой опорой 5, повышающей жесткость конструкции и устойчивость в полете. На крыльях неподвижно размещаются двигатели 6, обеспечивающие создание тяги.

Фюзеляж выполняет роль основного силового элемента, объединяющего все компоненты летательного аппарата. Его аэродинамическая форма оптимизирована для снижения лобового сопротивления в режиме горизонтального полета и обеспечения устойчивости при переходных режимах. Крыло предназначено для создания аэродинамической подъемной силы в крейсерском режиме. Крыло имеет достаточно большое удлинение для обеспечения высокого аэродинамического качества. Силовая установка состоит как минимум из четырех подъемных электрических двигателей с воздушными винтами. Двигатели жестко и стационарно закреплены на фюзеляже и/или консолях крыла. Их расположение симметрично относительно центра масс аппарата, что является необходимым условием для эффективного дифференциального управления. Программно-аппаратный комплекс управления, размещенный в фюзеляже, выполняет функции сбора, обработки и анализа данных, а также формирования управляющих воздействий на силовую установку и аэродинамические органы управления.

Отличительной конструктивной особенностью является полное отсутствие поворотных механизмов, сервоприводов, наклоняющих двигатели или крылья, а также сложных механических трансмиссий. Это позволяет значительно снизить массу, упростить производство и повысить общую надежность конструкции.

Приведем описание исходной конструкции.

Тип аппарата – VTOL (tailsitter). Компоновка – X-образные крылья, центральный фюзеляж. Высота аппарата в 5–6 раз меньше размаха крыла (примерно 1 м). Силовая установка состоит из четырех бесколлекторных электродвигателей (2306, 1700 KV), винтов (0,18 м). Питание осуществляется от аккумуляторной батареи 4S LiPo.

Конфигурация включает мотогондолы и винтомоторные группы, размещенные на концах консолей крыльев.

Система управления – полетный контроллер российского производства с предустановленным профилем «квадрокоптер» (ввиду отсутствия поддержки VTOL-режимов на момент начала работ).

На первом этапе разработки выявлены следующие проблемы:

- недостаточная жесткость конструкции (при работе двигателей на концах тонких консолей возникали сильные вибрации, угрожавшие целостности планера);

- увеличение массы при усилении (для повышения жесткости были добавлены периметральные перемычки/перекладыны, что значительно увеличило массу и ухудшило энерговооруженность).

Выявлены также аэродинамические недостатки. Конфигурация по своим динамическим характеристикам была эквивалентна многороторной схеме с увеличенным плечом по оси тангажа (большой размах по тангажу, малый – по крену). Зафиксировано высокое лобовое сопротивление при попытках поворота вокруг оси рыскания, а также недостаточный управляющий момент по рысканию при использовании стандартной квадрокоптерной схемы управления.

Наблюдаются проблемы с программным обеспечением/аппаратурой. Зафиксированы случаи утраты экспериментальных данных, обусловленные нестабильностью системы электропитания и ограничениями используемого программного обеспечения полетного контроллера.

Настройка пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора (ПИД-регулятора) для малого воздушного судна вертикального взлета и посадки осуществляется на основе классического закона управления [8]:

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t),$$

где $e(t)$ – ошибка между заданным и измеренным значением ориентации; K_p , K_i , K_d – коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих.

Пропорциональная составляющая рассчитывается как разница между значениями гироскопа g и ресивера r , умноженная на коэффициент K_p :

$$P = K_p (g - r).$$

Интегральная составляющая рассчитывается как разница между значениями гироскопа g и ресивера r , умноженная на коэффициент K_i . Полученный результат суммируется с предыдущим значением интегрального регулятора I :

$$I = I'(g - r) K_i.$$

Дифференциальная составляющая рассчитывается как разница между предыдущими значениями гироскопа g_0 и ресивера r_0 , вычтенная из текущей разницы значений гироскопа g и ресивера r , умноженная на коэффициент K_d :

$$D = (g - r - g_0 - r_0) K_d.$$

Таким образом, настройка ПИД-регулятора заключается в нахождении K_p , K_i , K_d для углов крена, тангажа и рыскания.

Программно-аппаратный комплекс управления (рис. 7) построен по замкнутому принципу и включает следующие ключевые модули.

1. Блок датчиков.

Включает инерциальный измерительный модуль, содержащий акселерометры, гироскопы и магнитометры, а также приемник спутниковой навигации (GPS/ГЛОНАСС). Данные с этих датчиков формируют исходную информацию о текущем пространственном положении, ориентации, линейных и угловых скоростях аппарата.

2. Модуль фильтрации данных.

Осуществляет предварительную обработку сырых данных с датчиков. Как правило, для этой цели используется фильтр Калмана или его нелинейные модификации, которые позволяют компенсировать

шумы и получить точную и устойчивую оценку углов ориентации (крена, тангажа, рысканья) и положения в пространстве.

3. Модуль определения ориентации на основе отфильтрованных данных.

Формирует оценку пространственного положения и угловой ориентации летательного аппарата, используемую при расчете управляющих воздействий.

4. Модуль расчета управляющих моментов.

Является ядром системы управления. На основе данных о текущей ориентации и заданном режиме полета (висение, переход, горизонтальный полет) модуль рассчитывает требуемые управляющие моменты по трем осям, которые необходимо приложить к аппарату для стабилизации или выполнения маневра.

5. Модуль распределения тяги.

Преобразует рассчитанные управляющие моменты в конкретные командные сигналы для каждого подъемного двигателя. Алгоритм этого модуля рассчитывает, какую тягу должен создать каждый двигатель, чтобы суммарно получить требуемый момент и общую подъемную силу. Результатом работы модуля являются индивидуальные команды на изменение частоты вращения для каждого мотора.

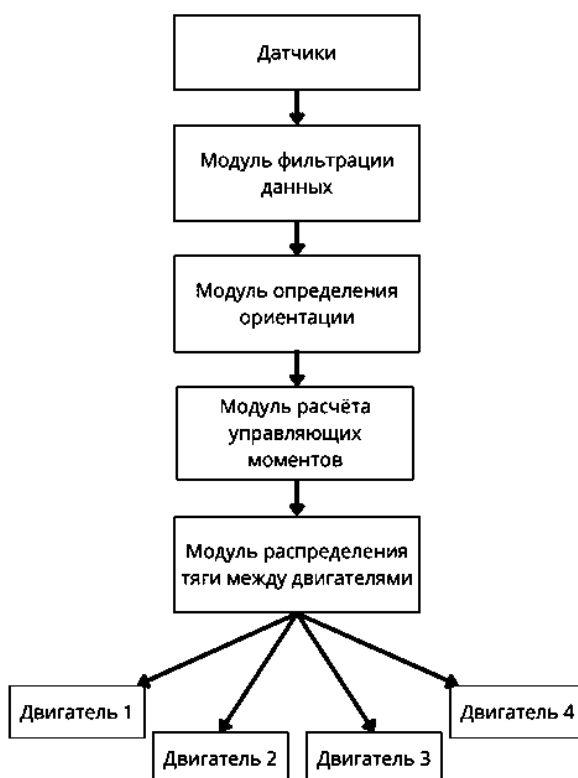


Рис. 7

Управление воздушным судном во всех режимах полета основано на комбинированном использовании дифференциальной тяги подъемных двигателей и аэродинамических поверхностей. В режиме висения управление осуществляется исключительно за счет дифференциального изменения тяги двигателей. Управление по крену и тангажу создается за счет создания дисбаланса тяги между противоположными двигателями. Например, для создания крена на правый борт тяга двигателей на правом полукрыле уменьшается, а на левом – увеличивается. Управление по рысканью обеспечивается за счет формирования суммарного реактивного момента, возникающего при дифференциальном изменении тяги пар двигателей с противоположным направлением вращения. Например, пары двигателей, вращающихся по часовой стрелке, увеличивают тягу, а пары, вращающиеся против часовой, уменьшают, создавая момент вокруг вертикальной оси. В режиме горизонтального полета после завершения перехода и набора крейсерской скорости основная нагрузка по созданию подъемной силы ложится на крыло. Подъемные двигатели работают на минимально необходимой мощности, достаточной для компенсации части веса и обеспече-

ния управления и стабилизации. Управление по крену и тангажу преимущественно осуществляется с помощью аэродинамических поверхностей (элеронов, рулей высоты), а подъемные двигатели используются для тонкой коррекции и компенсации возмущений. Управление по рысканью осуществляется рулем направления. Такой гибридный подход позволяет минимизировать энергопотребление в самом продолжительном крейсерском режиме, сохраняя при этом высокую маневренность и устойчивость. Ключевым элементом предложенной концепции является полностью программный алгоритм, обеспечивающий плавный и устойчивый переход между режимом вертикального висения и горизонтального полета, а также обратный переход.

Алгоритм (рис. 8) реализован в программно-аппаратном комплексе и состоит из нескольких последовательных фаз.



Рис. 8

Реализованный в программно-аппаратном комплексе алгоритм перехода летательного аппарата от вертикального к горизонтальному полету состоит из четырех последовательно выполняемых фаз, обеспечивающих устойчивость и управляемость на всех этапах переходного режима.

На первом этапе аппарат, находясь в строго вертикальном положении, осуществляет взлет и зависание за счет точной балансировки, где суммарная тяга его подъемных двигателей в точности компенсирует вес, а управление ориентацией по крену, тангажу и рысканью обеспечивается исключительно за счет дифференциального изменения тяги этих же двигателей с постоянным контролем данных инерциального блока. После подачи команды на переход начинается вторая фаза: система, используя ПИД-контуры, плавно наклоняет корпус, создавая небольшой угол по тангажу, что приводит к появлению горизонтальной составляющей вектора тяги. Эта составляющая вызывает разгон аппарата вперед, в то время как вертикальная компонента по-прежнему уравнивает силу тяжести. В процессе разгона наступает третья, наиболее критическая фаза – перераспределение несущей функции. С увеличением скорости крыло генерирует все возрастающую аэродинамическую подъемную силу, и алгоритм, отслеживая параметры движения, начинает пропорционально уменьшать тягу подъемных двигателей, пока крыло полностью не берет на себя компенсацию веса. После этого аппарат выходит на крейсерский горизонтальный полет, где основную роль в управлении играют аэродинамические поверхности, а двигатели переходят в режим минимальной тяги для стабилизации и коррекции. Завершающий этап, обратный

переход и посадка, выполняется снижением скорости и приводит к уменьшению аэродинамической подъемной силы, что компенсируется плавным увеличением тяги двигателей. Аппарат возвращается в вертикальное положение и осуществляет посадку за счет контролируемого уменьшения суммарной тяги до нуля.

Настройка ПИД-контроллеров и фильтров представлены из анализа логов полетов:

```
pidController = 2 (Betaflight)
pidP[ROLL] = 41, pidI[ROLL] = 3, pidD[ROLL] = 25
pidP[PITCH] = 41, pidI[PITCH] = 3, pidD[PITCH] = 25
pidP[YAW] = 79, pidI[YAW] = 2, pidD[YAW] = 6
pidF[ROLL] = 6, pidF[PITCH] = 6, pidF[YAW] = 6
ff_boost = 15
anti_gravity_gain = 80
iterm_relax = 1
```

Анализ поведения летательного аппарата в режиме висения демонстрирует устойчивую работу системы управления с минимальным дрейфом по пространственным координатам, что свидетельствует о корректной настройке пропорциональных и интегральных составляющих регуляторов. Это объясняется сбалансированными P-коэффициентами для тангажа и крена, агрессивным YAW, который компенсирует высокий момент инерции конструкции, настройкой `anti_gravity_gain = 80`, помогающей удерживать высоту при изменениях углов.

Стабильность переходных процессов при резких управляющих воздействиях обеспечивается следующими параметрами настройки системы управления:

- `iterm_relax = 1` – динамический сброс I-компонента при резких движениях;
- умеренное значение D-компоненты, что обеспечивает демпфирование колебаний;
- `ff_boost = 15`, способствующее улучшению отклика на команды.

Особенность полета при попытках длительного горизонтального полета – самопроизвольное увеличение тяги, что связано с неправильной осью управления для тангажа в `tailsitter`-конфигурации, отсутствием специализированного режима VTOL в прошивке, компенсацией силы тяжести при наклоне, что трактуется контроллером как необходимость увеличения общей тяги.

Тестовые полеты в помещении проводились со следующими параметрами:

```
- pidController = 2 (Betaflight)
- pidP[ROLL] = 63, pidI[ROLL] = 4, pidD[ROLL] = 4
- pidP[PITCH] = 63, pidI[PITCH] = 4, pidD[PITCH] = 4
- pidP[YAW] = 65, pidI[YAW] = 4, pidD[YAW] = 4
- pidF[ROLL] = 6, pidF[PITCH] = 6, pidF[YAW] = 6
```

Анализ результатов показал, что благодаря высоким P-коэффициентам был успешно выполнен полет в акробатическом режиме, при этом аппарат продемонстрировал хорошую управляемость. Данные настройки признаны оптимальными для демонстрации конструктивных возможностей летательного аппарата в отсутствие автоматической стабилизации.

При проведении испытаний с аккумуляторной батареей типа 6S (по сравнению с ранее использовавшейся 4S) наблюдалось значительное увеличение тяги. Однако при использовании аккумуляторной батареи повышенной емкости выявлено ухудшение устойчивости по каналу рыскания и увеличение динамической чувствительности системы управления по высоте.

Причина проблем состоит в несоответствии настроек ПИД под большую мощность 6S батареи, ускоренных процессах управления, требующих перенастройки D-компонентов. Также система управления не обеспечивает требуемой быстродействующей компенсации возмущений вследствие увеличения крутизны тяговых характеристик силовой установки.

В ходе экспериментальной отработки `tailsitter`-конфигурации, функционирующей в режиме квадрокоптера, был выявлен ряд существенных недостатков.

Первая группа проблем связана с несоответствием осей управления реальной физической конфигурации аппарата. Вторая группа проблем касается автоматической стабилизации высоты. В вертикальном полете (вертолетный режим) сигнал тангажа управляет не высотой, а скоростью. При переходе в самолетный режим стандартный алгоритм стабилизации высоты интерпретирует это как необходимость постоянного наращивания тяги. В результате при увеличении угла атаки наблюдается самопроизвольный рост суммарной тяги силовой установки, что обусловлено особенностями интерпретации управляющих сигналов стандартным алгоритмом стабилизации.

Третья группа недостатков обусловлена динамическими характеристиками конструкции. Значительный размах крыльев приводит к увеличению моментов инерции относительно основных осей, что усложняет задачу стабилизации при использовании стандартных алгоритмов управления. Стандартные ПИД-коэффициенты не могут адекватно компенсировать эти эффекты.

В таблице приведены тактико-технические характеристики трех последовательно изготовленных и испытанных масштабных образцов экспериментальных летательных аппаратов. Представленные данные позволяют провести сравнительный анализ влияния масштаба на основные эксплуатационные параметры. Поэтапное масштабирование конструкции дало возможность детально исследовать зависимость аэродинамического качества, распределения масс, устойчивости и управляемости от геометрических и массогабаритных характеристик аппарата. Совокупный анализ полученных для трех масштабов результатов позволил определить оптимальную геометрию платформы, сформулировать требования к композитному планеру и выбрать наиболее сбалансированную конфигурацию для последующего этапа разработки – создания опытного образца установочного размера и его подготовки к летным испытаниям.

Параметры	Габаритные размеры		
	360 × 930 × 200 мм	720 × 2000 × 400 мм	1440 × 4000 × 800 мм
Максимальная взлетная масса	2 кг	8 кг	15 кг
Сухая масса	1,4 кг	5 кг	10 кг
Материал корпуса	ABS, армированный углеродным наполнителем	Композитный	
Время полета	до 20 мин*	до 40 мин*	до 60 мин*
Крейсерская скорость	100 км/ч	140 км/ч	120 км/ч
Дальность полета	5 км	30 км	50 км

Примечание: * – в зависимости от режимов полета.

Проведенное исследование, включавшее этапный процесс разработки прототипов и комплексное математическое моделирование, позволило сделать следующие выводы.

Предложенная концепция является технически реализуемой и отличается рядом ключевых преимуществ по сравнению с известными аналогами.

Достигнуто снижение массы и сложности за счет устранения тяжелых и ненадежных поворотных механизмов и трансмиссий. Повышение энергоэффективности подтверждено результатами моделирования: в крейсерском режиме потребляемая мощность снижается благодаря возможности работы подъемных двигателей на минимальной тяге или их частичному отключению.

Плавность и устойчивость переходных процессов обеспечивается алгоритмом управления, который координатно меняет ориентацию аппарата и перераспределяет тягу по мере роста аэродинамической подъемной силы крыла.

Прототип с усилением выполнил не менее десяти полетов в режиме вертикального взлета и зависания. Полеты в горизонтальном режиме нестабильны из-за сложной трансформации осей управления и аэродинамического сопротивления. Стабильность в режиме «вертолет» значительно выше у модернизи-

рованного варианта (с перемещенными моторами). В самолетном режиме наблюдается снижение устойчивости по сравнению с первой версией, но общая управляемость считается приемлемой для исследовательского прототипа.

Несмотря на подтверждение базовой работоспособности концепции, полученные результаты определяют направления дальнейших исследований, направленных на повышение устойчивости и расширение функциональных возможностей летательного аппарата, – разработку и внедрение адаптивного управления или управления на основе нелинейных наблюдателей состояния для повышения устойчивости к сильной турбулентности и боковому ветру. Конструкция X-tailsitter демонстрирует потенциал как простая VTOL-схема без механических поворотных узлов, но при этом требуется улучшение аэродинамической компоновки, оптимизация распределения масс, разработка специализированного программного обеспечения/прошивки контроллера с поддержкой VTOL-логики. Целесообразен отказ от квадрокоптерной модели управления в пользу специализированной прошивки с поддержкой VTOL-логики и корректным распределением каналов управления. Необходимо внедрить надежную систему логгирования, включая резервное питание для SD-карты, чтобы обеспечить сохранность данных при авариях. Перспективно исследование асимметричных профилей крыла и влияния расположения винтомоторных групп на эффективность переходного режима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самолет с вертикальным взлетом и посадкой: пат. 214190098U КНДР, № 202022260455; заявл. 10.12.2020; опубл. 14.09.2021.
2. *Jeffrey Kyle G., Pranay Sinha.* US Patent 20200156785, 2022.
3. Беспилотное воздушное судно самолетного типа с вертикальным взлетом и посадкой (VTOL) и способ его сборки: пат. 2831842 Рос. Федерация, № 2024115618; заявл. 6.06.2024; опубл. 16.12.2024, Бюл. № 35.
4. *Gurkan Acikel.* Patent EP 3902744B1, 2025.
5. *Симонов Б.С., Крапивин А.В., Симонов Б.С.* Алгоритмы определения ориентации подвижных объектов по данным спутниковых и инерциальных систем // Гироскопия и навигация. 2019. № 3 (106). С. 44–60.
6. *Краснов С.В., Орлов А.П.* Системы управления летательных аппаратов с комбинированной схемой управления // Труды МАИ. 2021. № 118. С. 12–25.
7. *Terry E.C.* US Patent 11319064B1, 2022.
8. *Журман Д.А., Афанасьев Н.А., Фадеев А.С.* Настройка ПИД-регулятора для БПЛА на базе микроконтроллера семейства Arduino // Молодежь и современное информационных технологии: Сб. тр. 16-й Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск: ТПУ, 2019. С. 267–268.

Поступила в редколлегию 23.01.26

A VERTICAL TAKE-OFF AND LANDING AIRCRAFT WITH SOFTWARE-CONTROLLED THRUST VECTORING

A.I. Valiev, I.L. Khisamiev, V.A. Milchakov, and R.I. Nizamutdinov

This work presents the concept of a small vertical take-off and landing aircraft in which the transition between flight modes is achieved solely through software-controlled redistribution of thrust from stationary electric motors. The scientific novelty of this work lies in the implementation of algorithmic control of the transition mode without the use of mechanical means to change the thrust vector, which reduces the weight of the structure and increases its reliability. The proposed design eliminates mechanical tilt mechanisms and complex transmissions, resulting in reduced structural weight, increased reliability, and lower power consumption during cruise flight. The architecture of the control system, the mode-transition algorithm, and the step-by-step prototype development process are described. The results demonstrate that software-based thrust management provides smooth transitions, high stability, and reduced energy losses compared to conventional VTOL configurations.

Keywords: VTOL, thrust redistribution, software-based control, fixed motors, transition algorithm, unmanned aerial vehicle, control system.

Валиев Алмаз Илсурович – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: tatcomposite@mail.ru

Хисамиев Ильяс Ленарович – магистр (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: ILKhisamiev@kai.ru

Мильчаков Василий Александрович – бакалавр (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: Hsg.shgkl@yandex.ru

Низамутдинов Расих Ильфатович – бакалавр (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: niza1997@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОЙ И ДУГОВОЙ СВАРКИ

А.Т. Габдрахманов, А.Т. Галиакбаров, Д.А. Башмаков, Р.Р. Рахимов

Проведены сравнительные исследования методов лазерной и дуговой сварки применительно к производству кронштейнов крепления радиатора. Установлено влияние выбранного способа сварки на структуру материала в зоне сварки, зону термического влияния и механические свойства изделия. Рассмотрены технологические особенности обоих методов, включая преимущества и ограничения, определяющие выбор оптимального подхода для конкретной производственной задачи. Результаты проведенных исследований установлена существенная роль режима сварки в формировании оптимальной микроструктуры и механических характеристик соединения.

Ключевые слова: лазерная сварка, дуговая сварка, зона термического влияния, сварные соединения, прочностные характеристики, микроструктура.

Сварочные технологии играют ключевую роль в различных отраслях – от автомобилестроения до аэрокосмической – и являются важным условием прогресса промышленного производства. По мере развития технологий формируются новые методы сварки, обеспечивающие повышение качества и производительность. Среди указанных методов особое место занимают лазерная и дуговая сварка, широко применяющиеся для создания прочных и надежных соединений.

Плазма дугового разряда является наиболее доступным и низкочувствительным источником тепловой энергии, а лазерное излучение отличается высокой концентрацией энергии и обеспечивает возможность локального воздействия, что предопределяет высокую производительность и прецизионность обработки.

Актуальность сравнительной характеристики изделий, полученных методами лазерной и дуговой сварки, обусловлена необходимостью выбора оптимального метода для конкретных производственных задач. Оба метода имеют свои преимущества и недостатки, которые влияют на качество, скорость и стоимость производства. Понимание особенностей каждого метода позволяет оптимизировать производственные процессы, повысить эффективность и снизить затраты.

В настоящее время наблюдается тенденция к расширению использования лазеров в качестве источников нагрева материала при сварке. В научной литературе описаны преимущества лазерных источников энергии, а также принципы и законы формирования сварочной ванны при лазерной сварке [1–4].

В работе представлены результаты исследования влияния режимов ручной лазерной сварки применительно к изготовлению деталей кронштейна крепления радиатора. Целью исследования является сравнение характеристик изделий, полученных методами лазерной сварки и дуговой сварки плавящимся электродом в среде смесей газов. Проведено подробное изучение структуры материала и зоны термического влияния образцов, что позволило оценить преимущества и недостатки каждого метода.

Процессы, происходящие в сварочной ванне, играют ключевую роль в формировании структуры металла сварного шва, зоны термического влияния и образовании дефектов (непровар, трещины и т. д.) [5–7].

Все процессы, происходящие в сварочной ванне и зоне термического влияния (нагрев, скорость охлаждения), оказывают влияние на прочностные характеристики изделий, используемых в различных отраслях промышленного производства [3, 8, 9].

В работах [10, 11] рассмотрено формирование макро- и микроструктуры сварного шва. Показано значительное влияние параметров сварки на структуру металла шва, а также определяющая роль скорости охлаждения и мощности лазерного излучения в формировании морфологии зерен и характера распределения фаз.

На свойства соединений после сварки влияет состав стали и наличие легирующих добавок [12, 13]. Исследования показывают, что после лазерной сварки и последующей термообработки сталь сохраняет высокую прочность и устойчивость к коррозии даже при низких температурах.

Для проведения экспериментов использовались образцы в виде пластин толщиной 4 мм из стали 08ПС. Перед сваркой кромки образцов зачищались для удаления оксидной пленки и обезжиривались ацетоном. Эксперименты проводились по схеме стыкового и таврового соединений в один проход.

Лазерную сварку выполняли на экспериментальной установке, созданной в лаборатории Набережно-челнинского института (филиала) КФУ. Основой установки являлся источник лазерного излучения производства фирмы IPG Photonics (Россия) (мощность – 1500 Вт, пиковая мощность – 2500 Вт, ширина шва до 5 мм, частота до 300 Гц). Для защиты зоны сварки от окисления использовался аргон, подаваемый через сопло. Плоскость фокусировки луча устанавливалась на поверхности свариваемых пластин. В ходе серии опытов варьировались два основных параметра – мощность лазерного излучения 950–1500 Вт и частота 22–60 Гц.

Дуговую сварку осуществляли с использованием экспериментальной установки, в состав которой входил полуавтоматический сварочный аппарат с подачей сварочной проволоки Golden Bridge JQ.MG 50-6 (СВ08Г2С) диаметром 1 мм и защитного газа в виде смеси (80 % аргона, 20 % углекислоты) под давлением 1,2 МПа. Сварка проводилась с двух сторон. В ходе серии опытов варьировались следующие основные параметры: сила сварочного тока – 128–129 А; напряжение дуги – 19,3 В; скорость подачи проволоки – 3,5 м/мин.

Сварка проводилась в непрерывном режиме. Для каждого сочетания параметров выполнялось не менее трех проходов для обеспечения статистической достоверности результатов.

После сварки образцы подвергались визуальному и металлографическому контролю. Для исследования макро- и микроструктуры из средней части шва вырезались поперечные шлифы. Образцы шлифовались на наждачной бумаге различной зернистости с последующей полировкой. Выявление структуры проводилось химическим травлением в азотной кислоте.

Измерение геометрических параметров шва (ширины шва на поверхности, глубины проплавления) и исследование микроструктуры выполняли с помощью оптического микроскопа Neophot-32 (Carl Zeiss, Германия) с использованием программного комплекса SIAMS 800 (ООО «Сиамс», Россия) для анализа изображений и определения структурных параметров.

Фиксация изображений осуществлялась с помощью цифровой камеры. Минимальная ширина шва после лазерной сварки для данного образца – 1,2 мм.

Продемонстрируем образцы из стали 08ПС толщиной 4 мм после дуговой (рис. 1, а) и лазерной (рис. 1, б) сварки.



Рис. 1

Для проведения лазерной (рис. 2, а) и дуговой (рис. 2, б) сварки в реальных условиях изготовлены образцы в виде кронштейнов крепления радиатора (сталь 08ПС).

На полученных образцах были проведены металлографические исследования.

Для исследования микроструктуры использовались срезы образца № 1 (рис. 3, а) и образца № 2 (рис. 3, б).

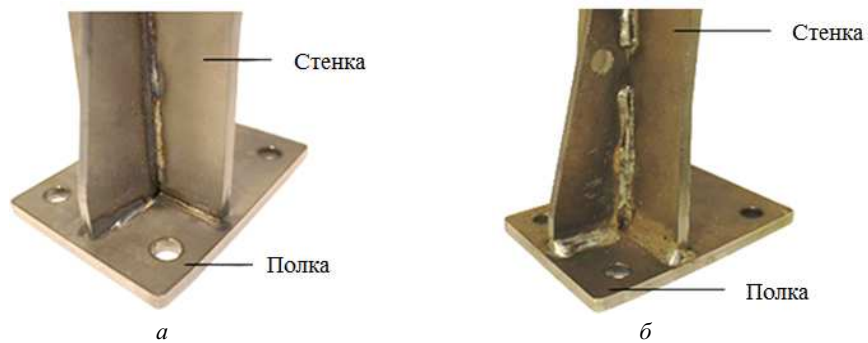


Рис. 2



Рис. 3

Приведем результаты исследования структуры материала шва с использованием различных методов, а также результаты механических испытаний. Для определения прочностных характеристик сварных соединений использовалась электромеханическая универсальная испытательная машина LFM-100 (Walter+Bai AG, Швейцария) [14, 15].

На рис. 5–7 показаны результаты сварки двух пар металлов. Зона термического влияния, образуемая при лазерной сварке, состоит из нескольких участков. Образцы, полученные лазерной сваркой, имеют специфичную структуру материалов в зоне сварки и зоне термического влияния.

Исходная микроструктура пластин (стенка и полка) состоит из полиэдрического феррита (Ф), небольшого количества пластинчатого перлита (П) и включений цементита (Ц) по границам зерен (рис. 4).



Рис. 4

Микроструктура нижней пластины (полка) более дисперсная (мелкая). Особенностью конструкции стало формирование мелкодисперсной (более мелкой) микроструктуры в нижней части образца.

Зона термического влияния характеризовалась наличием тростита (Т), тростосорбита (ТС), сорбита (С) и феррита. На рис. 5 представлена микроструктура переходной зоны от сварной ванны к зоне термического влияния, на рис. 6 – микроструктура основного металла.

В структуре сварного шва можно выделить зону, которая состоит из тростита, сорбита и феррита (рис. 7).

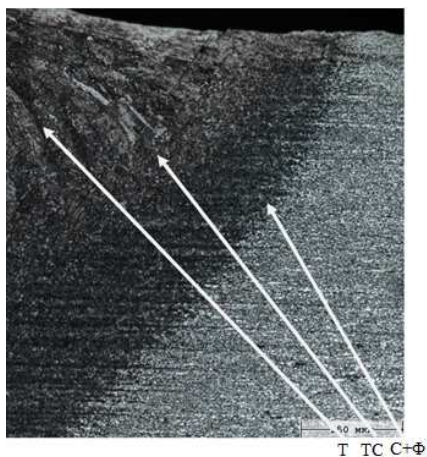


Рис. 5

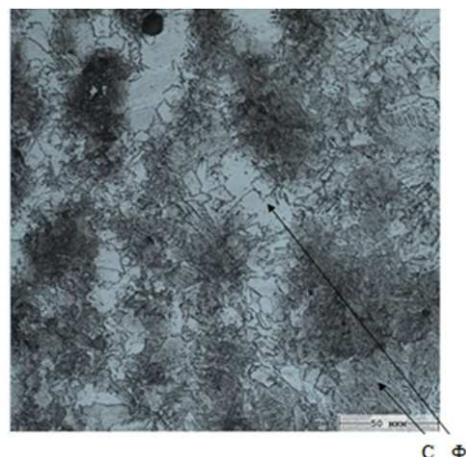


Рис. 6

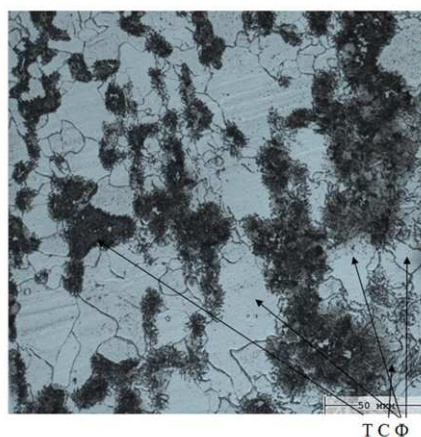


Рис. 7

Приведем результаты исследования структуры материала шва после дуговой сварки.

По результатам сварки двух пар металлов, сварной шов, образующийся при дуговой сварке, включает несколько характерных участков. Образцы имеют специфичную структуру материалов в зоне сварки (рис. 8) и зоне термического влияния, состоящей из тростосорбита, тростосорбита с ферритом полиэдрическим и тростита с ферритом осколочной формы – видманшетным (Фв) (рис. 9).

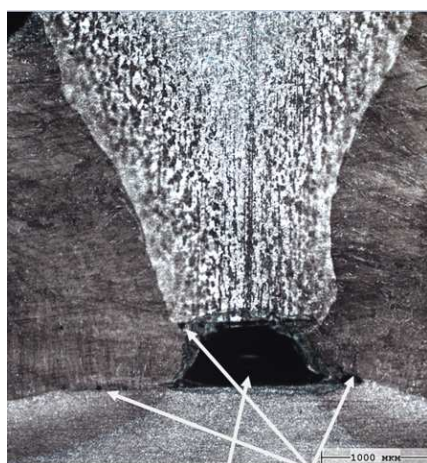


Рис. 8

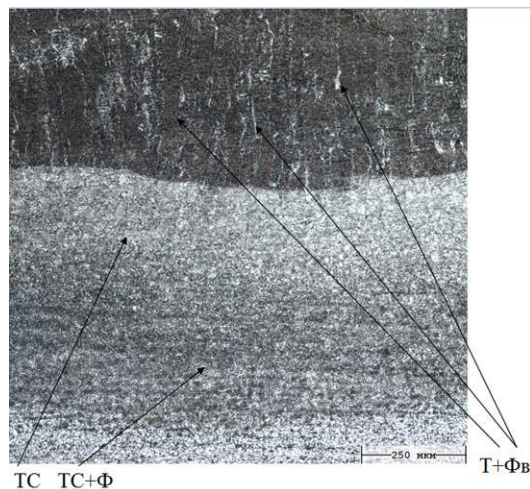


Рис. 9

В структуре сварного шва можно выделить зону, которая состоит из тростосорбита с включениями цементита (рис. 10).

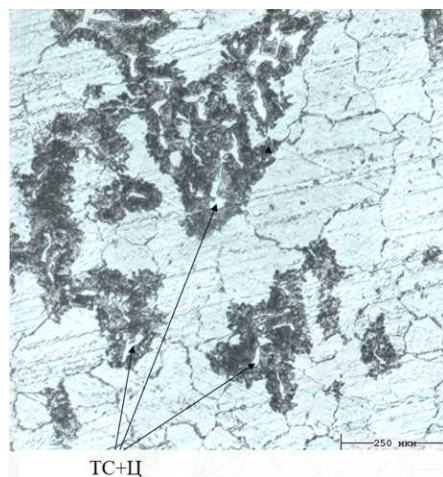


Рис. 10

На рис. 11 представлена часть зоны термического влияния.

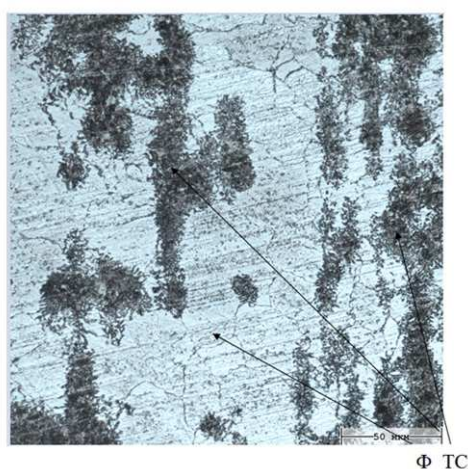


Рис. 11

Для определения прочностных характеристик сварных соединений были подготовлены образцы из стали 08ПС толщиной 4 мм. Образцы для испытаний на прочность изготавливались согласно ГОСТ 1497-84 из исходных листовых материалов и сваренных пластин. В образцах со сварными швами шов располагался в середине рабочей части перпендикулярно направлению приложенной силы.

Режимы сварки образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Номер образца	Тип сварки (один проход)	Тип прохода	Режим сварки
1	Дуговая сварка с подачей сварочной проволоки	С двух сторон	Сила сварочного тока – 128–129 А; напряжение дуги – 19,3 В; скорость подачи проволоки – 3,5 м/мин
2			
3			
4	Ручная лазерная сварка	С одной стороны	Мощность лазерного излучения – 1500 Вт; частота – 22 Гц; ширина шва – 1 мм
5		С двух сторон	Мощность лазерного излучения – 950 Вт; частота – 60 Гц; ширина шва – 0,5 мм
6			Мощность лазерного излучения – 1000 Вт; частота – 50 Гц; ширина шва – 1 мм
7		С одной стороны	Мощность лазерного излучения – 1400 Вт; частота – 25 Гц; ширина шва – 1,1 мм
8			Мощность лазерного излучения – 1450 Вт; частота – 30 Гц; ширина шва – 1,2 мм

Результаты механических испытаний на растяжение сварного соединения представлены в табл. 2, где также приведены значения разрушающей нагрузки сварных соединений, места разрушения и описание обнаруженных дефектов в результате механических испытаний на растяжение.

Таблица 2

Номер образца	Размеры поперечного сечения, мм	Разрушающая нагрузка, кг	Временное сопротивление, МПа	Место разрушения	Описание обнаруженных дефектов
1	19,8×4,0	2368	293	По шву	Разрушение хрупкое, непровар
2	19,8×4,0	2756	341	По основному металлу	Разрушение пластичное
3	19,8×4,0	2748	340		
4	19,8×4,0	2691	333		
5	19,8×4,0	2724	337		
6	19,8×4,0	2732	338		
7	19,8×4,0	2691	333		
8	19,8×4,0	2724	337		

Образец после механических испытаний, разрушенный по шву, представлен на рис. 12.



Рис. 12

Результаты механических испытаний свидетельствуют о том, что образцы, полученные лазерной сваркой (№ 4–8), демонстрируют разрушение по основному металлу при временном сопротивлении 333–338 МПа, что подтверждает высокий уровень прочности сварного соединения. В случае дуговой сварки лишь два образца из трех разрушились по основному металлу (341 и 340 МПа), тогда как один образец характеризовался разрушением по сварному шву с наличием дефекта в виде непровара, что отражает меньшую стабильность процесса формирования соединения.

Установлено, что зона термического влияния при лазерной сварке характеризуется формированием мелкодисперсной структуры с четкими границами участков. При дуговой сварке зона термического влияния имеет большую протяженность, а структура характеризуется наличием тростосорбита с ферритом осколочной формы (видманштетным), что свидетельствует о более длительном тепловом воздействии.

В швах, полученных лазерной сваркой, структура представлена троститом, сорбитом и ферритом с равномерным распределением фаз. При дуговой сварке в структуре шва преимущественно формируется тростосорбит с включениями цементита, что обусловлено более медленными скоростями нагрева и охлаждения.

Для лазерной сварки критически важны мощность излучения (950–1500 Вт) и частота (22–60 Гц). Увеличение мощности при фиксированной скорости повышает глубину проплавления, но может сопровождаться перегревом и нестабильностью канала проплавления.

Оптимальные параметры лазерной сварки (например, мощность излучения 1000 Вт и частота 50 Гц) обеспечивают равномерный шов с полным проплавлением стыка и минимальной зоной термического влияния.

Лазерная сварка позволила получить соединения без дефектов и без использования присадочной проволоки, обеспечивая минимальную зону термического влияния, что минимизирует деформацию металла и позволяет обрабатывать тонкие листы без прожогов. При этом скорость процесса в несколько раз выше, а последующая механическая обработка (шлифовка) часто не требуется.

По сравнению с дуговой лазерная сварка демонстрирует более высокие показатели качества и прочности соединения, стабильности процесса и степени минимизации деформаций. К числу преимуществ метода относятся реализация одностороннего прохода, формирование узкой зоны термического влияния и обеспечение высокой стабильности результатов.

Дуговая сварка сохраняет свою актуальность при формировании менее ответственных соединений ввиду доступности оборудования и простоты реализации. В ходе выполненных исследований в сварных швах, полученных дуговой сваркой, были выявлены такие дефекты, как непровар и пористость. Возникновение указанных дефектов, вероятно, обусловлено уровнем квалификации сварщика, качеством подготовки кромок, а также рядом других технологических факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисуров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 625 с.
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Чирков А.М. Гибридные технологии лазерной сварки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 68 с.
3. Никифоров Р.В., Муругова О.В. Анализ остаточных напряжений после сварки конструкций со сложной пространственной геометрией с криволинейными траекториями сварных швов // Молодежный вестник УГАТУ. 2020. № 1 (22). С. 109–111.
4. Рахимов Р.Р., Звездин В.В. Технологические особенности лазерной сварки металлических изделий // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2020. № 2 (85). С. 29–36.
5. Zvezdin V.V. et al. The Laser Heat-Treatment Process Control by the Non-Stationary Convective Heat Exchange Modeling // Proc. of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Dec. 4–6, 2019, Kazan, Russia. Article № 012059.
6. Rakhimov R.R., Saubanov R.R., Pesoshin V.A. Controlling Laser Welding Process Parameters to Reduce Spatter Defects // High Energy Chemistry. 2024. Vol. 58. № S2. P. S200–S203.
7. Zvezdin V.V. et al. Management of Laser Welding Based on Analysis Informative Signals // Proc. of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 240. Article № 012073.
8. Ельцов Р.И. Основные принципы лазерной сварки // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 43. С. 898–904.
9. Никифоров Р.В., Муругова О.В. Анализ остаточных напряжений после сварки конструкций со сложной пространственной геометрией с криволинейными траекториями сварных швов // Молодежный Вестник УГАТУ. 2020. № 1 (22). С. 109–111.
10. Иванова Т.Н., Муйземек А.Ю. Определение режимов послойной лазерной сварки пластин из коррозионно-стойкой стали // Изв. вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 1 (65). С. 159–170.
11. Макаручук Н.В., Макаручук А.В., Старцев В.Н. Моделирование формирования первичной макроструктуры сварного шва при лазерной сварке // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2022. № 2. С. 281–295.
12. Капуткина Л.М. и др. Лазерная сварка новых аустенитных криогенных коррозионно-стойких сталей, легированных азотом // Черные металлы. 2021. № 7. С. 56–62.
13. Галимов Э.Р., Беляев А.В. Влияние физико-химических процессов на качество сварных соединений // Строительные конструкции: состояние и перспективы развития: Материалы всерос. науч.-техн. конференции, посвященной 100-летию В.А. Карташова, г. Саранск, 6–7 марта 2019. Саранск: МГУ им. Н.П. Огарева, 2019. С. 113–117.
14. ГОСТ 6996-66 (ИСО 4136-89, ИСО 5173-81, ИСО 5177-81). Сварные соединения. Методы определения механических свойств. М.: Стандартинформ, 2006. 45 с.
15. ГОСТ 1497-2023. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Российский институт стандартизации, 2024. 54 с.

Поступила в редколлегию 26.02.2026

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF PRODUCTS OBTAINED BY LASER AND ARC WELDING METHODS

A.T. Gabdrakhmanov, A.T. Galiakbarov, D.A. Bashmakov, and R.R. Rakhimov

Comparative studies of laser and arc welding techniques were conducted for the manufacture of radiator mounting brackets. The effect of the chosen welding method on the material structure in the weld zone, heat-affected zone, and mechanical properties of the component was determined. The technological features of both methods were considered, including the advantages and limitations that determine the choice of the optimal approach for a specific manufacturing task. The results of the studies have shown the significance of the welding mode in forming the optimal structure and mechanical properties of the joint.

Ключевые слова: laser welding, arc welding, heat-affected zone, welded joints, strength characteristics, microstructure.

Габдрахманов Азат Талгатович – канд. техн. наук (КФУ, Казань)

E-mail: veyron000@mail.ru

Галиакбаров Азат Талгатович – канд. техн. наук (КФУ, Казань)

E-mail: azatgaliakbarov@yandex.ru

Башмаков Дмитрий Александрович – канд. техн. наук (КФУ, Казань)

E-mail: bashmakovda@yandex.ru

Рахимов Радик Рафисович – ст. преподаватель (КФУ, Казань)

E-mail: rafisih88@mail.ru

ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ ПЕН НА ОСНОВЕ ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ, ПРОДУКТОВ ИХ ОБРАБОТКИ И ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВ (ОБЗОР)

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

Проведен обзор традиционных и перспективных технологических процессов получения углеродных пен с комплексом заданных теплофизических и физико-механических свойств с использованием природного сырья и отходов различных производств. Обобщена информация о формируемой структуре и эксплуатационных свойствах углеродных пен при различных сочетаниях и соотношениях смесей исходных компонентов в виде связующих веществ, наполнителей и специальных добавок, а также режимных параметрах процессов их получения. Показаны области практического применения пен в различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: углеродные пены, технологии получения, природное органическое сырье, полимеры, пеки, наполнители, специальные добавки, отходы производств, термохимическая обработка, структура, свойства, применение.

В обширном классе углеродных материалов особое положение с точки зрения эффективности и перспектив практического использования в различных отраслях промышленности занимают углеродные пены. Отличительными особенностями данных материалов являются повышенный уровень общей пористости (60–70 %), высокие значения удельных прочностных характеристик, теплофизические свойства, поддающиеся регулированию в широком диапазоне, электропроводность, устойчивость к воздействию агрессивных сред [1–3]. Одной из основных особенностей углеродных пен является возможность целенаправленного регулирования пористой структуры и эксплуатационных свойств в ходе реализации технологического процесса подбором определенного сочетания и соотношения связующих веществ, наполнителей, специальных добавок, а также режимов термической обработки. Анализ научно-технической литературы в области технологии получения пен выявил актуальность разработки базовых технологических решений для создания углеродных материалов пенистой структуры с широким диапазоном значений коэффициента теплопроводности (теплопроводных, теплоизолирующих) и физико-механических показателей.

В настоящей статье проведен обзор научных публикаций российских и зарубежных исследователей, где рассмотрено получение углеродных пен с использованием в качестве исходных компонентов природного сырья, продуктов их обработки и отходов различных производств. Для сравнения представлены также результаты исследований, полученные при выполнении работы по теме «Разработка технологии получения изделий с заданными теплофизическими свойствами для работы в экстремальных условиях на основе углеродных пен» в соответствии с федеральной целевой программой «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.».

Технологии получения теплоизолирующих пен основаны на применении в качестве исходных материалов неграфитирующихся веществ в виде терморезистивных связующих (фенолоформальдегидных, мочевиноформальдегидных и др.), некоторых синтетических полимеров, отходов переработки древесного сырья и других веществ, которые в процессе высокотемпературной карбонизации образуют углерод турбостратной структуры, характеризующийся невысоким значением коэффициента теплопроводности (менее 10 Вт/м·К) [3].

Технологии получения теплопроводных пен с повышенными значениями теплопроводности (в диапазоне 10...180 Вт/м·К) основаны преимущественно на использовании в качестве связующих компонентов нефтяных и каменноугольных пеков, являющихся побочными продуктами переработки каменноугольного или нефтяного сырья [3]. Пеки представляют собой полутвердые аморфные вещества, состоящие из

смеси сложных органических веществ в виде ароматических и гетероциклических соединений, продуктов их полимеризации (насыщенные углеводороды, нафтеновые ароматические соединения, полярные ароматические соединения, асфальтены). В процессе термической обработки изотропных пеков в интервале температур 300...500 °С в инертной атмосфере образуется анизотропная жидкокристаллическая фаза (мезофаза), предшествующая стадиям коксования и графитации [3]. При получении пен с использованием мезофазных пеков пористость обеспечивается как за счет летучих компонентов, присутствующих в исходном пеке, так и за счет улетучивания растворителя.

Приведем результаты обзора литературных источников, в которых описаны технологии получения теплоизолирующих и теплопроводных углеродных пен с использованием в качестве исходных компонентов природного сырья, продуктов их обработки и отходов производств.

Получение пен карбонизацией наполненных микросферами полимеров основано на приготовлении смеси полимера с наполнителем, ее последующей карбонизации и постобработке (графитация, насыщение пироуглеродом, пропитка) с целью придания необходимых эксплуатационных свойств.

В работе [4] пены получали из фенолоформальдегидной смолы с добавлением ценосфер, которые являются продуктами отходов тепловых электростанций и представляют собой легкие полые тонкостенные микросферы диаметром 5...500 мкм, состоящие из диоксида кремния и оксида алюминия, заполненные воздухом, азотом и оксидом углерода. Содержание ценосфер меняли в пределах 10...40 мас. %. Показано, что увеличение количества ценосфер в композициях приводит к снижению теплопроводности, что обусловлено низкой плотностью и упорядоченной структурой углерод-ценосферного материала, а также повышенным содержанием пор.

Вспенивание органических веществ с высоким выходом углеродистых остатков является одной из наиболее распространенных технологий и основан на получении пен двумя способами.

Первый способ, как правило, используют при получении графитирующихся пен с высокой тепло- и электропроводностью непосредственным вспениванием пекового сырья при нагревании выше точки размягчения (200–300 °С) под давлением 1–10 МПа и длительной выдержке. Далее материал охлаждают до комнатной температуры и производят резкий сброс давления. Полученную «зеленую» пену в виде полуфабриката подвергают карбонизации при температуре около 1000 °С и графитации при температуре выше 2500 °С. Подобные технологии получения пен описаны в работах [5–7]. Основной вариант реализации способа приведен в работе [5], где показано, что на протекание процесса влияют многочисленные факторы: природа сырья и его состав (молекулярно-массовое распределение, групповой состав, наличие зародышей твердого углерода), режимы низкотемпературной карбонизации (давление, температура, время выдержки, время снятия давления), температура карбонизации и графитации, условия постобработки (режимы пиролитического уплотнения, механической обработки).

В работе [6] пены получали методом вспенивания раствора мезофазного пека в толуоле при температуре 320 °С и давлении 12 МПа. Полученный продукт представлял собой пену плотностью 0,4 г/см³ с порами размером 20–200 мкм. Показано, что при снижении содержания легких фракций в пеке (что достигалось предварительной экстракцией толуолом) величина общей пористости пен снижалась при одновременном уменьшении размеров пор.

Исследования, направленные на изучение влияния группового состава и точки размягчения исходных пеков на структуру и свойства графитированных пен на их основе, проведены в работе [7]. Установлено, что оптимальными с точки зрения получения теплопроводных высокографитированных пен являются мезофазообразующие пеки с низким содержанием нерастворимой фракции. Полученные пены отличались сравнительно низкой прочностью и высокими значениями коэффициента теплопроводности.

Второй способ основан на вспенивании углеродсодержащих веществ в присутствии порообразователей. В основе данного метода лежат реакции полимеризации или смешивания составляющих компонентов в среде летучего компонента, при удалении которого в процессе термообработки происходит формирование пористой структуры материала. Например, в работах [8–10] описаны способы формирования пористой структуры пен с использованием в качестве порообразователей различных соединений (хлорида натрия, нитрата алюминия, борной кислоты).

В работе [11] проводили вспенивание пека при атмосферном давлении и температуре 390 °С, используя в качестве порообразователя бариевую соль 5-фенилтетразолина с последующей стабилизацией при 250 °С и карбонизацией при 800 °С. После термообработки до 2400 °С получали хорошо графитированную и достаточно прочную пену (12 МПа при сжатии).

В работе [12] описана технология получения углеродных пен термообработкой прекурсора, состоящего из смесей каменноугольного пека и фурфурола (органического соединения, получаемого кислотной обработкой отходов сельскохозяйственного производства – соломы, шелухи и другого растительного сырья). Процесс вспенивания осуществлялся насыщением расплавленной реакционной смеси инертным газом (азотом) под высоким давлением (1-10 МПа). Нагрев смеси до конечной температуры проводился с поддержанием фиксированного давления в течение заданного времени с последующим быстрым сбросом давления для образования пузырьков с последующим охлаждением образцов до обычной температуры. Следующий этап стабилизации – нагревание образцов пены на воздухе до температуры 250 °С, чтобы структура не меняла форму во время роста пузыря. Быстрый сброс давления обеспечивает зарождение пузырьков, которые формируют пористую структуру пены в процессе затвердевания.

Новый усовершенствованный способ получения углеродной пены при термоокислительной обработке смесей каменноугольного пека и фурфурола описан в работе [13]. Смеси компонентов в разных соотношениях обрабатывали при температуре 120–200 °С концентрированной серной или азотной кислотами. Полученные после обработки твердые продукты нагревали при температуре 1000 °С в тигле в атмосфере азота. Отличительной особенностью способа является получение «зеленой» пены без использования давления и стадии дополнительной стабилизации. Показано, что структуру и свойства пены можно регулировать варьированием состава исходной смеси и типа используемой кислоты.

В работе [14] углеродные пены получали вспениванием и последующей карбонизацией мезофазных пеков с добавками аэрогеля оксида кремния (SiO₂), который представляет собой нанопористый аморфный материал с большой удельной поверхностью, низкой плотностью, повышенной пористостью и чрезвычайно малой теплопроводностью. Показано, что добавки аэрогеля способствуют образованию углеродных пен с меньшими размерами ячеек и повышенной пористостью (табл. 1).

Таблица 1

Образец	Средний размер пор, мкм	Пористость, %	Насыпная плотность, г/см ³	Прочность при сжатии, МПа	Теплопроводность, Вт/м·К
Пена без SiO ₂	162	61,2	0,58	10,85	0,33
5 % аэрогеля	121	64,5	0,60	11,47	0,31
8 % аэрогеля	137	66,1	0,61	12,72	0,30
11 % аэрогеля	131	67,0	0,61	10,21	0,30
14 % аэрогеля	127	65,2	0,64	9,15	0,31

Рассмотрим технологии получения пен прессованием терморасширенного графита. Терморасширенный графит является продуктом переработки природного графита [15]. Технология получения этого класса материалов основана на обработке природного графита серной кислотой с получением бисульфата графита, причем при сульфировании межслоевое расстояние в природном графите 0,3354 нм увеличивается до 0,95–1,05 нм и более. В результате нагревания этого соединения, как правило осуществляемого термоударом, происходит отщепление сульфат- и бисульфат-ионов в виде оксидов и кислот при сохранении увеличенного межплоскостного расстояния. Для получения углеродных пен на основе терморасширенного графита применяют прессование материала после термообработки (термоудара). Чаще всего бисульфат графита нагревают под давлением в закрытом объеме. Технология получения пен прессованием (500–800 °С, 2 мин) терморасширенного бисульфата графита с получением материалов плотностью 0,1–0,4 г/см³ и высоким коэффициентом теплопроводности описана в работе [16]. Показано, что в материале присутствует два вида пор – внутривчастичные поры в виде первичных вермикулярных агломератов и межчастичные поры. Установлено, что свойства пен существенно зависят от температуры терморасширения и размеров пор, причем размеры межчастичных пор зависят от давления, а размеры внутривчастичных пор – от степени восстановленности графита.

В связи с тенденцией к переходу на природное сырье и «зеленые технологии», а также вследствие того, что к наиболее перспективным областям применения углеродных пен относятся использование их в качестве монолитных адсорбентов, носителей катализаторов и пористых электродов, в последнее время все большее внимание уделяется разработке методов получения пен из сырьевых источников [17–21].

В работе [17] представлена технология синтеза углеродных пен на основе сахарозы, включающая нагревание ее кислого водного раствора до температуры 110 °С с последующей карбонизацией в атмосфере аргона в интервале температур 300...950 °С. Также описаны методы получения пен из смеси активированного угля с сахарозой: для этого предварительно измельченный на шаровой мельнице активированный уголь смешивали с кислым водным раствором сахарозы, после чего полученную композицию подвергали термообработке при 120 °С [18]. Кроме того, предложена технология переработки оливковых косточек, заключающаяся в их термообработке до 500 °С при давлении 1 МПа, что позволяет получать крупноячеистую пену с плотностью 0,2–0,3 г/см³ [19].

Высокопористая углеродная пена с низким удельным электрическим сопротивлением была получена прямой карбонизацией кожуры помело при температуре 900 °С. Рассмотрены также пены, полученные карбонизацией кокосового сырья, кожуры банана, арбуза и других органических веществ природного происхождения [20].

В работе [21] представлена технология получения теплоизолирующей углеродной пены на основе сахарного тростника. На первом этапе в процессе гидротермальной обработки из растительного сырья удаляли лигнин. Далее отожженный сахарный тростник погружали в оксид графена и пропитывали в вакууме. Полученную смесь подвергали высокотемпературной термической обработке, в результате чего формировалась пена с различным содержанием восстановленного оксида графена – 5; 11; 17 мас. %, обозначенных как rGO-1; rGO-2; rGO-3.

Теплофизические и физико-механические характеристики образцов пен представлены в табл. 2.

Таблица 2

Образец	Плотность, г/см ³	Теплопроводность, мВт/м·К	Электропроводность, См/см	Прочность на сжатие, МПа
rGO-1	0,041	103,73	4,3	1,23
rGO-2	0,044	111,10	5,4	1,28
rGO-3	0,047	115,19	6,0	1,33

Технология получения пен с низкой теплопроводностью из древесных опилок, являющихся отходами деревообрабатывающей промышленности, предложена в работе [22]. Опилки размером примерно 1 мм смешивали с раствором сахарозы различной концентрации (0–700 г/л) для получения суспензии. Суспензию опилок заливали в емкость из ПВХ, и раствор сахарозы отфильтровывался для консолидации частиц. Полученные образцы охлаждали в морозильной камере при –70 °С для замораживания раствора сахарозы. Кристаллы льда, образовавшиеся в замороженных образцах, удаляли сублимационной сушкой. Сублимированные образцы нагревали в сушильном шкафу при температуре 160 °С в течение 4 ч и затем подвергали карбонизации в печи с инертной атмосферой при температуре 900 °С в течение 2 ч. Плотность пен регулировали изменением концентрации раствора сахарозы. Пористость пен менялась в интервале 82,8...92,6 об. %.

В табл. 3 представлены эксплуатационные свойства пен SDC-X (где X – концентрация раствора сахарозы в граммах на литр). Повышенными значениями физико-механических и теплофизических свойств характеризуются углеродные пены марок SDC-600, SDC-700.

Для оценки структуры и эксплуатационных свойств углеродных пен проведены комплексные экспериментальные исследования, результаты которых изложены в опубликованных ранее работах [23–26].

В табл. 4 представлены обобщенные результаты исследований структуры, физико-механических, теплофизических и электрических свойств пен, полученных с использованием различных технологий.

Таблица 3

Образец	Плотность, г/см ³	Прочность на сжатие, МПа	Теплопроводность, Вт/м·К	Электропроводность, См/см	Максимальная рабочая температура на воздухе, °С
SDC-200	0,174	0,22	0,12	18,2	400
SDC-300	0,216	0,47	0,125	20,5	400
SDC-400	0,26	0,82	0,16	24,6	400
SDC-500	0,304	1,3	0,17	26,9	400
SDC-600	0,318	1,58	0,185	31,2	400
SDC-700	0,353	1,76	0,20	33,8	400

Таблица 4

Свойства	Пены на основе пеков и углеродных microsфер	Пены, полученные карбонизацией пеков под давлением	Пены, полученные с летучим порообразователем
Плотность, г/см ³	0,25–0,80	0,88–1,08	0,21–0,39
Пористость, %	69,5–89,0	51–60	82–91
Средний размер ячеек, мкм	150–300	250–300	15–20
Содержание углерода, мас. %	99,1	99,8	99,4
Предел прочности при сжатии, МПа	5,2–23,0	26–33	5,4–12,6
Предел прочности при разрыве, МПа	2,9–12,0	12–18	2,5–7,3
Твердость по Бринеллю, НВ	9–12	7,7–8,5	6,5–8,5
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	10–50	140–162	108–172
Коэффициент термического расширения, 10 ⁻⁶ К ⁻¹	2,5–4,0	3,1–5,0	2,3–3,5
Термическая устойчивость в инертной среде, °С	2790–2860	Более 2900	2820–2880
Термическая устойчивость на воздухе, °С	600–720	680–810	615–655
Удельное объемное электросопротивление, Ом·см	3·10 ⁻³ –2·10 ⁻²	7·10 ⁻⁵ –8·10 ⁻⁴	6·10 ⁻⁵ –9·10 ⁻⁴

Исследования структуры углеродных пен методом сканирующей электронной микроскопии позволили установить особенности процессов формирования пенистой структуры материалов, определяющих базовые свойства и преимущественные области их практического применения.

Пены, полученные на основе пеков и углеродных microsфер, представляют собой материалы пористой структуры со сферическими ячейками. Система является гетерогенной, материал стенок изотропен, связующий компонент четко текстурирован, имеет явно выраженную графитоподобную слоистую текстуру. Кажущуюся плотность пен можно регулировать, изменяя соотношение связующее (пеки) – наполнитель (microсферы). Прочность пен при сжатии и твердость закономерно снижаются с увеличением содержания microsфер, причем оптимальные значения этих параметров достигаются при содержании microsфер 40 % и менее. Пены имеют промежуточные значения коэффициента теплопроводности (10–50 Вт/м·К), что обеспечивает возможность их применения при изготовлении стационарных радиаторов пассивного охлаждения или экранов электромагнитного излучения.

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. Пены отличаются высокими значениями прочности при сжатии (26–33 МПа) и теплопроводности (140–162 Вт/м·К), в связи с чем возможно их применение для изготовления электродов и компонентов изделий авиакосмической техники. Вместе с тем их плотность имеет повышенные значения.

Пены, полученные карбонизацией пеков в присутствии летучего порообразователя, характеризуются сферической формой ячеек и малым разбросом по размерам, причем использование в качестве исходных компонентов специальных мезофазных пеков с добавлением мезофазных microsфер обеспечивает увеличение уровня совершенства графитовой структуры и эксплуатационных свойств. Пены имеют высокие значения теплопроводности (до 180 Вт/м·К), однако их физико-механические свойства сравнительно невысоки (прочность менее 10 МПа), что обусловлено особенностями их структуры, в том числе повышенной мелкой пористостью и высоким уровнем графитации. Углеродные пены данного класса с высокой теплопроводностью, открытой пористой структурой и низкой плотностью могут рассматривать-

ся в качестве перспективных материалов для систем тепловой защиты различных конструкций, систем управления температурным режимом, в солнечных батареях, теплообменниках и т. д.

Перспективы дальнейших исследований направлены на разработку технологий получения углеродных пен с использованием в качестве связующих дешевых и доступных компонентов природного происхождения в виде отходов различных производств. С этой точки зрения наибольший интерес представляют продукты химической переработки древесного сырья. На предприятиях целлюлозно-бумажной и гидролизной промышленности наряду с основной продукцией в виде побочного сырья образуются различные лигнинсодержащие соединения – технические лигнины [27–29].

Ежегодно в мире получают около 70–80 млн т лигнинов в виде неиспользуемых отходов. Основная масса их накапливается в отвалах, сжигается, выбрасывается в водоемы, что приводит к необратимым изменениям экологической ситуации. Лигнины представляют собой полимеры, макромолекулы которых образованы из нескольких различающихся фенилпропановых производных $C_6H_3(C_9)$. Многочисленные комбинации таких структурных блоков с многократно повторяющимися сочетаниями простых, сложноэфирных, углерод-углеродных, двойных и водородных связей способствуют формированию сетчатой структуры лигнинов, способных при высокотемпературной обработке подвергаться карбонизации и графитации. В связи с этим лигнины, представляющие собой многотоннажные и возобновляемые источники дешевого органического сырья, имеют значительный потенциал для применения в качестве исходных компонентов в технологии получения углеродных пен. В частности, они могут быть альтернативой широко используемым, но дорогостоящим фенолоформальдегидным связующим.

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 Академии наук РТ, 2022. 324 с.
4. Kumar R., Mondal D.P., Chaudhary A. Excellent EMI Shielding Performance and Thermal Insulating Properties in Lightweight Multifunctional Carbon-Cenosphere Composite Foams // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2018. Vol. 112. P. 475–484.
5. Klett J., McMillan A.D., Gallego N.C. Effects of Heat Treatment Conditions on the Thermal Properties of Mesophase Pitch-Derived Graphite Foams // Carbon. 2004. № 42. P. 1849–1852.
6. Li J., Wang C., Zhan L. Carbon Foams Prepared by Supercritical Foaming Method // Carbon. 2009. № 47. P. 1204–1206.
7. Yu L. et al. The Preparation and Properties of Novel Structural Carbon Foams Derived from Different Mesophase Pitches // Proc. of the 5th International Conference on Porous Media and Their Applications in Science, Engineering and Industry, June 22–27, 2014. Kona, USA. P. 1–6.
8. Wu X., Liu Y., Fang M. Preparation and Characterization of Carbon Foams Derived From aluminosilicate and Phenolic Resin // Carbon. 2011. № 49. P. 1782–1786.
9. Narasimman R., Vijayan S., Prabhakaran K. Carbon Foam with Microporous Cell Wall and Strut for CO₂ Capture // RSC Advances. 2014. № 4. P. 578–582.
10. Narasimman R., Vijayan S., Prabhakaran K. Preparation of Carbon Foams with Enhanced Oxidation Resistance by Foaming Maltodextrin Using a Boric Acid Blowing Agent // Carbon. 2013. № 55. P. 305–312.
11. Calvo M., Garcia R., Moinelo S.R. Carbon Foams from Different Coals // Energy Fuel. 2008. № 22. P. 3376–3383.
12. Inagaki M., Qiu J., Guo Q. Carbon Foam: Preparation and Application // Carbon. 2015. № 87. P. 128–152.
13. Stoycheva I., Tsyntarski B., Vasileva M. New Method for Synthesis of Carbon Foam on the Base of Mixture of Coal Tar Pitch and Furfural without Using Pressure and Stabilization Treatment // Diamond and Related Materials. 2020. Vol. 109. Article № 108066.
14. Bryning M.B., Milkie D.E., Islam M.F. Carbon Nanotube Aerogels // Advanced Materials. 2007. № 19. P. 661–664.
15. Матыгуллина Е.В. и др. Терморасширенный графит и композиционные материалы на его основе: технология получения, структура, свойства и применение. Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2019. 160 с.
16. Inagaki M., Toyoda M., Kang F. Pore Structure of Exfoliated Graphite // New Carbon Materials. 2003. № 18. P. 241–249.

17. *Jana P., Ganesan V.* Synthesis, Characterization and Radionuclide (¹³⁷Cs) Trapping Properties of a Carbon Foam // *Carbon*. 2009. № 47. P. 3001–3009.
18. *Narasimman R., Prabhakaran K.* Preparation of Carbonfoams by Thermo-Foaming of Activated Carbon Powderdispersions in an Aqueous Sucrose Resin // *Carbon*. 2012. № 50. P. 5583–5593.
19. *Rios R.V.R.A. et al.* Carbon Foam Prepared Bypyrolysis of Olive Stones under Steam // *Carbon*. 2006. № 44. P. 1448–1454.
20. *Moreno-Pirajan J.C., Giraldo L.* Study of Carbon Foams Synthesized by the Pyrolysisof Wastes Coconut Shells of African Palm at Different Conditions and Use of Immersion Calorimetry as a Tool for Characterization // *Oriental Journal of Chemistry*. 2013. Vol. 29. Iss. 3. P. 877–887.
21. *Wang L., Shi X., Zhang J.* Lightweight and Robust rGO/Sugarcane Derived Hybrid Carbon Foams with Outstanding EMI Shielding Performance // *Journal of Materials Science & Technology*. 2020. № 52. P. 119–12622.
22. *Chithra A., Wilson P., Vijayan S.* Carbon Foams with Low Thermal Conductivity and High EMI Shielding Effectiveness from Sawdust // *Industrial Crops and Products*. 2020. № 145. Article № 112076.
23. *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.
24. *Галимов Э.Р., Шарафутдинова Э.Э., Галимова Н.Я.* Структура и теплофизические свойства углеродных пен, полученных методом карбонизации пеков с летучим порообразователем // *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*. 2025. № 2. С. 28–30.
25. *Галимов Э.Р., Шарафутдинова Э.Э., Галимова Н.Я.* Технология получения и физико-механические свойства углеродных пен на основе пека и летучего порообразователя // *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*. 2025. № 1. С. 48–51.
26. *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.
27. *Решетов В.А. и др.* Физико-химические основы применения многокомпонентного природного и техногенного сырья в производстве функциональных композиционных материалов // *Изв. вузов. Строительство*. 2000. № 11. С. 32–39.
28. *Чудаков М.И.* Промышленное использование лигнина. М.: Лесная промышленность, 1983. 200 с.
29. *Любецкина Е.Г.* Лигнины как компонент полимерных композиционных материалов // *Успехи химии*. 1983. № 7. С. 1196–1224.

Поступила в редколлегию 24.02.26

PRODUCTION TECHNOLOGIES, STRUCTURE AND PROPERTIES OF CARBON FOAMS BASED ON NATURAL RAW MATERIALS, THEIR PROCESSING PRODUCTS AND INDUSTRIAL WASTE: A REVIEW

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

The review of traditional and promising technological processes for producing carbon foams with a set of specified thermophysical and physical-mechanical properties using natural raw materials and waste from various industries is conducted. The information on the formed structure and operational properties of carbon foams with various combinations and ratios of mixtures of initial components in the form of binders, fillers and special additives, as well as the process parameters of their production, is summarized. The areas of practical application of foams in various industries are shown.

Keywords: carbon foams, production technologies, natural organic raw materials, polymers, pitches, fillers, special additives, industrial waste, thermochemical 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 Назира 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

Галимов Рафаэль Ильдарович – студент (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: rafaelchampion@yandex.ru

АБРАЗИВНО-ЖИДКОСТНАЯ ДИАГНОСТИКА РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН: МЕТОДОЛОГИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

А.Л. Галиновский, В.С. Болдырев, М.А. Янко

Рассматривается актуальная проблема повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин, в частности дисков борон. Представлен метод абразивно-жидкостной ультразвуковой диагностики, позволяющий проводить экспресс-оценку эксплуатационных свойств биметаллических материалов. Показано, что данный метод обеспечивает имитацию абразивного воздействия почвы и может быть использован для оптимизации технологических параметров изготовления дисков. Приведены результаты теоретического и экспериментальных исследований, подтверждающие высокую корреляцию между расчетными геометрическими параметрами гидроэрозии и ее экспериментальными исследованиями.

Ключевые слова: ультразвуковая диагностика, абразивно-жидкостная струя, биметаллические диски, износостойкость, почвообрабатывающие машины.

Введение

Рабочие органы почвообрабатывающих машин – диски борон – подвергаются интенсивному абразивному износу в условиях контакта с почвой, что снижает их ресурс и увеличивает ремонтные затраты [1, 2]. Одним из перспективных направлений повышения износостойкости является применение биметаллических материалов, сочетающих высокую твердость рабочего слоя с вязкостью основы. Однако внедрение таких материалов требует разработки эффективных методов оперативной диагностики их эксплуатационных свойств. В рамках отработки технологического процесса нередко возникает необходимость в изготовлении партий опытных образцов, различающихся применяемыми технологическими режимами и типами материалов. Существующие методики оценки износостойкости характеризуются высокой трудоемкостью и продолжительностью испытаний, а также недостаточной репрезентативностью, поскольку не предусматривают имитационного моделирования реальных условий эксплуатации дисков бороны. Учитывая, что боронование почв, как правило, проводится в весенний и осенний периоды, можно заключить, что рабочий инструмент взаимодействует с влажной абразивной средой. В связи с этим актуальной задачей является разработка экспресс-методов, позволяющих имитировать условия абразивного воздействия и оперативно оценивать износостойкость материалов почвообрабатывающего инструмента.

Дисковые бороны и дискаторы предназначены для выполнения базовой машинной операции «дискования», после которой приступают к посевным работам [3–5]. Это, в свою очередь, способствует увеличению времени на посев растительных культур и в целом увеличению севооборота.

Диски для обработки почвы можно классифицировать по их размеру на три основные группы (табл. 1).

Таблица 1

Номер	Название группы дисков	Диаметр диска, мм	Нагрузка на диск, кг	Глубина обработки почвы, см
1	Легкие	450–510	60–90	До 10
2	Тяжелые	570–620	80–130	До 15
3	Сверхтяжелые	610–810	Больше или равно 140	до 25

Несмотря на различия в габаритных размерах дисков, механизм изнашивания лезвийной части является одинаковым для всех трех групп. Одним из преобладающих факторов является абразивность почвы, которая проявляется в износе поверхности рабочих органов сельскохозяйственной техники [6–8]. Степень изнашивающей способности почвы напрямую зависит от гранулометрического состава почвы. Так, у песчаных почв она максимальна, а у глинистых почв – минимальна. В связи с этим использование

абразивно-жидкостной струи с возможностью варьирования абразивных добавок в качестве инструмента для диагностики диска является наиболее целесообразным в качестве имитационного воздействия, т. е. близкого к реальным условиям эксплуатации.

Эволюция ультразвуковой диагностики и место абразивно-жидкостного метода

Ультразвуковая диагностика представляет собой группу методов, основанных на воздействии высокоскоростной струи жидкости на поверхность материала с последующей оценкой параметров гидроэрозии. В соответствии со схемой эволюции метода ультразвуковой диагностики (рис. 1) данный подход характеризуется множественностью направлений, в числе которых диагностика с использованием чистой водяной струи, водополимерной, абразивной, водоледающей, а также иных типов струй [9–13]. Экспериментально доказано, что массогеометрические параметры ультразвукового воздействия, в частности глубина гидрокаверны, имеет высокую корреляцию с физико-механическими и эксплуатационными свойствами диагностируемых материалов.

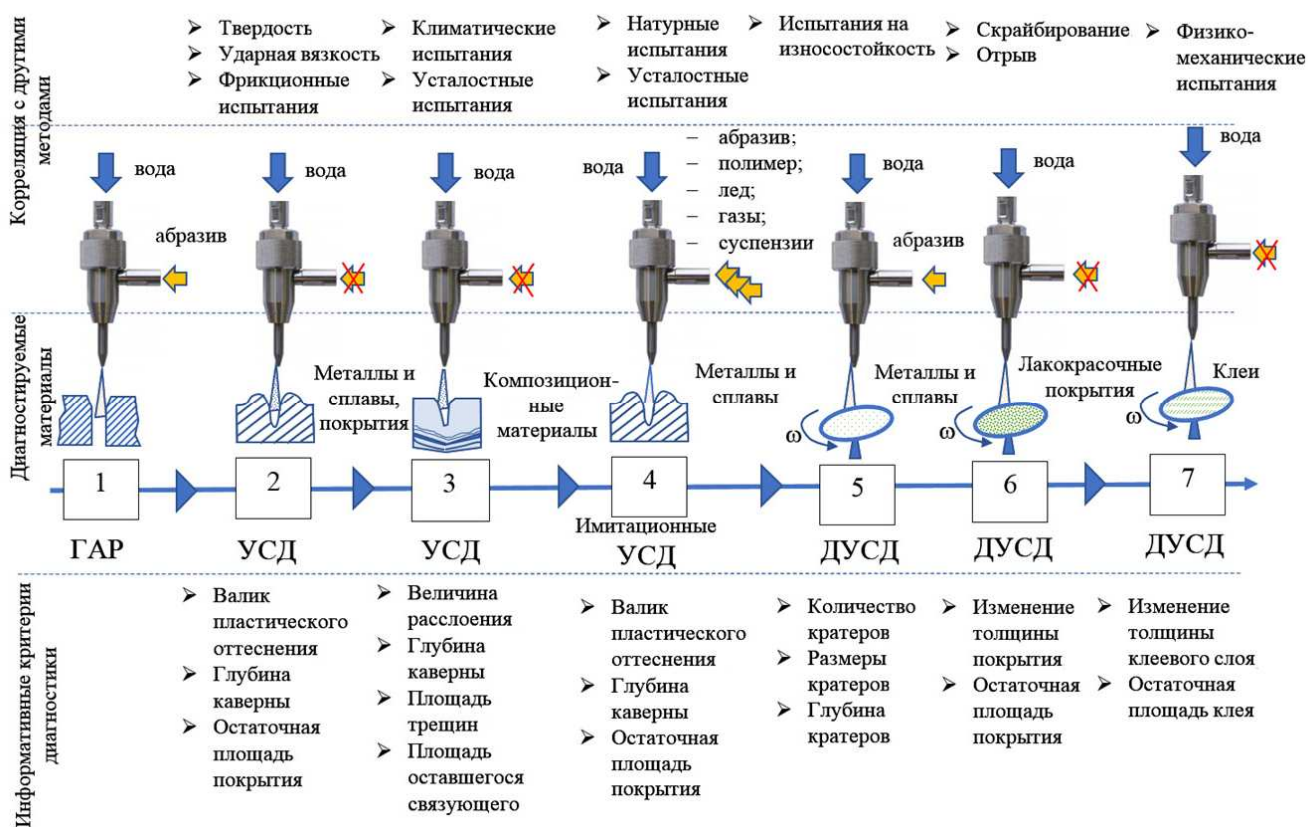


Рис. 1

Для диагностики рабочих органов сельскохозяйственных машин, работающих в условиях абразивного износа, наиболее перспективно применение абразивно-жидкостной ультразвуку. Данный метод предполагает использование струи, содержащей твердые абразивные частицы, близкие к составу почвы. Это особенно важно для имитации взаимодействия почвообрабатывающих орудий с грунтом во влажных климатических условиях, когда почва характеризуется повышенной плотностью и липкостью.

Методика абразивно-жидкостной диагностики

Абразивно-жидкостная ультразвуку в ходе экспериментов формировалась на установке для гидроабразивной резки материалов, например Flow Mach 3, с давлением до 400 МПа и скоростью порядка 600 м/с. В струю воды вводится абразивный материал (кварцевый песок, карбид кремния и др.) с заданной концентрацией. Воздействие такой струи на поверхность образца приводит к образованию гидрокаверны,

параметры которой (глубина, площадь, объем) являются информативными признаками для оценки износоустойчивости материала [14–16].

Процедура диагностики включает следующие этапы.

1. Подготовка образца (биметаллическая заготовка).
2. Воздействие абразивно-жидкостной струи в заданном режиме (давление, концентрация абразива, время).
3. Измерение параметров гидрокаверны с помощью оптического микроскопа или профилометра.
4. Сравнение полученных данных с эталонными значениями или результатами других методов испытаний.

Однако алгоритм именно в таком виде применяется только для диагностики плоских образцов. На практике зачастую возникает необходимость проведения диагностики поверхности готовых изделий с кривизной.

Схема реализации воздействия абразивно-жидкостной ультраструи на криволинейную поверхность объекта в форме сферического диска приведена на рис. 2. Здесь: 1 – диагностическая ультраструя; 2 – струеформирующая сопловая головка; 3 – прямолинейная траектория движения струеформирующей сопловой головки; 4 – диагностируемая криволинейная поверхность; $L(x)$ – текущее расстояние между срезом струеформирующей головки и точкой воздействия ультраструи на диагностируемый участок поверхности; $\alpha(x)$ – текущее значение угла ультраструи с диагностируемой поверхностью в точке их взаимодействия; n – n , τ – τ – направления нормали и касательной поверхности в точке ультраструйного диагностирования.

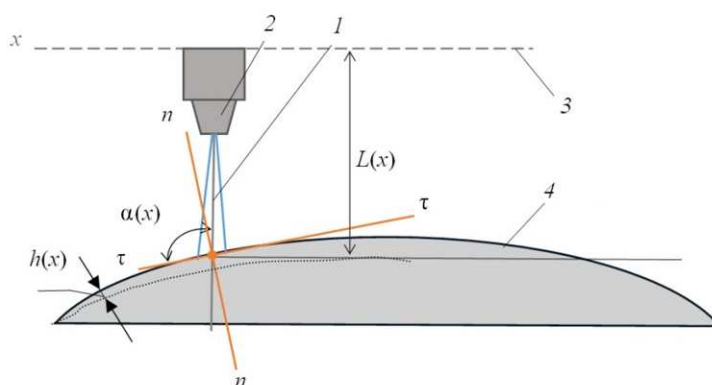


Рис. 2

В таком случае при воздействии абразивно-жидкостной ультраструи на криволинейную существенное дополнительное влияние на параметры локальной гидроэрозии оказывают изменения $L(x)$ и $\alpha(x)$, которые искажают результат определения физико-механических свойств и других характеристик поверхностного слоя.

Согласно работам [17, 18] в первом приближении при малых отклонениях параметров ΔL , $\Delta\alpha$ получим линейную математическую модель, описывающую их взаимосвязанность следующего вида:

$$\Delta h = \xi_S \Delta S + \xi_L \Delta L + \xi_\alpha \Delta \alpha,$$

где $\xi_S = \partial F / \partial S$; $\xi_L = \partial F / \partial L$; $\xi_\alpha = \partial F / \partial \alpha$ – коэффициенты влияния отклонений анализируемых параметров на изменение глубины гидрокаверны, а в общем случае – информативные признаки локальной ультраструи – эрозии поверхностного слоя в зоне абразивно-жидкостной ультраструи.

Таким образом, возникает задача, сводящаяся к экспериментальному определению коэффициентов влияния изменений угла α и расстояния L посредством проведения соответствующих исследований. Решить ее можно, целенаправленно поочередно варьируя ΔL , $\Delta\alpha$.

В табл. 2 приведены осредненные значения результатов экспериментов по определению данных коэффициентов влияния.

Параметры проведения установочных экспериментов	Уровень изменения параметров			Анализируемые отклонения параметров			Коэффициенты влияния отклонения
	максимальный	средний	минимальный				
$\alpha = \text{const}$ ($\alpha = \alpha_0 = \pi/2$) $L \rightarrow \text{var}$	Длина ультраструи L , мм			ΔL , мм			ξ_L , мкм/мм
	20	15	10	-5	0	5	
$L = \text{const}$ $L = L_0 = 20$ мм $\alpha \rightarrow \text{var}$	Глубина h , мкм			Δh , мкм			-3,4
	201	216	235	15	0	-19	
$L = \text{const}$ $L = L_0 = 20$ мм $\alpha \rightarrow \text{var}$	Наклон ультраструи α , град			$\Delta \alpha$			ξ_α , мкм/град
	100	90	75	-10	0	15	
$L = \text{const}$ $L = L_0 = 20$ мм $\alpha \rightarrow \text{var}$	Глубина h , мкм			Δh , мкм			-0,86
	206	220	225	14	0	-5	

Из полученных экспериментальных данных следует, что степени влияния отклонений в условиях реализации ультраструйной диагностики применительно к исследуемому материалу – стали марки 65Г – не являются близкими по своим значениям относительно друг друга. Более того, значительное отклонение коэффициента влияния изменения расстояния от значения коэффициента влияния изменения угла означает, что изменение расстояния L оказывает большее влияние на глубину гидрокаверны, чем изменение угла α .

Результаты эксперимента

Для экспериментальной проверки методики учета изменения геометрических параметров ультраструйного диагностирования были проведены прямые эксперименты по определению влияния радиуса кривизны объекта в форме сферического диска из материала 65Г на глубину формируемой поверхностной гидрокаверны.

Измерения образовавшейся в результате воздействия абразивно-жидкостной ультраструи каверны проводились с помощью профилографа-профилометра БВ-7669М, пример измерения которого показан на рис. 3.

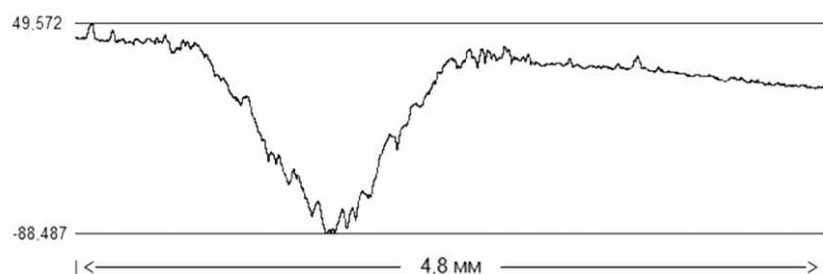


Рис. 3

В табл. 3 приведены результаты сравнения прямых экспериментов с расчетными значениями для различных уровней изменения L и α (см. рис. 2). Погрешность определялась отношением разности между расчетным и экспериментальным значением h , отнесенной к экспериментальной глубине гидрокаверны. Чем больше номер измерения, тем ближе точка измерения к периферий диска, и наоборот, чем меньше номер измерения – тем ближе к центральной части диска.

Анализ данных, представленных в табл. 3, позволяет заключить, что при малых величинах отклонений ΔL и $\Delta \alpha$ наблюдается приемлемая с инженерно-технологической точки зрения сходимость между расчетными и экспериментальными значениями. Данный факт подтверждает достоверность предлагаемой линеаризованной модели, учитывающей кривизну криволинейных поверхностей. Для повышения достоверности полученных результатов в случае расчета глубины каверны в точках 16–19 можно ввести поправочные коэффициенты K для каждой точки измерения или ввести для них единый коэффициент как среднестатистический из всех коэффициентов K (табл. 4). Значение поправочных коэффициентов рассчитывалось как отношение экспериментального результата к расчетному (теоретическому).

Таблица 3

Номер измерения	ΔL , мм	$\Delta \alpha$, град	Δh_p , мкм	$\Delta h_{\text{эсп}}$, мкм	Погрешность, %
1	0,00	0	215,00	215	0
2	1,31	7,9	203,71	205	0,63
3	2,77	8,8	197,95	201	1,52
4	4,40	9,7	191,65	195	1,72
5	6,18	10,6	184,81	187	1,17
6	8,12	11,4	177,51	180	1,38
7	10,23	12,3	169,57	175	3,10
8	12,50	13,2	161,08	167	3,55
9	14,93	14,1	152,02	160	4,99
10	17,53	15,0	142,40	157	9,30
11	20,30	15,9	132,20	145	8,83
12	23,24	16,9	121,32	138	12,08
13	26,36	17,8	109,95	120	8,38
14	29,65	18,7	97,97	107	8,44
15	33,13	19,6	85,38	95	10,12
16	36,78	20,5	72,18	83	13,04
17	40,62	21,5	58,25	69	15,58
18	44,65	22,4	43,77	55	20,43
19	48,88	23,4	28,54	38	24,90

Таблица 4

Значения поправочных коэффициентов	Номер измерения (согласно табл. 3)			
	16	17	18	19
Поправочный коэффициент K	1,15	1,18	1,26	1,33
Среднее значение поправочного коэффициента для измерений $K_{\text{ср}}$	1,23			

Разработанный метод позволяет сократить время испытаний с нескольких часов до нескольких секунд, оценить износостойкость на этапе технологической подготовки производства, повысить надежность и ресурс дисков борон.

Заключение

На основании результатов экспериментальных исследований установлено, что при диагностировании выпуклой поверхности диска бороны, выполненного из стали 65Г, степень влияния изменения расстояния между струеформирующей головкой и касательной поверхностью в точке их взаимодействия превышает степень влияния изменения угла между осью струи и указанной касательной поверхностью в той же точке.

При небольших отклонениях ΔL , $\Delta \alpha$, а именно для первых десяти измерений (см. табл. 3), наблюдается высокая инженерно-технологическая степень соответствия между расчетными и экспериментальными данными (максимальная погрешность – 9,30 %), что подтверждает достоверность предлагаемой линейной модели учета кривизны при диагностике с помощью воздействия абразивно-жидкостной ультраструи на криволинейные поверхности.

Абразивно-жидкостная ультраструйная диагностика может стать эффективным инструментом для экспресс-оценки износостойкости рабочих органов сельскохозяйственных машин. Метод обеспечивает имитацию реальных условий эксплуатации и позволяет оперативно корректировать технологические параметры изготовления почвообрабатывающих органов.

В числе основных направлений развития полученных результатов в области диагностики различных объектов с применением абразивно-жидкостной ультраструи следует выделить следующие.

1. Разработка методически алгоритмизированного программно-математического обеспечения, предназначенного для решения задачи учета изменения угла α и расстояния L , а также внедрение допол-

нительного информационно-диагностического сопровождения операций абразивно-жидкостной ультразвуковой диагностики материалов и изделий, в частности, с использованием метода акустической эмиссии.

2. Обеспечение на базе многокоординатного оборудования с ЧПУ целенаправленного варьирования параметров L , α с целью расширения информационно-технологических возможностей ультразвуковой диагностики структурно-неоднородных материалов, таких, как композиционные материалы, функциональные покрытия и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Симон Д.В. Эксплуатационные методы повышения надежности сельскохозяйственной техники // Вестник Донского государственного технического университета. 2015. № 4 (83). С. 130–136.
2. Бабенко Д.Е., Бондарь В.И. Ремонт и обслуживание дисковой бороны БДТ-3 // Материалы всерос. (нац.) науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвященной 110-летию со дня рождения И.С. Кауричева, г. Калуга, 14 дек. 2023. Калуга: ИП Якунина В.А., 2024. Т. 1. С. 15–19.
3. Popov V.V., Polyakov S.S., Prokhorov A.V. Ways of Modernization of Russian-Made Disc Harrows // The World of Science without Borders: Proc. of the 11th All-Russian Scientific and Practical Conference for Young Researchers with International Participation, April 26, 2024, Tambov, Russia. P. 112–114.
4. Коновалов В.И. Сравнительная агротехническая оценка дисковых орудий // Современные векторы развития науки: Сб. ст. по материалам ежегодной науч.-практ. конф. преподавателей по итогам НИР за 2023 г., г. Краснодар, 6 фев. 2024. Краснодар: КубГАУ, 2024. С. 312–314.
5. Хасанов М.М., Артемов Н.Н. Основные проблемы и перспективы развития сельского хозяйства Российской Федерации // Московский экономический журнал [Электронный журнал]. 2021. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-problemy-i-perspektivy-razvitiya-selskogo-hozyaystva-rossiyskoy-federatsii> (дата обращения: 6.01.2026).
6. Бандурина И.П., Черепухин Т.Ю., Берлина С.Л. Эффективность внедрения прогрессивных технологий в растениеводстве // Журнал прикладных исследований [Электронный журнал]. 2025. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-vnedreniya-progressivnyh-tehnologiy-v-rastenievodstve> (дата обращения: 6.01.2026).
7. Орипов Г., Хожиматов А.А. Исследование влияния агрессивных сред на содержание современной сельскохозяйственной техники // Universum: технические науки [Электронный журнал]. 2020. № 11-1 (80). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-agressivnyh-sred-na-soderzhanie-sovremennoy-selskohozyaystvennoy-tehniki> (дата обращения: 6.01.2026).
8. Износ деталей сельскохозяйственных машин / Под ред. М.М. Севернова. Л.: Колос, 1972. 288 с.
9. Барзов А.А. и др. Диагностика и прогнозирование качества инноваций (на примере ультразвуковых гидрофизических технологий). Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2019. 328 с.
10. Галиновский А.Л. и др. Применение методики ультразвуковой диагностики в анализе износостойкости лакокрасочных покрытий авиационной техники // Изв. вузов. Машиностроение. 2025. № 12 (789). С. 62–71.
11. Ключников М.В. и др. Моделирование процесса ультразвуковой абразивной диагностики // Технология металлов. 2022. № 11. С. 48–58.
12. Галиновский А.Л. и др. Перспективная конструкция и технология диагностики инструмента для утилизации композитов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 4-2 (342). С. 23–32.
13. Круглов П.В. и др. Анализ эффективности использования ледяной фракции в качестве абразива для ультразвукового резания металлических и композиционных // 48-е Академические чтения по космонавтике: Сб. тез., посвященных памяти акад. С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства, г. Москва, 23–26 янв. 2024. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. С. 24–26.
14. Галиновский А.Л., Янко М.А., Абашии М.И. Разработка метода имитационных испытаний биметаллических образцов материала диска бороновального агрегата // Технология металлов. 2025. № 12. С. 30–35.
15. Прохорова М.А., Белов В.А., Радаева В.Д. Анализ возможностей применения метода ультразвуковой диагностики для контроля качества сложнопрофильных деталей ракетно-космической техники // Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста: Материалы 2-й Всерос. науч.-практ. конф., г. Москва, 23 апр. 2019. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. С. 180–184.
16. Янко М.А., Виноградова И.К. Обеспечение точности изготовления деталей с учетом масштабного фактора // Гагаринские чтения – 2023: Сб. тез. докл. 49-й Междунар. молодеж. науч. конф., г. Москва, 11–14 апр. 2023. М.: Перо, 2023. С. 456–457.

17. Барзов А.А. и др. Моделирование и анализ механизмов гидроэрозии при изменяющихся условиях ультраструйного воздействия // Технологии разработки и отладки сложных технических систем: Сб. тр. 7-й Всерос. науч.-практ. конф., г. Москва, 1–2 апр. 2020. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. С. 27–32.
18. Yanko M.A., Dolgikh A.I., Vinogradova I.K. Ultra-Jet Diagnostics Experimental Verification of the Material Surface Layer as a Part of Object's Complex Profile // Science, Engineering and Business: Proc. of the 5th Interacademic Conference for Graduate Students and Young Researchers, April 18–19, 2023, Moscow, Russia. P. 206–212.

Поступила в редколлегию 6.02.26

ABRASIVE-LIQUID DIAGNOSTICS OF WORKING PARTS OF AGRICULTURAL MACHINERY: METHODOLOGY AND APPLICATION PROSPECTS

A.L. Galinovskii, V.S. Boldyrev, and M.A. Yanko

The article examines the current problem of increasing the wear resistance of working parts of tillage machines, in particular harrow discs. A method of abrasive-liquid ultra-jet diagnostics is presented, which allows for rapid assessment of the performance properties of bimetallic materials. It is shown that this method provides imitation of the abrasive effect of soil and can be used to optimize the technological parameters of disk manufacturing. The results of theoretical and experimental studies are presented, confirming the high correlation between the calculated geometric parameters of hydroerosion and its experimental studies.

Keywords: ultra-jet diagnostics, abrasive-liquid jet, bimetallic discs, wear resistance, tillage machines.

Галиновский Андрей Леонидович – д-р техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)
E-mail: a_galinovskiy@bmstu.ru

Болдырев Вениамин Станиславович – канд. техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)
E-mail: boldyrev.v.s@bmstu.ru

Янко Мария Алексеевна – ассистент (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)
E-mail: yanko@bmstu.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОЙ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УГЛА УСТАНОВКИ СОПЛОВОГО АППАРАТА И ПОСТОЯННОМ ПЕРЕПАДЕ ДАВЛЕНИЯ

В.М. Гуреев, В.А. Футин, А.В. Сидоров, Р.Ф. Шарафеев, М.В. Чучкалов

Приведена методика получения параметров силовой турбины с использованием методов создания трехмерной геометрической модели и численного термогазодинамического расчета исследуемого объекта. Выполнен анализ полученных результатов расчета и представлено заключение о расчетных параметрах силовой турбины, которые можно реализовать на объекте эксплуатации.

Ключевые слова: силовая свободная турбина, регулируемый сопловой аппарат, рабочее колесо, сопловая лопатка, рабочая лопатка, проточная часть.

В процессе эксплуатации компрессорных станций магистральных газопроводов в условиях снижения потребления природного газа и диспетчеризации, направленной на увеличение ресурса оборудования, газоперекачивающие агрегаты с газотурбинным приводом значительную часть времени работают на нерасчетных режимах – с пониженной степенью повышения давления центробежных нагнетателей.

В данной работе рассматривается газоперекачивающий агрегат типа ГТК-25ИР с газотурбинным двигателем (ГТД) General Electric M5322(B), работающий на нерасчетных режимах с пониженной полезной мощностью и частотой вращения ротора силовой турбины. ГТД имеет термодинамический цикл с регенерацией теплоты. Регулирование мощности и частоты вращения на валу силовой турбины осуществляется поворотом лопаток соплового аппарата, т. е. изменяется угол выхода сопловой лопатки в процессе работы ГТД. Было сделано предположение, что введение дополнительного регулирования частоты вращения в системе силовая турбина – центробежный нагнетатель может привести к повышению КПД ГТД [1]. Однако для обоснования данного предположения отсутствуют необходимые зависимости параметров от угла установки сопловых лопаток силовой турбины. В связи с этим была поставлена задача получения необходимых параметров силовой турбины методом численного моделирования термогазодинамических процессов, происходящих в проточной части турбины, и оценки возможности применения ее дополнительного регулирования.

Силовая свободная турбина ГТД General Electric M5322(B) для более детального изучения была подвергнута трехмерному сканированию при помощи ручного сканера Artec Eva Spider. Для разработки твердотельной модели проточной части корпуса ГТД использовались файлы облака точек в формате *.stl.

Внешний вид облака точек рабочей лопатки показан на рис. 1, а, сопловой лопатки – на рис. 1, б.

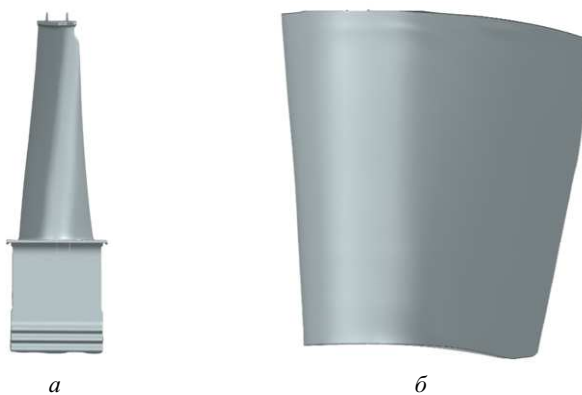


Рис. 1

Исходное облако точек не является непосредственно пригодным для использования в программах численного моделирования, что обуславливает необходимость построения на его основе твердотельной

геометрической модели. Некоторые программы предоставляют функционал для автоматизированного создания твердого тела, тем не менее вследствие специфики процесса сканирования получаемые таким образом модели характеризуются низким качеством геометрии, проявляющимся в виде выраженной шероховатости поверхностей и артефактов (рис. 2).



Рис. 2

Для обработки использовалось программное обеспечение Geomagic Design X, позволяющее конвертировать облака точек в модели САПР с геометрической параметризацией [2].

Приведем обработанные твердотельные модели рабочей (рис. 3, *a*) и сопловой (рис. 3, *б*) лопаток с математически описанными линиями и поверхностями.

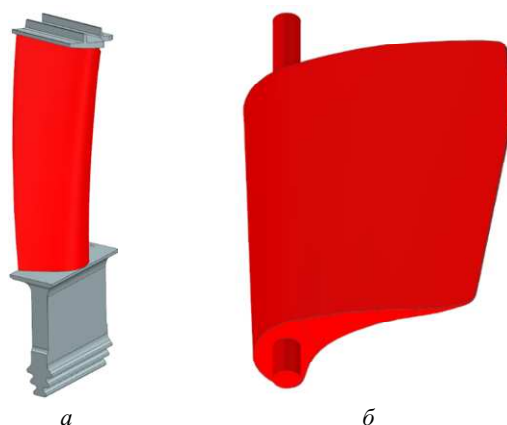


Рис. 3

С использованием полученного в результате трехмерного сканирования облака точек поверхностей сопловой и рабочей лопаток турбины, а также геометрических размеров, измеренных на реальном объекте, построена трехмерная модель проточной части без учета утечек и перетечек рабочего колеса.

Расчетная область проточной части силовой турбины представляет собой замкнутую твердотельную область, в которой течет поток продуктов сгорания с момента входа на лопатки и до выхода из турбинного колеса, включая дополнительные области, в начале и в конце расчетной области для выравнивая потока в численном эксперименте. При построении расчетной области геометрия сопловых и рабочих лопаток воспроизведена с соблюдением реальных размеров, соответствующих конструкции двигателя.

Расчетная область показана на рис. 4: *a* – внешний вид; *б* – сечение на среднем радиусе.

Разбивка расчетной области силовой турбины на конечные объемы выполнялась с помощью сеточного генератора ANSYS Mesh в ANSYS Workbench. Конечно-объемная модель включала две подобласти, соответствующие ротору и статору. В зоне их сопряжения расчетные сетки подобластей были соединены посредством интерфейса типа Frozen Rotor.

Приведем основные характеристики гибридной конечно-объемной модели, состоящей из тетраэдров и призматических пограничных слоев. Пристеночные области описывались призматическими элемента-

ми, имеющими пять слоев с коэффициентом роста 1,3. Для корректного описания расчетной области конечными объемами в зонах с минимальными геометрическими размерами выполнялись локальные сгущения [3].

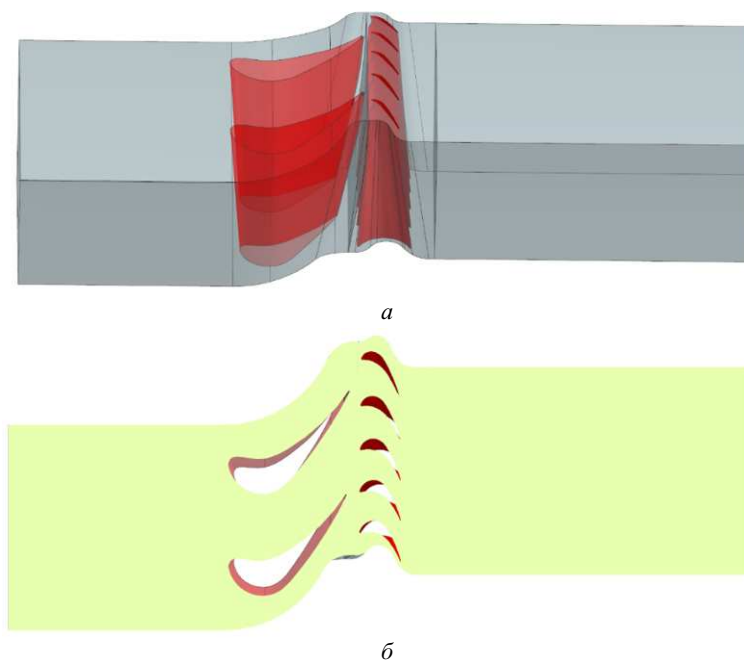


Рис. 4

Конечно-элементная модель силовой турбины содержит 6,2 млн элементов. Максимальный размер элемента составляет 3 мм, минимальный – 0,5 мм, что обусловлено необходимостью корректного описания особенностей геометрии исследуемой конструкции (рис. 5).

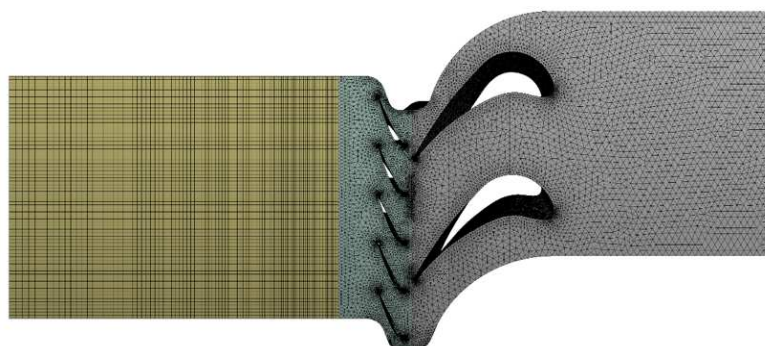


Рис. 5

Пограничные слои и сгущение в области с минимальными геометрическими размерами каналов показаны на рис. 6.

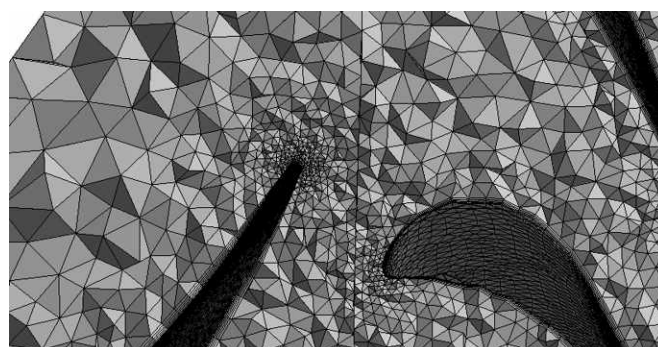


Рис. 6

Для определения параметров продуктов сгорания на входе и выходе силовой турбины выполнен одномерный термогазодинамический расчет ГТД газоперекачивающего агрегата типа ГТК-25ИР. С использованием трехмерной модели проточной части силовой турбины и параметров газа подготовлены трехмерные расчетные области проточной части с углами выхода сопловых лопаток на среднем радиусе $\alpha_{1л} = 30, 26, 22, 18, 14^\circ$.

Расчетная модель разрабатывалась в программном комплексе ANSYS CFX Pre и включала кроме конечно-объемной модели силовой турбины граничные условия, модели турбулентности, настройки решателя (рис. 7).

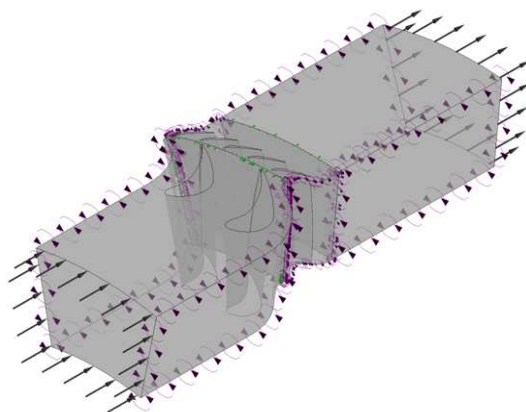


Рис. 7

Расчетная модель характеризуется следующими граничными условиями [4].

Теплофизические параметры рабочего тела заданы в зависимости от его температуры. На входе в силовую турбину задано полное давление $p_0^* = 209823$ Па и температура $T_0^* = 932,8$ К. Частота вращения ротора силовой турбины принята $n = 3000, 3400, 3800, 4200, 4670, 4309$ об/мин для каждого положения сопловой лопатки, что соответствует рабочему диапазону частот вращения ротора силовой турбины в реальном ГТД. На выходе из силовой турбины задано статическое давление $p_t = 98291$ Па. Модель турбулентности – SST. В данном случае использовалась усовершенствованная разновидность $k-\omega$ -модели – Standart с Scaleble пристеночной функцией, – с помощью которой получены наилучшие результаты в аналогичных условиях [5]. На боковых стенках расчетной модели, граничащих с другими секторами проточной части силовой турбины, задано условие симметричности. Тип интерфейсов при передаче параметров потока между расчетными сетками – GGI.

Далее запускался решатель ANSYS CFX, и при достижении сходимости процесса расчета выполнялась запись результатов расчета.

Для каждого режима работы силовой турбины, определяемого положением сопловых лопаток и частотой вращения ротора, определяли параметры – давление, температуру, крутящий момент на валу и массовый расход продуктов сгорания на входе и выходе силовой турбины.

Приведем распределения скоростей (рис. 8) и давлений (рис. 9) в сечении на среднем радиусе силовой турбины ($n = 3000$ об/мин) при различных углах установки сопловой лопатки: $a - 10^\circ$; $b - 14^\circ$; $c - 18^\circ$; $d - 22^\circ$; $e - 26^\circ$; $e - 30^\circ$.

Однако большой интерес представляют интегральные параметры силовой турбины, например зависимость мощности, кпд от частоты вращения и угла выхода сопловых лопаток. С использованием результатов расчета определены мощность на валу и кпд силовой турбины (рис. 10).

Изменение мощности и кпд силовой турбины в зависимости от частоты вращения и угла выхода соплового аппарата показывает (см. рис. 10), что максимальная мощность достигается при угле выхода сопловых лопаток $22-23^\circ$ и частоте вращения 4900 об/мин. При этом кпд (максимальный) составляет 79% . Уменьшение мощности и частоты вращения обеспечивается снижением угла выхода сопловых лопаток, так как при этом увеличивается кпд.

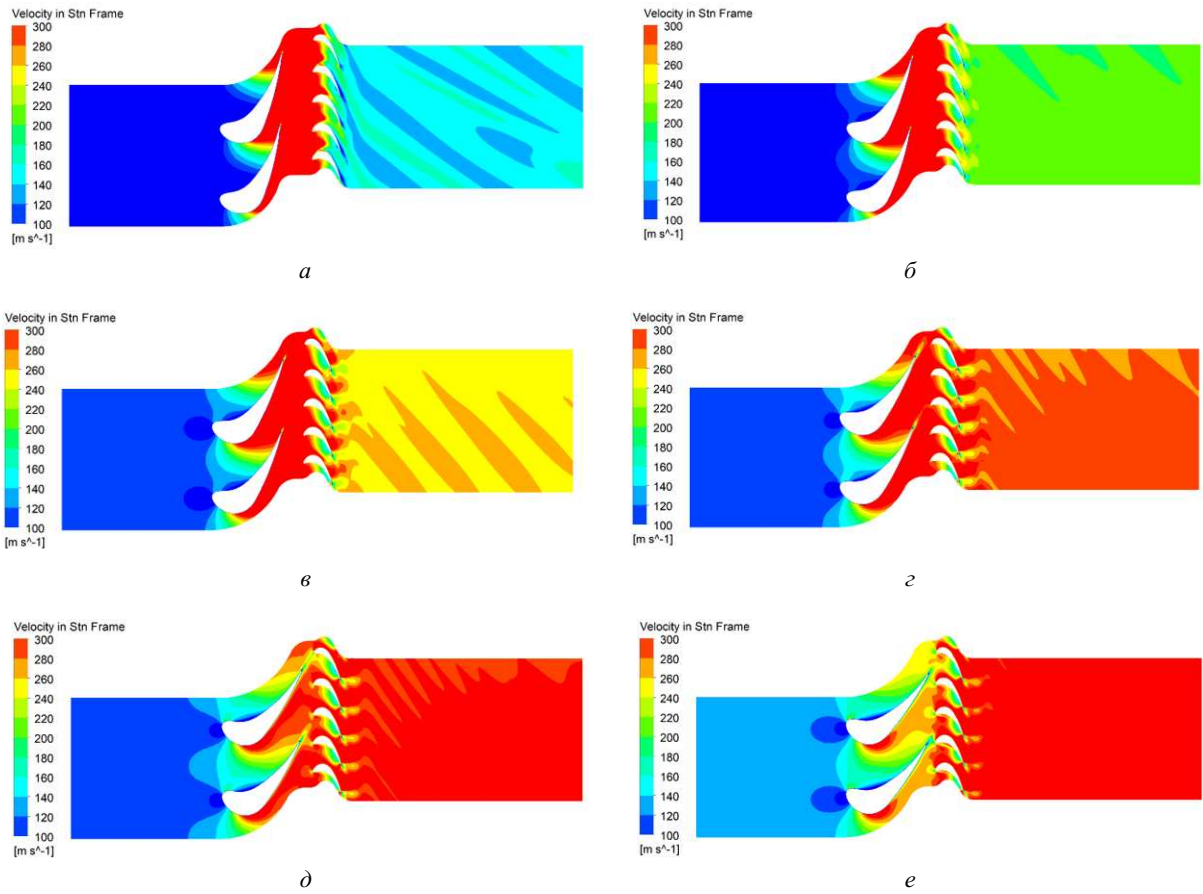


Рис. 8

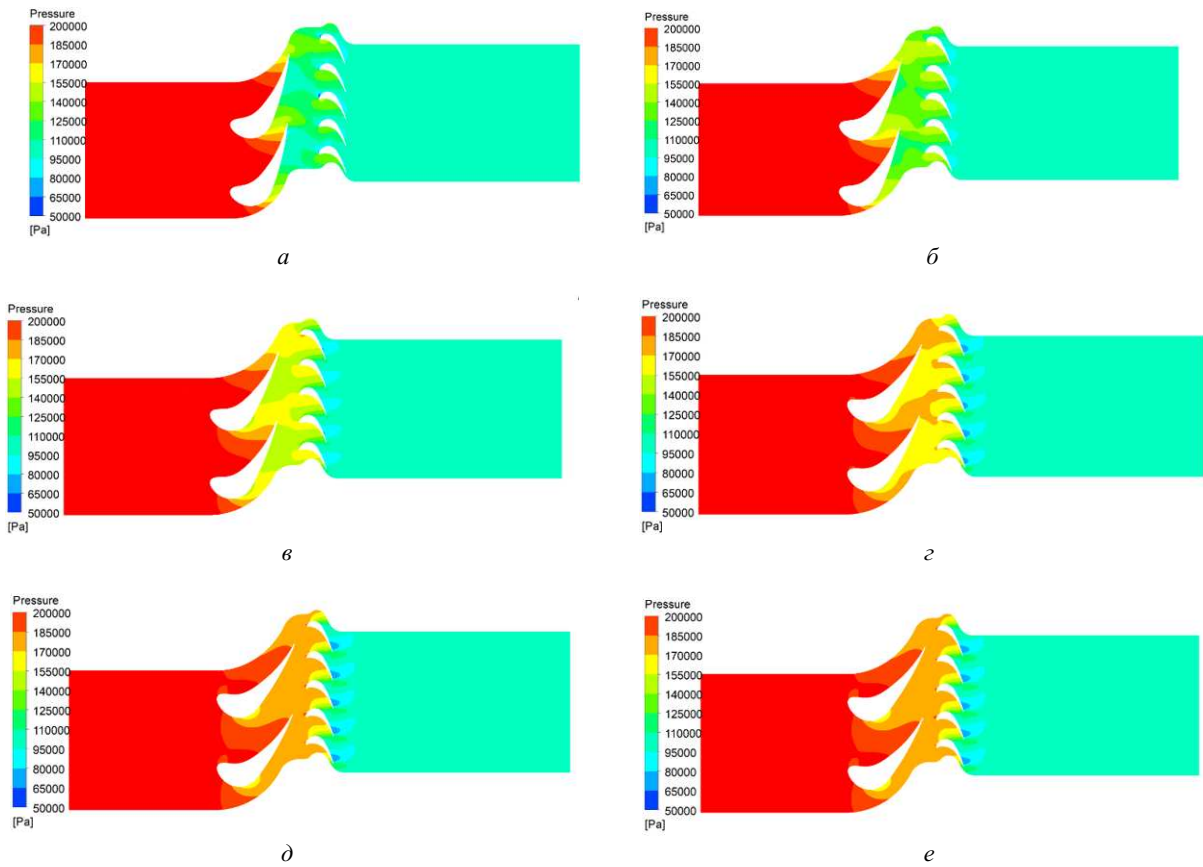


Рис. 9

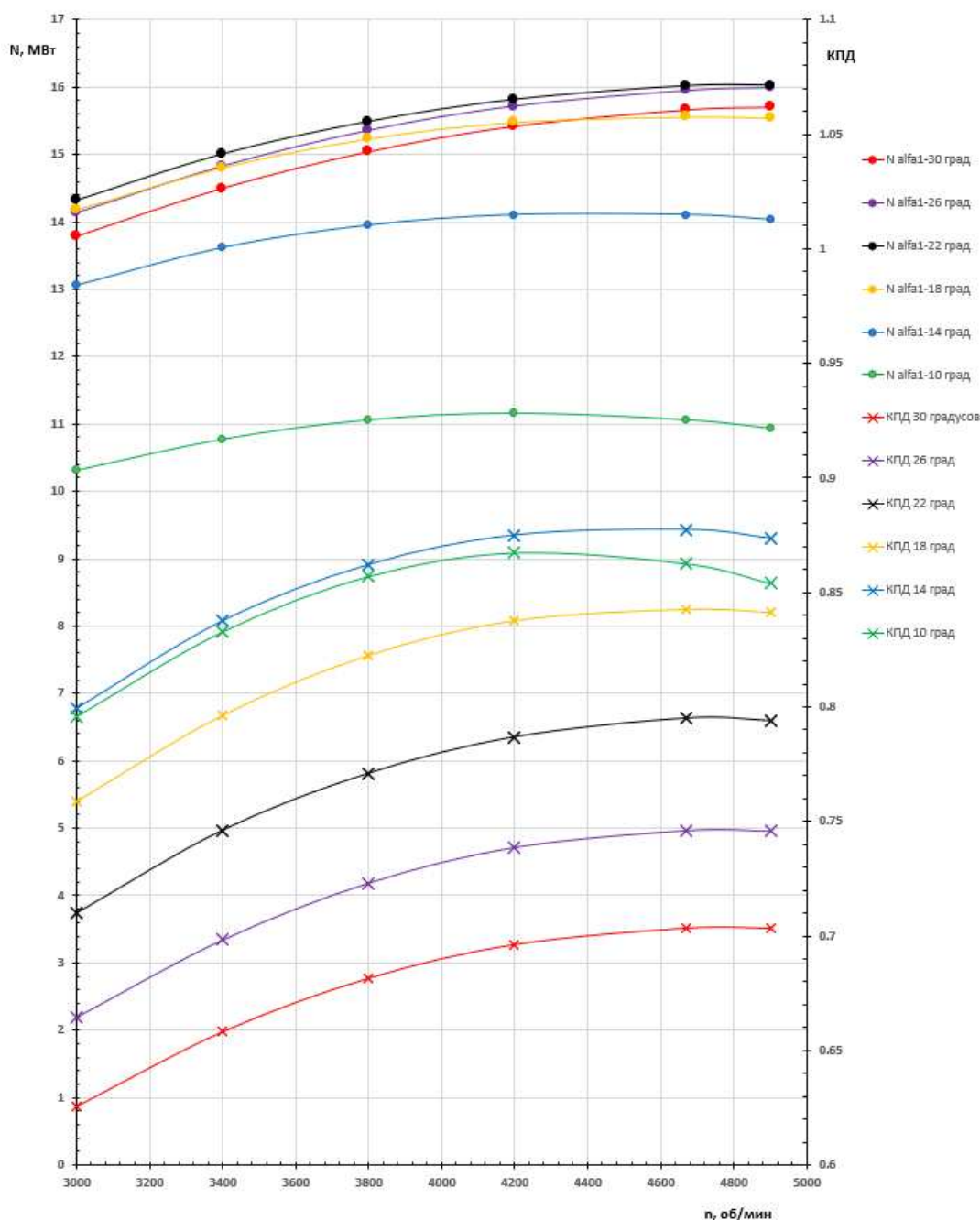


Рис. 10

При угле выхода сопловых лопаток 18° мощность снижается от 16 до 15,5 МВт с увеличением кпд (максимального) до 84 %, и частота вращения составляет 4670 об/мин. Угол выхода сопловых лопаток 14° обеспечивает мощность 14 МВт с кпд (максимальным) 87 % в диапазоне частот вращения 4200... 4670 об/мин.

При последующем снижении мощности и частоты вращения ротора силовой турбины за счет уменьшения угла выхода сопловых лопаток наблюдается некоторое снижение кпд. Тем не менее величина кпд сохраняется на высоком уровне, составляя 82–83 %. Расчет с углом выхода сопловых лопаток 10° показывает, что при максимальном кпд 86,7 % и мощности 11 МВт частота вращения – 4200 об/мин. Снижение частоты вращения до 3200 об/мин при угле выхода сопловых лопаток 10° возможно с уменьшением мощности силовой турбины до 10,5 МВт и кпд до 82 %.

Необходимо отметить, что в рамках трехмерного моделирования не учитывается изменение режима функционирования газогенератора, обусловленное изменением давления и температуры на входе в

силовую турбину. Принятое при определении ее параметров допущение о постоянстве перепада давления на силовой турбине, вызванное отсутствием геометрических данных о турбине высокого давления, приводит к расхождению полученных в данной работе закономерностей изменения параметров с реальными зависимостями.

В результате трехмерных расчетов силовой турбины получены ее параметры при различных углах выхода сопловых лопаток и частотах вращения. Анализ результатов расчета показал, что при регулировании силовой турбины с уменьшением частоты вращения и мощности ее КПД увеличивается. Получение закономерностей изменения параметров силовой турбины от угла выхода сопловых лопаток с учетом работы турбины высокого давления является следующим этапом работ.

Отдельного внимания заслуживает управление газогенератором, который включает осевой компрессор и турбину высокого давления и функционирует на номинальном режиме в узком диапазоне частот вращения ротора. Взаимосвязь газогенератора и силовой турбины осуществляется исключительно по газовому тракту. Для определения рациональных способов регулирования газогенератора необходимо располагать характеристиками осевого компрессора и турбины высокого давления, что представляет собой перспективную задачу дальнейших исследований.

Результаты были получены в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов Н.Т., Мусаткин Н.Ф., Матвеев В.Н. Теория лопаточных машин авиационных газотурбинных двигателей. Самара: СГАУ, 2001. 155 с.
2. Ермаков М.А., Тоньшина А.В. Методика реверс-инжиниринга рабочего колеса центробежного насоса // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2020. Т. 1. С. 234–236.
3. Гуреев М.В., Сидоров А.В., Гуреев В.М. Моделирование процессов аэрогидродинамики и теплообмена в элементах климатической системы кабины грузового автомобиля // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2021. № 2. С. 31–39.
4. Крюков А.А. Численное моделирование коэффициента скорости соплового аппарата малорасходной турбины // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2021. № 6. С. 849–857.
5. Быстров Ю.А. и др. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб.: Судостроение, 2005. 392 с.

Поступила в редколлегию 15.12.25

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF A POWER AXIAL TURBINE OF A GAS TURBINE ENGINE OF A GAS PUMPING UNIT WITH A CHANGE IN THE ANGLE OF INSTALLATION OF THE NOZZLE APPARATUS AND A CONSTANT PRESSURE DROP

V.M. Gureev, V.A. Futin, A.V. Sidorov, R.F. Sharafeev, and M.V. Chuchkalov

The article presents a method for obtaining the parameters of a power turbine using methods for creating a three-dimensional geometric model and numerical thermogasdynamic calculation of the object under study. An analysis of the calculation results was also performed and a conclusion was presented on the design parameters of the power turbine that can be implemented at the operational facility.

Keywords: free power turbine, adjustable nozzle apparatus, impeller, nozzle blade, working blade, flow part.

Гуреев Виктор Михайлович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: viktor.gureev@kai.ru

Футин Виктор Александрович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: VAFutin@kai.ru

Сидоров Алексей Владимирович – науч. сотрудник (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: avsidorov@kai.ru

Шарафеев Рустем Фаридович – начальник службы по управлению техническим состоянием и целостностью газотранспортной системы (ООО «Газпром трансгаз Казань», Казань)

E-mail: rf-sharafeev@tattg.gazprom.ru

Чучкалов Михаил Владимирович – главный инженер (ООО «Газпром трансгаз Казань», Казань)

E-mail: mv-chuchkalov@tattg.gazprom.ru

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ МАСЕЛ

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

Рассмотрена оптимизация выбора технологий восстановления эксплуатационных свойств отработанных масел методом анализа иерархий. Технологический процесс рассматривается как разноуровневая модель с множеством альтернативных технологических операций с оценкой их эффективности и экологичности по принятым комплексным показателям с последующим определением наилучшего набора технологических операций. Предложен графический метод определения приоритетов набора технологий. Предлагаемый метод обеспечивает высокую степень достоверности выбора оптимального варианта набора технологических операций.

Ключевые слова: масло, отработанное масло, технология регенерации, оптимизация, метод анализа иерархий.

При решении экологических проблем значительную роль играют процессы переработки образующихся отходов в виде отработанных смазочных масел. Рациональное использование вторичных продуктов основного производства и получение целевых продуктов обеспечивает решение не только экономических проблем, но и снижение экологической напряженности технического обслуживания авиационного транспорта. Задача максимального вовлечения отработанных нефтепродуктов в переработку актуальна в условиях увеличивающегося спроса на нефтепродукты и возрастающих требований к их качеству, повышению безопасности и защиты окружающей среды [1].

Качество восстановления эксплуатационных свойств отработанных смазочных материалов в процессе регенерации во многом определяется используемой технологией, являющейся наиболее дорогостоящим и длительным этапом. В свою очередь, эффективность технологии определяется набором технологических операций, реализуемых с использованием различного технологического оборудования и их режимных параметров. В связи с этим одной из ключевых задач повышения эффективности и безопасности используемых технологий является выбор технологических операций и оборудования.

Ввиду того что любая технология допускает множество альтернативных способов реализации составляющих ее технологических операций, одним из подходов к обоснованному выбору является метод анализа иерархий. При данном подходе структурирование альтернатив совместно с детерминирующими их ограничениями по иерархическим уровням способствует повышению надежности принимаемого решения, упрощению процедуры его выработки и, как следствие, увеличению его точности.

Принятие решения на каждом уровне иерархической лестницы связано с разнородными группами факторов. На самом верхнем уровне решается вопрос о целях применяемой технологии, далее решаются задачи технического оснащения – достижение экономического, социального или качественного эффекта, анализируется технологический процесс с учетом его масштаба и предполагаемых затрат. Затем определяются частные показатели, связанные с выбранной технологией, – оборудование, приспособления, системы управления и т. д. – вплоть до технологических режимов. При этом окончательное решение зависит от принадлежащей только ему группы параметров и ограничений и, кроме того, от уже принятого решения на высших уровнях иерархии [2, 3].

Таким образом, в рамках иерархического подхода техническое оснащение технологического процесса осуществляется в следующей последовательности: постановка цели, решение задач, выбор методов, операций, функций и определение технологических режимов, назначение технологических режимов. Такая структуризация обеспечивает упрощение процедуры поиска оптимальных решений, а также позволяет систематизировать по иерархическим уровням совокупность условий и ограничений, налагаемых на технологический процесс.

В соответствии с этой схемой основной целью для производства является получение с помощью технического оснащения некоторого эффекта, который в конечном счете оправдывает затраты на его про-

ведение. Основные задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели, связаны с выбором перспективного технического оснащения технологического процесса с учетом масштаба его использования.

В свою очередь, выбранная технология конкретизирует используемое оборудование, приспособления, управляющие программы и технологические режимы. Таким образом, иерархичность повышает определенность и позволяет упорядочить критерии выбора стратегии и тактики технического оснащения, а также разнести ограничения по уровням.

В ситуации выбора технических средств рассматривается некоторое множество альтернативных, взаимно независимых технических систем, из которых в итоге отбирается лишь одна. Следовательно, такой выбор имеет метасистемную природу. Его принципиальное отличие от существующих подходов заключается в способе интеграции технических систем, детерминирующих технологический процесс.

Основные требования следующие:

- технические системы, из альтернативного множества которых осуществляется выбор, должны быть независимы друг от друга;
- для анализа эффективности технического оснащения выбирается лишь одна техническая система либо некоторая группа согласованных технологическим процессом систем;
- набор альтернативных вариантов технических систем изменяется как количественно, так и по составу.

Применительно к технологиям восстановления отработанных масел выбор технических средств осуществляется с учетом следующих факторов:

- соответствие возможностей и эксплуатационных характеристик предъявляемым требованиям к качеству процесса и продукта;
- совместимость с другими техническими средствами в технологической линии;
- соответствующий уровень квалификации обслуживающего персонала для эффективной эксплуатации;
- универсальность, безотказность, простота конструкции и регулировок, непрерывность работы и стабильность производительности;
- безопасность эксплуатации для персонала и окружающей среды;
- минимальные затраты на приобретение, установку, эксплуатацию и поддержание в работоспособном состоянии.

Данные факторы доказывают метасистемность процесса выбора технических операций и используемых технических средств.

Рассмотрим технологию, включающую следующие операции: первый уровень – удаление воды; второй уровень – удаление нерастворимых примесей; третий уровень – удаление продуктов термоокислительной полимеризации углеводов (осветление); четвертый уровень – компаундирование очищенного масла. В этом случае можно предложить следующую иерархическую модель выбора технических операций и средств, представленную на рис. 1 [4–7]. Здесь: K_{1i} – показатель операции обезвоживания масел; K_{2i} – показатель операции очистки масел от нерастворимых примесей; K_{3i} – показатель операции очистки масел от продуктов термоокислительной полимеризации; K_{4i} – показатель операций компаундирования масел; $K_{\text{вм}}$ – показатель восстановленного масла.

Модель включает множество альтернативных технологических операций и позволяет оценить показатели, характеризующие каждый вариант технического оснащения технологического процесса.

На вход схемы поступает сырье – отработанное масло. В соответствии с различным набором технологических операций осуществляется переборка как самих операций, так и их технического оснащения, что составляет технологический процесс. При этом рассчитываются показатели, наиболее полно удовлетворяющие поставленным целям.

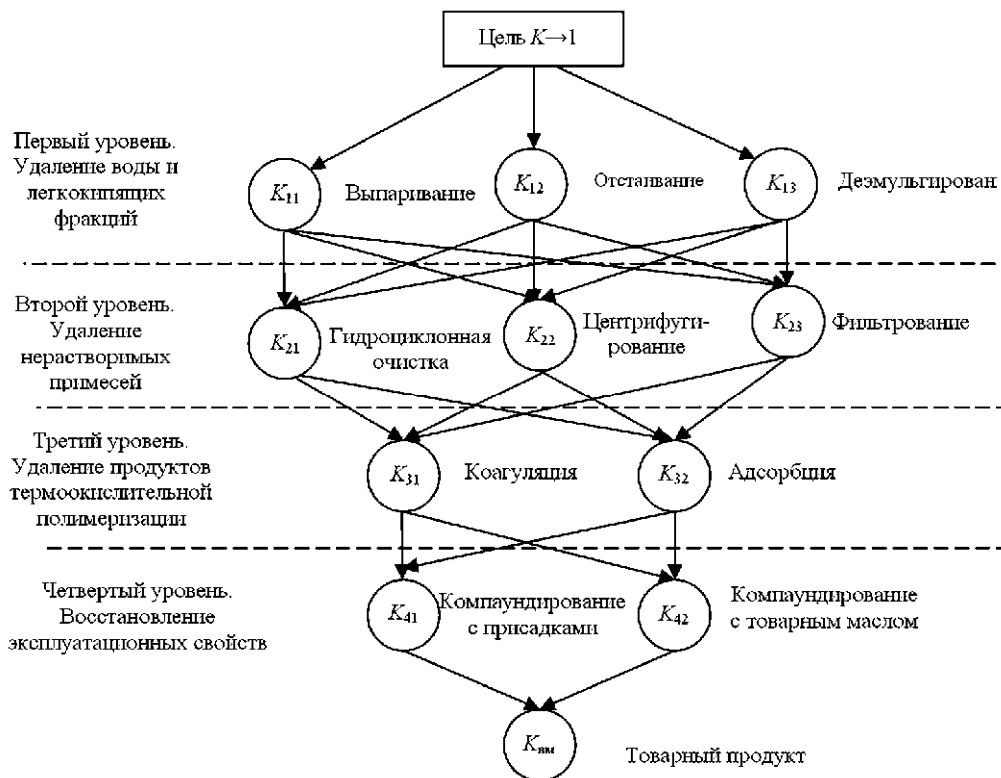


Рис. 1

Оценка эффективности выбираемых технических средств должна базироваться на целевой установке выбора. При формулировании в качестве целевых ориентиров эффективности технологического процесса очистки и восстановления отработанных масел, а также его экологической безопасности для персонала и окружающей среды технологические операции и соответствующие технические средства подлежат оценке на основе комплексного критерия, включающего следующие составляющие:

$$K = (K_k + K_э) \rightarrow 1, \quad (1)$$

где K_k – коэффициент удельной эффективности технологической операции, реализуемой в конкретном техническом средстве; $K_э$ – коэффициент экологической безопасности конкретной технологической операции и технического средства.

Поскольку в каждом техническом средстве приоритетными являются те или иные выходные параметры (те или иные показатели качества), комплексный показатель должен включать весовой коэффициент принимаемых к расчету коэффициентов

$$K = K_k \varphi_1 + K_э \varphi_2, \quad (2)$$

где φ_1 , φ_2 – весовые коэффициенты удельной эффективности и экологической безопасности технологической операции.

Значения весовых коэффициентов могут варьироваться в зависимости от качественных показателей продукта, последовательности его обработки в технологическом процессе. При этом выбор значений весового коэффициента по качеству промежуточного продукта должен обосновываться последовательностью технологического процесса на основании экономической и экологической целесообразности, т. е. с целью минимизации каждого последующего процесса с энергетической и экологической точек зрения, а также для повышения качества продукта на каждом этапе очистки и восстановления. Для этого можно использовать балльный метод, что предусматривает следующие этапы [8–10]:

- определение основных критериев выбора, включающих конкретные измеримые свойства – параметры (основа квантификации);

- выбор принципов оценивания относительно каждого конкретного критерия и значений их параметров;
- введение возможных весовых коэффициентов для отдельных критериев и параметров, поскольку не все они могут быть одинаково важны для технологического процесса;
- расчет количества баллов, выставляемых каждому потенциальному техническому средству;
- выбор технического средства.

Коэффициент удельной эффективности определяется по качеству процесса:

$$K_k = \frac{\Pi_\phi}{\Pi_T}, \quad (3)$$

где Π_ϕ – фактическое значение показателя качества процесса (например, для отстойников – степень удаления из масла воды и механических примесей; для технических средств очистки – степень фильтрации, содержание нерастворимых примесей и т. д.); Π_T – требуемое (задаваемое) значение показателя качества процесса.

Коэффициент экологической безопасности отражает степень предотвращения негативного воздействия технологических операций и оборудования на окружающую среду. Это заключается как в полном предотвращении экологического негативного воздействия, так и в уменьшении наносимого технологическими процессами экологического вреда. При этом учитывается воздействие на окружающую среду, человека и получаемые продукты:

$$K_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}},$$

где K_i – единичные критерии оценки экологической эффективности; n – количество критериев.

Соответственно, с помощью комплексного критерия может быть оценена технология с любым набором технологических операций, включающая i -е количество выбранных технических средств:

$$K = (K_{k1}\varphi_{11} + K_{k2}\varphi_{12} + \dots + K_{ki}\varphi_{1i}) + (K_{31}\varphi_{21} + K_{32}\varphi_{22} + \dots + K_{3i}\varphi_{2i}), \quad (4)$$

где $K_{k1}, K_{k2}, \dots, K_{ki}$ – коэффициент удельной эффективности процесса, реализуемого в первом, втором и i -м техническом средстве; K_3 – коэффициент экологической безопасности первого, второго, i -го технического средства; $\varphi_{11}, \varphi_{12}, \dots, \varphi_{1i}, \varphi_{21}, \varphi_{22}, \dots, \varphi_{2i}$ – весовые коэффициенты удельной эффективности и экологической безопасности технических средств первого, второго и i -го технического средства.

В соответствии с правилами метода анализа иерархий после проведения ранжирования критериев (K_k, K_3, K_i) и оценки альтернативных вариантов технологических операций, с учетом важности критерия (комплексного показателя) и определения значения нормализованного вектора приоритетов проводится сравнение вариантов (табл. 1) [8–10].

Таблица 1

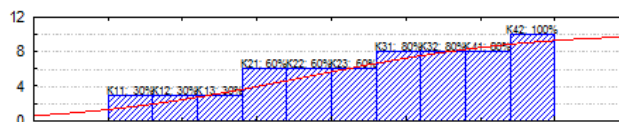
Критерии оценки	K_{11}	K_{12}	K_{13}	K_{21}	K_{22}	K_{23}	K_{31}	K_{32}	K_{41}	K_{42}
K_k	0,4	0,1	0,8	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,85	0,85
K_3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,3	0,1	0,05	0,1

Для определения приоритетов альтернативных технологий составлена таблица итоговых значений приоритетов по сгруппированным наборам (альтернативным вариантам) технологических операций (табл. 2).

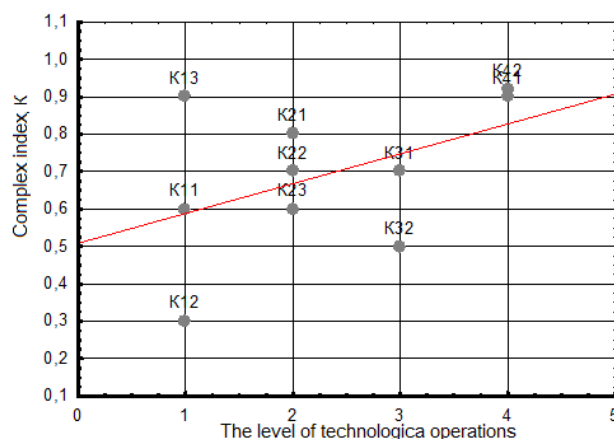
Проверка достоверности полученного решения на основе обобщенного отношения согласованности показала, что значение данного показателя составляет 8 %, что подтверждает достоверность принятого решения.

Критерии оценки	$K_{11}, K_{21}, K_{31}, K_{41}$	$K_{11}, K_{21}, K_{31}, K_{42}$	$K_{11}, K_{21}, K_{32}, K_{41}$	$K_{11}, K_{21}, K_{32}, K_{42}$	$K_{11}, K_{22}, K_{31}, K_{41}$	$K_{11}, K_{22}, K_{31}, K_{42}$	$K_{11}, K_{22}, K_{32}, K_{41}$	$K_{11}, K_{22}, K_{32}, K_{42}$...	$K_{13}, K_{23}, K_{32}, K_{42}$
K_k	0,56	0,56	0,56	0,56	0,54	0,54	0,56	0,54	...	0,64
K_3	0,19	0,2	0,14	0,15	0,19	0,2	0,14	0,12	...	0,1
K	0,75	0,76	0,70	0,71	0,73	0,74	0,70	0,66	...	0,74

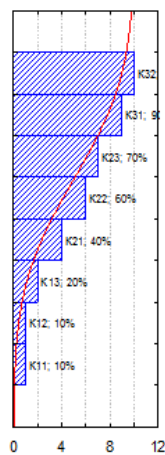
Для упрощения методики расчета предложен графический метод определения приоритетов технологий с соответствующим набором технологических операций (рис. 2).



а



б



в

Рис. 2

Реализация данного метода проводится в программе Statistica с построением гистограмм приоритетов отдельных технологических операций ($K_{11}, K_{12}, \dots, K_{41}, K_{42}$ (рис. 2, б)) и кумулятивных гистограмм технологий с указанием перечня технологических операций (рис. 2, а, в). Достоверность выбора, рассчитанная программой, составляет 88–98 %. Использование данного метода существенно облегчает обработку массива данных при множестве альтернативных вариантов с высокой степенью достоверности выбранного варианта.

На основании проведенных расчетов установлено, что наибольшее значение комплексного показателя имеет технология восстановления эксплуатационных свойств отработанных масел с набором сле-

дующих технологических операций: деэмульгирование масла (K_{13}), гидроциклонная очистка от нерастворимых примесей (K_{21}), коагуляция (K_{31}) и компаундирование очищенного масла с товарным (K_{42}).

Использование метода анализа иерархий при выборе технологических операций позволяет существенно снизить время обработки массива данных при множестве альтернативных вариантов и с высокой степенью достоверности выбрать оптимальный вариант набора технологических операций. Кроме того, расчет итоговых значений приоритетов технологических операций позволяет сделать общую оценку эффективности технологий с заданным набором технологических операций. Предлагаемая методика оптимизации может быть использована при разработке технологических процессов любого производства. Особенностью методики является ее вариативность, поскольку в виде целевой функции может быть принят любой комплексный показатель, учитывающий особенности конкретного производства и необходимых параметров как самого технологического процесса, так и производимого продукта. Кроме того, анализируя полученные данные еще на этапе создания технологии, возможно провести корректировку по выбору технологических операций и оборудования с целью наибольшего удовлетворения поставленным целям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глуценко А.А. Экологически безопасные технологии восстановления эксплуатационных свойств отработанного моторного масла с использованием гидроциклона. Ульяновск: УГСХА, 2011. 166 с.
2. Беллман Р. Динамическое программирование. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 401 с.
3. Черняк А.А., Черняк Ж.Ю., Метельский Ю.М. Математическое программирование. Алгоритмический подход. Минск.: Высшая школа, 2006. 352 с.
4. Субаева А.К. и др. Современные методы контроля качества масел // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2024. № 2. С. 16–20.
5. Глуценко А.А. Осушка отработанных масел с использованием деэмульгатора // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии им. П.А. Столыпина. 2015. № 1 (29). С. 106–110.
6. Субаева А.К. и др. Технологический способ напыления электроизолирующего покрытия на внешнюю стенку гильзы цилиндров // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2025. № 2. С. 41–45.
7. Замальдинов М.М., Глуценко А.А. Модульная линия очистки отработанных минеральных моторных масел от загрязнений // Известия МААО. 2011. № 11. С. 16–21.
8. Scott D. Measurement Structures and Linear Inequalities // Journal of Mathematical Psychology. 1964. Vol. 1. P. 233–247.
9. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
10. Wigand R.T., Barnett G.A. Multidimensional Scaling of Cultural Processes: The Case of Mexico, South Africa and the United States, International and Intercultural Communication Annual. 1976. Vol. 3. P. 140–172.

Поступила в редколлегию 29.10.25

A METHOD FOR OPTIMIZING THE SELECTION OF TECHNOLOGIES FOR THE REGENERATION OF USED OILS

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

The optimization of the selection of technologies for restoring the operational properties of used oils by the method of hierarchy analysis is considered. The technological process is viewed as a multi-level model with a variety of alternative technological operations, with an assessment of their efficiency and environmental friendliness according to accepted comprehensive indicators, followed by the determination of the best set of technological operations. A graphical method for determining the priorities of the set of technologies is proposed. The proposed method provides a high degree of reliability in choosing the optimal variant of the set of technological operations.

Keywords: oil, waste oil, regeneration technology, optimization, hierarchy process analysis.

Субаева Асия Камилевна – д-р экон. наук (КНИТУ-КАИ, Чистопольский филиал «Восток», Чистополь)

E-mail: subaeva.ak@mail.ru

Глущенко 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

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

E-mail: zamaldinov.marat@mail.ru

УНИВЕРСАЛИЗОВАННАЯ ПРОЦЕДУРА ФОРМИРОВАНИЯ АНRS-ОЦЕНКИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПА

**М.С. Азов, И.Г. Галиуллин, Е.С. Густов, Д.Е. Чикрин,
А.Ф. Фахрутдинов**

Предложен универсализованный подход к формированию АНRS-оценки для мультироторных беспилотных летательных аппаратов в условиях отсутствия сигналов глобальных систем позиционирования. Рассмотрены проблемы накопления ошибок ориентации, вызванные высокой динамикой движения и шумами низкобюджетных MEMS-датчиков. Представлена методика предварительной калибровки данных инерциальных сенсоров (гироскопов, акселерометров, магнитометров). Для фильтрации данных предложено использование ансцентного фильтра Калмана, обеспечивающего точное оценивание пространственного положения в нелинейных динамических системах. Проведена экспериментальная проверка на вращающейся платформе, показавшая, что применение ансцентного фильтра Калмана в сочетании с калибровкой датчиков позволяет снизить дрейф угла рыскания до 1,9 град/ч (в контролируемых лабораторных условиях без сильных магнитных помех), что значительно превосходит точность традиционных подходов. Результаты работы могут быть использованы при разработке автономных навигационных систем для мультироторных беспилотных летательных аппаратов различных конфигураций.

Ключевые слова: АНRS, мультироторный беспилотный летательный аппарат, ансцентный фильтр Калмана, калибровка, инерциальные измерительные блоки, дрейф угла рыскания, автономная навигация.

Введение

Проблема навигации беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в условиях отсутствия сигналов глобальных систем позиционирования приобретает все большую актуальность [1–5] в контексте современных вызовов. К БЛА всех классов, включая малогабаритные, предъявляются требования максимальной автономности в задачах навигации.

Ключевой задачей в навигации летательных аппаратов является определение пространственной ориентации (АНRS-оценка). При этом для БЛА самолетного и вертолетного типа с линеаризуемой моделью перемещения в пространстве обработка первичных навигационных данных с помощью фильтра Калмана (KF) и расширенного фильтра Калмана (ЕКФ) дает приемлемые для решения навигационных задач оценки пространственного положения [6, 7]. Для БЛА мультироторного типа формирование АНRS-оценки осложнено спецификой модели поведения летательного аппарата, который характеризуется высокой динамикой изменения пространственного положения и высотно-скоростных параметров. Нелинейность данной модели требует определенных подходов к обработке первичной информации, поступающей с бортовых сенсоров, таких, как инерциальные измерительные блоки (IMU), акселерометры и магнитометры, традиционно используемые для определения пространственного положения воздушных судов и БЛА [8].

В настоящее время известно несколько подходов к фильтрации «сырых» данных с датчиков при формировании АНRS-оценки БЛА мультироторного типа, среди которых можно выделить применение нелинейного комплиментарного фильтра для совмещения высокочастотных и низкочастотных данных инерциальной системы в целях устранения дрейфа [1, 9], использование ансцентного фильтра Калма-

на (UKF) для обработки данных IMU в сочетании с различными алгоритмами обработки данных акселерометра и магнитометра [2], а также применение для фильтрации данных от инерциальных систем нейросетевых моделей, обученных на специфических для БЛА мультироторного типа выборках данных [10].

В статье рассматривается метод формирования AHRS-оценки мультироторного БЛА, основанный на предварительной калибровке инерциальных MEMS-сенсоров и учете их стохастических характеристик при дальнейшей нелинейной фильтрации. Предварительная обработка включает статическую калибровку гироскопов, акселерометров и магнитометров с компенсацией смещений, масштабных коэффициентов и неортогональности осей. Предложенный подход не требует явного включения динамической модели летательного аппарата и не зависит от кинематической схемы БЛА, поскольку основывается исключительно на обработке первичных инерциальных измерений IMU. В отличие от методов навигационной фильтрации, использующих модель движения и распределение управляющих воздействий по моторам [11], где параметры фильтра зависят от конфигурации аппарата (квадрокоптер, гексакоптер и т. д.), рассматриваемая методика является универсальной относительно компоновки платформы и применима для широкого класса БЛА при наличии стандартного набора инерциальных сенсоров.

Предварительная обработка исходных данных

Данные, получаемые с гироскопа, акселерометра и магнитометра, содержат совокупность систематических погрешностей и случайных шумов, что обусловлено физическими принципами работы чувствительных элементов и шумами электронной схемы. К числу типичных составляющих погрешностей относятся шум квантования, аддитивная составляющая в виде белого шума в сигнале угловой скорости гироскопа, медленно меняющиеся смещения и дрейфы на интервалах от десятков секунд и более, нестабильность смещения нуля, а также внешние воздействия, включая линейный дрейф мультипликативного характера и синусоидальные компоненты, обусловленные вибрациями и электромагнитными помехами.

Для исключения систематических составляющих погрешности на этапе предварительной обработки выполняется последовательная калибровка инерциальных сенсоров, включающая оценку аддитивных смещений (*bias*), компенсацию линейных искажений (масштабных коэффициентов и неортогональности осей). Калибровка выполняется до применения алгоритмов фильтрации и является обязательным этапом формирования корректных входных данных для последующей оценки ориентации.

Калибровочные значения вычислялись по следующему выражению:

$$x_{\text{cal}} = T(x_{\text{raw}} - \bar{b}), \quad (1)$$

где \bar{b} – вектор аддитивных смещений; $T \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ – линейная матрица, компенсирующая масштабные коэффициенты и неортогональность осей. Оценка вектора \bar{b} выполняется при каждом запуске по результатам статического измерения на интервале стационарного режима, характеризующемся минимальной дисперсией сигнала и отсутствием переходных процессов. Длительность интервала и веса усреднения обосновываются по результатам анализа дисперсии Аллана. Для каждой ориентации по массиву измерений вычислялась медиана, что обеспечивает устойчивость к выбросам и повышает надежность последующей калибровки. Полученные коэффициенты сохранялись в конфигурации фильтра и применялись на этапе предварительной обработки данных.

В условиях покоя модуль вектора удельного ускорения, измеряемого акселерометром, равен ускорению свободного падения g (в работе принято $g = 9,81 \text{ м/с}^2$), поэтому набор усредненных векторов $\{\bar{a}_k\}$, снятых в различных устойчивых ориентациях, теоретически образует сферическую поверхность радиуса g в пространстве измерений. Наличие смещений и анизотропии преобразует сферу в эллипсоид со смещенным центром. Для идентификации параметров использовался избыточный набор статических ориентаций, что обеспечивает равномерное покрытие направлений и устойчивую оценку параметров аппрок-

симирующего эллипсоида. Сначала оценивался вектор смещения, соответствующий центру эллипсоида, после чего определялась линейная матрица преобразования T_a , приводящая эллипсоид к сфере радиуса g . Качество калибровки контролировалось по величине среднеквадратического отклонения нормы $\|a_{cal}\|$ от g , поскольку эта величина чувствительна как к остаточной систематике, так и к шуму.

Смещение гироскопа определялось при неподвижном состоянии инерциального блока, когда угловая скорость $\omega_{true} = 0$ равна нулю. Вектор \bar{b}_g определялся как среднее значение измерений, полученных в условиях покоя инерциального блока при отсутствии углового движения. Для определения масштабных коэффициентов и перекрестных связей проводились серии контролируемых вращений вокруг каждой из осей чувствительности в прямом и обратном направлениях при одинаковой по модулю угловой скорости. Это позволяет оценить матрицу T_g в модели $\omega_{raw} \approx b_g + T_g \omega_{true}$ методом линейной регрессии. В дальнейших расчетах использовалась обратная матрица преобразования.

Магнитометр калибровался отдельно, поскольку для него существенны специфические искажения магнитного поля, а именно смещение hard-iron и анизотропия/деформации soft-iron, а также неортогональность осей. Калибровочное значение магнитной индукции вычислялось по выражению

$$B = MW^{-1}(B_{raw} - \bar{V}), \quad (2)$$

где \bar{V} – вектор смещения (hard-iron); W – матрица компенсации soft-iron (масштабирование по осям); M – матрица скоса для устранения неортогональности.

\bar{V} и W определялись аппроксимацией облака измерений эллипсоидом [12] по данным вращения блока в различных ориентациях, M оценивалась по трем «кольцам» вращения при последовательной ориентации осей $X/Y/Z$ вертикально вверх, что позволяет восстановить взаимную геометрию осей и минимизировать их неортогональность.

В работе [13] ранее были представлены методики калибровки указанных типов шумовых воздействий применительно к навигационной системе наземного транспорта. Кроме того, приведены результаты экспериментальных исследований с использованием реального оборудования – инерциального измерительного модуля ADIS16448. Полученные данные подтверждают применимость разработанных методов для количественной оценки шумов с приемлемой степенью точности.

Математическая модель AHRS и UKF-фильтрация

Рассмотрим задачу модельного оценивания пространственной ориентации БЛА на основе стохастической модели AHRS. Формируется нелинейная модель состояния и измерений, учитывающая динамику ориентации и шумовые характеристики MEMS-сенсоров, определенные на этапе предварительной калибровки.

Базовая оценка ориентации (AHRS) формируется посредством алгоритма Мэдживика [14, 15], в рамках которого осуществляется комплексная обработка данных гироскопов, акселерометров и магнитометров в комплементарном фильтре с целью вычисления кватернионов ориентации. Указанный алгоритм характеризуется низкой вычислительной сложностью, что обеспечивает его эффективность в режиме реального времени, и не требует явного задания модели динамики. Вместе с тем он чувствителен к шумовым составляющим измерительных сигналов, что обуславливает необходимость дополнительной фильтрации. В целях повышения точности AHRS-оценки БЛА мультироторного типа, функционирующего в условиях высокой динамики изменения пространственного положения по всем трем осям, применение EKF может сопровождаться искажением результатов вплоть до расходимости вычислительного процесса. В отличие от него, UKF в подобных системах с высокой степенью нелинейности обеспечивает более точное апостериорное оценивание до третьего порядка разложения в ряд Тейлора [16, 17]. Дополнительно совместное применение UKF с моделированием геометрии системы и алгоритмами типа FLOW [18], TRIAD [2] и моделированием ошибок и шумов сенсоров (гироскопов, акселерометров, маг-

нитометров) позволяет повысить точность оценки и классифицировать типы ошибок АНРС для платформ различных конфигураций, включая динамические режимы.

Нелинейную динамику мультироторного БЛА с учетом шумов можно представить в виде

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= f_k(x_k) + w_k; \\y_{k+1} &= h_k(x_k) + v_k,\end{aligned}\tag{3}$$

где $\bar{x}_k, \bar{x}_{k+1} \in \mathbb{R}^3$ – вектор состояния; $f_k: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ – нелинейная функция состояния; $\bar{y}_k \in \mathbb{R}^3$ – выходной вектор; $h_k: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ – функция измерения; w_k – шумы процесса; v_k – шумы измерения; k – метка времени, при этом $x_k = [\phi, \theta, \psi]^t$ и $y_k = [\phi, \theta, \psi]^t$.

Случайное значение x может быть спрогнозировано с использованием нелинейной функции состояния, приведенной в уравнении (3). Пусть ожидаемое значение x – это $E[x] = \bar{x}$ и ковариация x – это $E[(x - \bar{x})(x - \bar{x})^t] = P_x$. Статистически спрогнозированное значение случайной величины может быть вычислено с использованием ансцентного преобразования. Матрица χ размерностью $2n + 1$ (где n – размерность x) формируется следующим образом:

$$\begin{aligned}x_0 &= \bar{x}; \\ \chi_i &= \bar{x} + \left(\sqrt{(n + \lambda)P_x}\right)_i, i = 1, \dots, n; \\ \chi_i &= \bar{x} + \left(\sqrt{(n + \lambda)P_x}\right)_{i-n}, i = n + 1, \dots, 2n,\end{aligned}\tag{4}$$

где χ_i – сигма-векторы; $\lambda = a^2(n + k) - n$ (a – константа, определяющая разброс χ_i относительно \bar{x} ; k – вторичный параметр масштабирования; $\left(\sqrt{(n + \lambda)P_x}\right)_i$ – i -й ряд матрицы квадратного корня; a , как правило, устанавливается как $1E - 3$, пока $k = 0$. Ассоциативные веса матрицы χ могут быть выведены следующим образом:

$$\begin{aligned}W_0^m &= \frac{\lambda}{(n + \lambda)}; \\ W_0^c &= \frac{\lambda}{(n + \lambda)} + (1 - a^2 + \beta); \\ W_i^m &= W_i^c \frac{1}{2(n + \lambda)}, i = 1, \dots, 2n,\end{aligned}\tag{5}$$

где W_i – соответствующий вес χ_i ; β – коэффициент учета априорных сведений о типе распределения случайной величины x (например, если полагается, что x имеет гауссовское распределение, то оптимальное значение $\beta = 2$). Параметры настраиваются эмпирически: $\alpha = 0,5 \div 1$ для контроля разброса, $\kappa = 0$, $\beta = 2$ для гауссовости; в моделировании использованы $\alpha = 0,1$; $\beta = 2$ для минимизации ошибок в нелинейных системах.

Таким образом, нелинейная трансформация сигма-вектора может быть выражена как

$$y_i = f(x_i),\tag{6}$$

где $i = 1, 2, \dots, 2n$.

При помощи трансформированного вектора γ приблизительное значение y ковариации P_y вычисляется следующим образом:

$$\begin{aligned}\bar{y} &\approx \sum_{i=0}^{2n} W_i^m \gamma_i; \\ P_y &\approx \sum_{i=0}^{2n} W_i^c (\gamma_i - \bar{y})(\gamma_i - \bar{y})^t.\end{aligned}\tag{7}$$

С учетом (7) стандартный алгоритм UKF может быть реализован через последовательность шагов прогноза и коррекции, которые явно учитывают статистические характеристики шумов процесса и измерений. Это позволяет оптимально, в смысле минимума возможной среднеквадратической погрешности, оценить состояние системы, компенсируя влияние как откалиброванных, так и остаточных «дополнительных» шумовых воздействий.

Алгоритм включает следующие этапы.

1. Инициализация фильтра ($k = 0$).

Задаются начальные оценки вектора состояния и его ковариационной матрицы:

$$\begin{aligned}\tilde{x}_0 &= E(x_0); \\ P_0 &= E\left[(x_0 - \tilde{x}_0)(x_0 - \tilde{x}_0)^t\right].\end{aligned}\quad (8)$$

2. Вычисление сигма-точек (k любое).

Представляет текущее распределение состояния в виде набора детерминированных точек:

$$\chi_{k-1} = \left[\tilde{x}_{k-1}, \tilde{x}_{k-1} + \left(\sqrt{(n+\lambda)P_{k-1}}\right), \tilde{x}_{k-1} - \left(\sqrt{(n+\lambda)P_{k-1}}\right) \right]. \quad (9)$$

3. Временные уравнения.

Описывают этап прогноза. Каждая сигма-точка пропускается через нелинейную модель системы, что позволяет рассчитать предсказанное значение состояния и его ковариации на следующий временной шаг с учетом шумов процесса:

$$\begin{aligned}\chi_{k|k-1} &= f_k(\chi_{k-1}); \\ \tilde{x}_k &= \sum_{i=0}^{2n} W_i^m \chi_{i,k|k-1}; \\ P_k &= \sum_{i=0}^{2n} W_i^c (\chi_{i,k|k-1} - \tilde{x}_k)(\chi_{i,k|k-1} - \tilde{x}_k)^t + R_w; \\ y_{k|k-1} &= h_k(\chi_{k-1}); \\ \tilde{y}_k &= \sum_{i=0}^{2n} W_i^m y_{i,k|k-1}.\end{aligned}\quad (10)$$

4. Уравнения измерений.

Описывают этап коррекции. Предсказанные сигма-точки преобразуются в пространство измерений, вычисляется ковариация измерений и кросс-ковариация между состоянием и измерением. Затем на основе реально полученных измерений производится корректировка (обновление) оценки состояния и его ковариации с учетом шумов измерений:

$$\begin{aligned}P_{y_k y_k} &= \sum_{i=0}^{2n} W_i^c (y_{i,k|k-1} - \tilde{y}_k)(y_{i,k|k-1} - \tilde{y}_k)^t + R_v; \\ P_{y_k y_k} &= \sum_{i=0}^{2n} W_i^c (y_{i,k|k-1} - \tilde{y}_k)(y_{i,k|k-1} - \tilde{y}_k)^t; \\ K_k &= \frac{1}{P_{x_k y_k} P_{y_k y_k}}; \\ \tilde{x}_k &= \tilde{x}_k + K_k (y_k - \tilde{y}_k); \\ P_k &= P_k - K_k P_{y_k y_k} K_k^t; \\ P_{y_k y_k} &= \sum_{i=0}^{2n} W_i^c (y_{i,k|k-1} - \tilde{y}_k)(y_{i,k|k-1} - \tilde{y}_k)^t + R_w; \\ P_{x_k y_k} &= \sum_{i=0}^{2n} W_i^c (y_{i,k|k-1} - \tilde{y}_k)(y_{i,k|k-1} - \tilde{y}_k)^t + R_v; \\ K_k &= \frac{1}{P_{x_k y_k} P_{y_k y_k}};\end{aligned}\quad (11)$$

$$\begin{aligned}\tilde{x}_k &= \tilde{x}_k + K_k (y_k - \tilde{y}_k); \\ P_k &= P_k - K_k P_{y_k y_k} K_k^t,\end{aligned}\tag{11}$$

где R_w , R_v – матрицы ковариации шума процесса и шума измерения (4).

На рис. 1 представлена диаграмма работы UKF для получения AHRS-оценки мультироторного БЛА с учетом шумов.

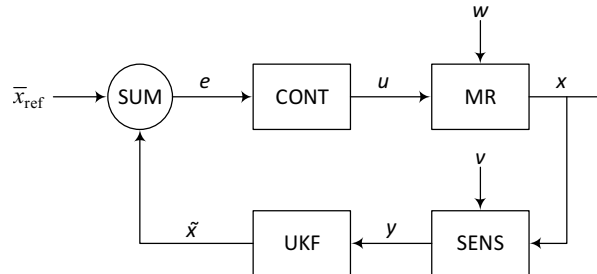


Рис. 1

Желаемый вектор состояния \bar{x}_{ref} и ожидаемый вектор состояния \bar{x} поступают в суммирующий блок (SUM) для формирования сигнала ошибки e . Входной сигнал u динамической модели платформы вращения вычисляется в блоке управления (CONT) в соответствии с сигналом ошибки. Со входом u и шумами процесса w (стохастические возмущения динамики объекта, обусловленные микровибрациями, неидеальностью привода, дискретностью управления и внешними механическими воздействиями) вычисленный сигнал накладывается на динамику мультироторного БЛА. Состояния мультиротора измеряются сенсорами (SENS), данные которых подвержены шуму измерения. Измеренные состояния проходят через UKF для получения ожидаемого значения и очистки \tilde{x} от шума.

Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности применения UKF с учетом моделей известных шумов, определяемых процессами калибровки для получения AHRS-оценки БЛА мультироторного типа.

Результаты и их обсуждение

Для проверки предложенного универсального подхода к формированию AHRS-оценки, не зависящего от кинематической архитектуры БЛА, было проведено экспериментальное исследование с использованием данных, полученных с инерциального измерительного блока. Основной целью исследования являлась количественная оценка эффективности метода в минимизации дрейфа оценки угла рыскания, так как он является наиболее критичным параметром при длительной автономной работе без внешних поправок.

Инерциальный блок, структура которого приведена на рис. 2, построен на микроконтроллере STM32H753VIT с аппаратным ускорением цифровой обработки сигналов, что обеспечивало обработку данных в реальном времени. Для передачи телеметрии использовался Wi-Fi-модуль ESP32-D0WD. Сенсорная часть включала трехосный акселерометр/гироскоп BMI270 и трехосный магнитометр LIS3MDL.

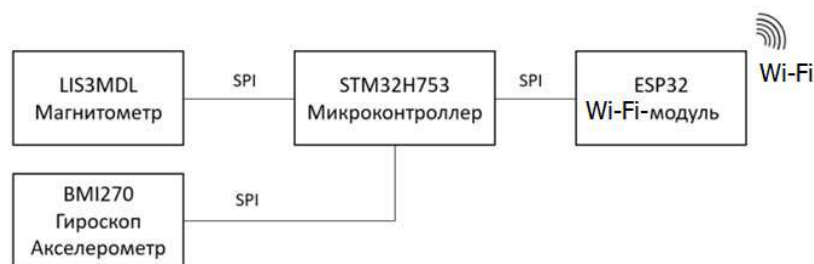


Рис. 2

Эксперимент проводился на управляемой вращающейся платформе с шаговым двигателем.

Платформа обеспечивала равномерное вращение инерциального блока с контролируемой угловой скоростью. Период одного полного оборота составлял 25900 мс, что соответствовало средней угловой скорости примерно 13,9 град/с. Общая длительность эксперимента – 1 ч, частота дискретизации – 200 Гц. Каждый эксперимент повторялся пять раз в идентичных условиях. Во всех сериях результаты демонстрировали высокую воспроизводимость: расхождение между независимыми запусками не превышало уровня случайных шумов датчиков и не влияло на характер выявленных зависимостей. Регистрируемой величиной является значение угла рыскания, получаемое после каждого полного оборота платформы. Таким образом, на графиках (рис. 4–6) по оси абсцисс отложено время, а по оси ординат – значение угла рыскания. Для наглядности представления долговременного дрейфа на графиках приведены значения, соответствующие моментам завершения каждого полного оборота платформы. Такой подход позволяет непосредственно наблюдать накопленную ошибку ориентации за каждый оборот, исключая внутривибрационные колебания, связанные с равномерностью вращения и дискретностью измерений.

В ходе эксперимента были последовательно сопоставлены четыре варианта формирования AHRS-оценки, различающиеся используемыми сенсорами, полнотой их предварительной калибровки и применяемыми алгоритмами обработки, осуществляющимися в несколько этапов.

1. Оценка ориентации.

Формировалась без использования магнитометра и калибровочных коэффициентов, оценка ориентации строится исключительно численным интегрированием первичных показаний гироскопа и акселерометра.

2. Оценка ориентации на основе данных гироскопа и магнитометра без применения калибровочных коэффициентов.

3. Использование магнитометрических данных измерений для коррекции дрейфа угла рыскания, однако без предварительной коррекции первичных данных всех датчиков.

4. Оценка ориентации на основе измерений, предварительно скорректированных с помощью калибровочных коэффициентов.

К первичным данным гироскопа, акселерометра и магнитометра применяются заранее определенные коэффициенты.

5. Оценка ориентации с дополнительной нелинейной фильтрацией UKF.

Скорректированные калибровочными коэффициентами измерительные данные (аналогично п. 3) подаются на фильтр UKF, а далее в алгоритм AHRS.

Для количественной оценки дрейфа угла рыскания выделялся низкочастотный тренд на всем интервале эксперимента. Ошибка аппроксимировалась сглаживающей полиномиальной регрессией (степень определялась по критерию наименьших квадратов), дрейф определялся как средняя скорость изменения выделенного тренда за время эксперимента. Средний коэффициент детерминации составил 0,78–0,85 в разных вариантах, что свидетельствует об устойчивости выявленного тренда. Полученные результаты представлены на рис. 3–5.

На рис. 3, *а* показаны результаты измерений угла рыскания без компенсации систематических погрешностей и использования магнитометра. Наблюдается линейный дрейф с накопленной ошибкой 610,8 град/ч. Это объясняется некомпенсированным смещением нуля и случайным блужданием гироскопа. На рис. 3, *б* показан вариант без компенсации систематических погрешностей, с использованием магнитометра, при этом дрейф снижается до 9,8 град/ч за счет периодической коррекции по магнитному полю Земли, однако остаточные систематические и нелинейные ошибки сенсоров продолжают вызывать медленный уход.

На рис. 4, *а* показан вариант результат для варианта, в котором исходные показания гироскопа, акселерометра и магнитометра предварительно корректировались с использованием калибровочных коэффициентов. Дрейф уменьшается до 4,8 град/ч. При этом характер накопления ошибки становится ближе к квадратичному (параболическому), что соответствует доминированию остаточных низкочастотных процессов, а именно нестабильности смещения и дрейфа угловой скорости. Это типично для «откалиброванных» MEMS-гироскопов на интервалах измерения длительностью до 1 ч, когда высокочастотные шумы подавлены, а низкочастотные начинают определять динамику ошибки.

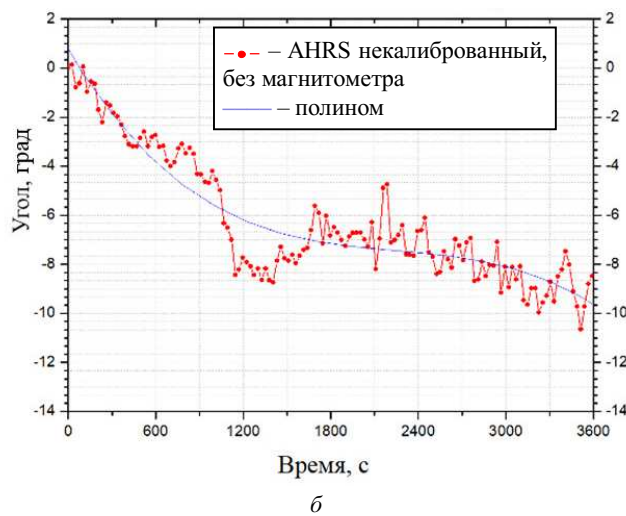
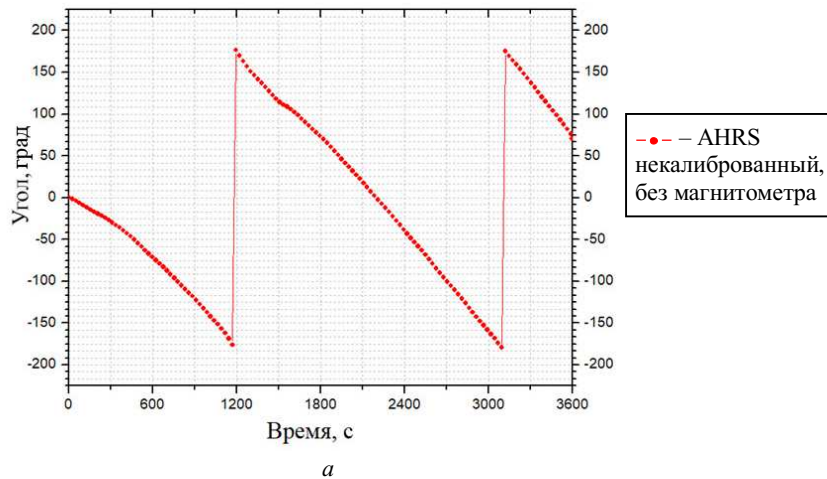


Рис 3

На рис. 4, *б* показан результат для варианта, в котором к исходным показаниям датчиков сначала применялись калибровочные коэффициенты, а затем скорректированные данные подвергались фильтрации UKF. Достигнут дрейф угла рыскания 1,9 град/ч. За счет учета статистических моделей шумов и нелинейной фильтрации UKF ошибка растет значительно медленнее и имеет более предсказуемый характер.

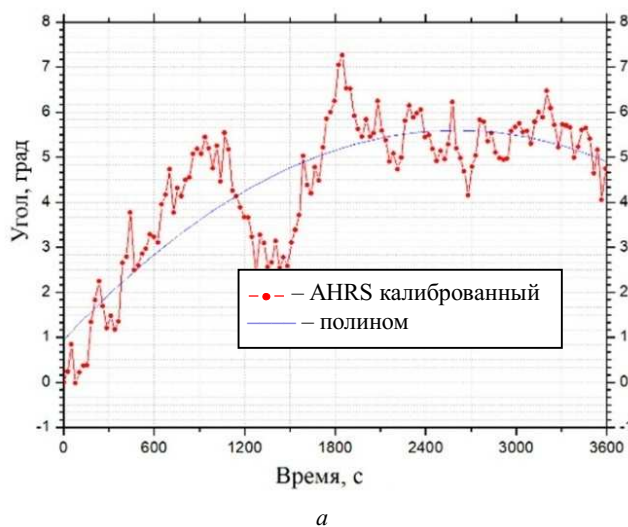


Рис. 4 (Начало)

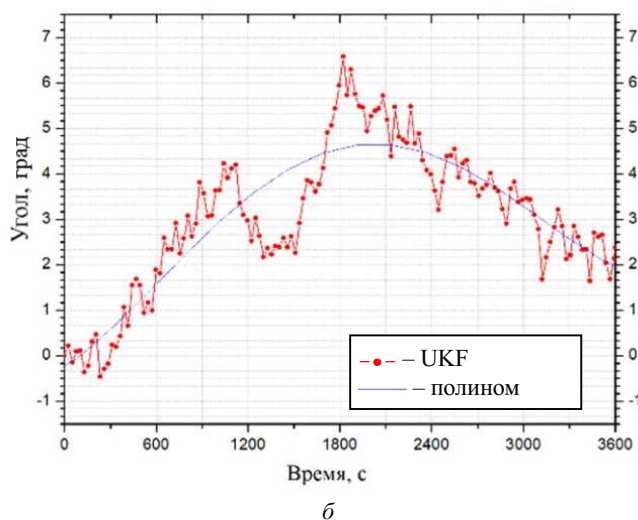


Рис. 4 (Окончание)

Рис. 5 показывает, что предложенный метод AHRS-оценки позволяет достичь устойчивого и ограниченного по величине дрейфа угла рыскания.

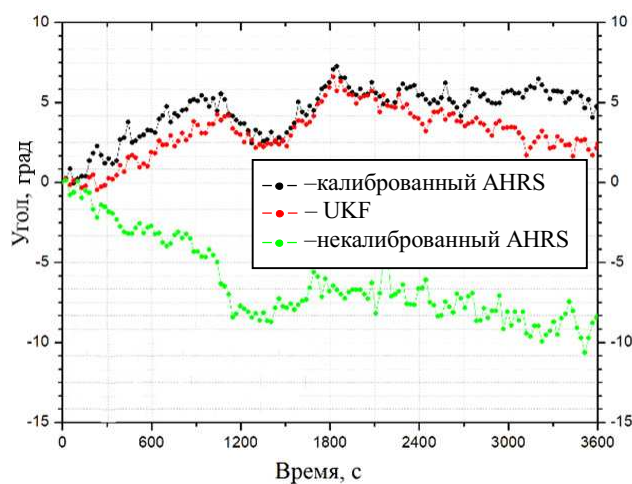


Рис. 5

Полученные данные демонстрируют, что интеграция предварительной стохастической калибровки сенсоров с нелинейной фильтрацией UKF позволяет достичь на порядок меньшего дрейфа по сравнению с традиционными подходами, основанными только на статической калибровке и комплементарных фильтрах.

Заключение

Традиционные методы формирования AHRS-оценок для мультироторных БЛА недостаточно эффективны в условиях высокой динамики полета и значительного уровня шумов низкобюджетных MEMS-датчиков. Согласно полученным экспериментальным результатам использование некалиброванных данных приводит к быстрому накоплению ошибки угла рыскания до 610,8 град/ч, что полностью исключает применение таких систем в задачах длительной автономной навигации. Магнитометр является обязательным компонентом для коррекции долгосрочного дрейфа по курсу.

Выполнение статической калибровки гироскопов, акселерометров и магнитометров с компенсацией смещений, масштабных коэффициентов и неортогональности осей, а также последующая коррекция по магнитометру позволили снизить дрейф угла рыскания до 4,8 град/ч по сравнению с 610,8 град/ч в базовом варианте без калибровки.

Наибольшая точность AHRS-оценки получена для варианта, в котором исходные показания датчиков сначала корректируются калибровочными коэффициентами, а затем обрабатываются фильтром UKF. Переход от AHRS-оценки, построенной на данных после применения калибровочных коэффициентов (4,8 град/ч), к их последующей нелинейной UKF-фильтрации позволил снизить дрейф угла рыскания до 1,9 град/ч, т. е. уменьшить скорость накопления ошибки примерно в два раза.

Полиномиальная аппроксимация тренда ошибки позволила не только количественно оценить дрейф, но и выявить ограничения статической калибровки: примерно после 1200–1800 с скорость накопления ошибок начинает возрастать, что указывает на необходимость перехода к адаптивным методам оценки шумов в длительных полетах.

Важно отметить, что в работе использовались датчики потребительского класса – трехосный акселерометр/гироскоп BMI270 и трехосный магнитометр LIS3MDL. Оба этих датчика относятся к низкобюджетному сегменту, отличаются высокой доступностью и малой стоимостью по сравнению с промышленными инерциальными модулями, такими, как ADIS16448. Полученный уровень дрейфа в 1,9 град/ч (в контролируемых лабораторных условиях без сильных магнитных помех) при использовании именно таких сенсоров с низкой стоимостью демонстрирует высокую эффективность предложенного универсального подхода и открывает перспективы его применения в массовых автономных системах мультироторных БЛА различных конфигураций.

Универсальность подхода применительно к различным кинематическим схемам БЛА обеспечивается его инвариантностью к модели движения летательного аппарата, однако окончательное подтверждение эффективности для конкретных типов платформ (квадрокоптер, гексакоптер) требует проведения натурных летных испытаний, что является целью дальнейших исследований. Дальнейшее развитие метода предполагает внедрение адаптивной оценки параметров шумов в реальном времени, что позволит компенсировать температурные, вибрационные и другие внешние дрейфы, возникающие при продолжительной эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jordin A., Basri M.A.M., Mohamed Z.* Sensor Fusion for Attitude Estimation and PID Control of Quadrotor UAV // *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*. 2018. Vol. 7. № 4. P. 183–189.
2. *Garcia de Marina H. et al.* UAV Attitude Estimation Using Unscented Kalman Filter and TRIAD // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012. Vol. 59. № 11. P. 4465–4474.
3. *Kingston D., Beard R.* Real-Time Attitude and Position Estimation for Small UAVs Using Low-Cost Sensors // *Proc. of the 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference, Workshop and Exhibit*, Sept. 20–23, 2004, Chicago, USA. AIAA Paper № 6488.
4. *Karal Ö., Kazdal H.* A New Fuzzy Logic-Based Adaptive Complementary Filter Algorithm for UAV Attitude Estimation // *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2024. Vol. 30. № 3. P. 324–332.
5. *Kazemi M., Banaeyan M., Pourmohammad A.* UAV Navigation Based on PIIFD/INS Method // *International Journal of Computer Theory and Engineering*. 2012. Vol. 4. № 2. C. 283–287.
6. *Jung D., Tsiotras P.* Inertial Attitude and Position Reference System Development for a Small UAV // *Proc. of the Infotech Aerospace 2007 Conference and Exhibit*, May 7–10, 2007, Rohnert Park, USA. AIAA Paper № 2763.
7. *Quoc D.D. et al.* Attitude Estimation Algorithms Using Low Cost IMU // *International Journal of Control and Automation*. 2015. Vol. 8. № 11. C. 113–126.
8. *Веселов Г.Е., Алин И.А.И.* Синергетический синтез закона управления БЛА в условиях ветровых возмущений с входными ограничениями // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2020. № 2 (212). С. 101–112.
9. *Noordin A., Basri M.A.M., Mohamed Z.* Sensor Fusion Algorithm by Complementary Filter for Attitude Estimation of Quadrotor with Low-Cost IMU // *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*. 2018. Vol. 16. № 2. C. 868–875.
10. *Song J., Rondao D., Aouf N.* Deep Learning-Based Spacecraft Relative Navigation Methods: A Survey // *Acta Astronautica*. 2022. Vol. 191. P. 22–40.
11. *Ko N.Y. et al.* Lie Group Approach to Dynamic-Model-Aided Navigation of Multicopter Unmanned Aerial Vehicles // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 72717–72730.

12. *Shakerian A. et al.* Calibration of 3-Axis Low-Cost Magnetometer Using the Least Square Ellipsoid Fitting Algorithm // *International Journal of Sensors and Sensor Networks*. 2023. Vol. 11. № 1. С. 18–24.
13. *Литвин М.А. и др.* Типы ошибок в инерциальных навигационных системах и методы их аппроксимации // *Информационные процессы*. 2014. № 4. С. 326–339.
14. *Madgwick S.O.H., Harrison A.J.L., Vaidyanathan R.* Estimation of IMU and MARG Orientation Using a Gradient Descent Algorithm // *Proc. of the IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, June 29 – July 1, 2011, Zurich, Switzerland. P. 1–7.
15. *Юхимец Д.А., Белоусов М.Д., Губанков А.С.* Разработка информационно-управляющей системы для гибридного необитаемого подводного аппарата на основе платформы ROS2 // *Морские интеллектуальные технологии*. 2023. № 4-1 (62). С. 143–151.
16. *Kaba A.* Unscented Kalman Filter Based Attitude Estimation of a Quadrotor // *Journal of Aeronautics and Space Technologies*. 2021. Vol. 14. № 1. P. 79–88.
17. *Carraro A.* Application of Different Types of Kalman Filter to Approximate State of an UAV Model: Master's Thesis. Venezia: Università Ca' Foscari Venezia, 2021. 78 p.
18. *De Marina H.G., Espinosa F., Santos C.* Adaptive UAV Attitude Estimation Employing Unscented Kalman Filter, FOAM and Low-Cost MEMS Sensors // *Sensors*. 2012. Vol. 12. № 7. P. 9566–9585.

Поступила в редколлегию 16.12.25

UNIVERSALIZED PROCEDURE FOR FORMING AHRS ESTIMATES FOR MULTIROTOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

**M.S. Azov, I.G. Galiullin, E.S. Gustov, D.E. Chikrin, and
A.F. Fakhrutdinov**

This paper proposes a universalized approach to forming Attitude and Heading Reference System (AHRS) estimates for multirotor unmanned aerial vehicles in the absence of global positioning system signals. The problems of orientation error accumulation caused by high dynamics of motion and noises of low-cost MEMS sensors are considered. A methodology for preliminary calibration of inertial sensors (gyroscopes, accelerometers, magnetometers) based on the analysis of power spectral density and Allan deviation is presented. For data filtering, the use of the Unscented Kalman Filter is proposed, which provides accurate estimation of spatial position in nonlinear dynamic systems. Computational modeling and experimental verification on a rotating platform were conducted, showing that the application of unscented Kalman filter combined with sensor calibration reduces yaw angle drift to 1,9°/h, which is orders of magnitude more accurate than traditional methods. The results can be used in the development of autonomous navigation systems for multirotor unmanned aerial vehicles of various configurations.

Keywords: AHRS, multirotor unmanned aerial vehicles, unscented Kalman filter, sensor calibration, inertial measurement units, yaw angle drift, autonomous navigation.

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

Галиуллин Искандер Гаязович – канд. техн. наук (КФУ, Казань)
E-mail: isgaliullin@gmail.com

Густов Егор Сергеевич – техник-проектировщик (КФУ, Казань)
E-mail: jegorustow@gmail.com

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

Фахрутдинов Адель Фердинандович – ведущий программист-инженер (КФУ, Казань)
E-mail: timvaz@yandex.ru

КОАКСИАЛЬНЫЕ КАБЕЛЬНЫЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ ФАБРИ – ПЕРО В ЗАДАЧАХ КОНТРОЛЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКИХ СРЕД

О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, О.В. Никишина

Проведен анализ характеристик и конструктивных особенностей нового класса чувствительных элементов – коаксиальных кабельных интерферометров Фабри – Перо – для решения задач мониторинга диэлектрической проницаемости жидких сред. Цель работы – определение их предельных возможностей и выявление основных источников погрешностей определения основного измеряемого параметра. Рассмотрены основные факторы, влияющие на точность измерений – температура, деформация, тип конструкции коаксиального кабеля и контакт с жидкой средой. Поставлены задачи дальнейших исследований, направленных на снижение влияния перечисленных факторов, в основе которых лежат технологии, применяемые в волоконно-оптических интерферометрах Фабри – Перо.

Ключевые слова: интерферометр Фабри – Перо, коаксиальный кабель, диэлектрическая проницаемость жидких сред, контактные и бесконтактные методы измерений, полимерное, металлокерамическое и воздушное заполнение кабеля, температура, деформации.

Принцип трансфера технологий между оптическим и радиодиапазоном частот заключается в создании аналогов устройств, отличающихся от оригинала физической реализацией, но сохраняющего свои принципиальные особенности [1]. В последнее время активно разрабатываются принципы трансфера технологий для устройств со структурной периодичностью, включая СВЧ-фотонные кристаллы [2], коаксиальные кабельные брэгговские структуры [3], коаксиальные кабельные интерферометры Фабри – Перо [4] и др. Коаксиальная кабельная брэгговская структура, как аналог волоконной брэгговской решетки, широко используется в измерительной технике деформаций и температуры. Изучение свойств волоконной брэгговской решетки в оптическом диапазоне электромагнитных волн может способствовать открытию новых свойств и явлений в радиодиапазоне для коаксиальных кабельных брэгговских структур, и наоборот.

Преимущества волоконной брэгговской решетки [5] по сравнению с другими волоконно-оптическими датчиками заключаются в уникальном преобразовании измеренного значения в смещение длины волны отраженного или прошедшего излучения и возможности простого изготовления. Спектральные характеристики волоконной брэгговской решетки имеют резонансный характер, но функция преобразования «длина волны – амплитуда», используемая для их оценки в области резонанса, демонстрирует либо выраженные осцилляции, либо относительно сглаженный профиль.

Для достижения высокого разрешения в различных сенсорных системах на основе волоконной брэгговской решетки используется анализ сдвига центральной длины волны решетки, а также более сложные конфигурации, такие, как интерферометр Фабри – Перо на основе двух волоконных брэгговских решеток, характеризующийся наличием очень узкого резонанса и широко используемый на практике.

По аналогии структура с узким резонансом может быть реализована в коаксиальном кабеле при формировании в нем двух коаксиальных кабельных брэгговских структур с определенным расстоянием между ними. Сформированный в этом случае узкий резонанс в отражении может быть использован для повышения точности измерения параметров диэлектрических жидкостей. Однако коаксиальная кабельная брэгговская структура представляет собой достаточно длинную структуру с множеством распределенных неоднородностей, что создает ограничения для проведения измерений в малых объемах. В связи с этим множество неоднородностей коаксиальной кабельной брэгговской структуры могут быть заменены на две отдельные неоднородности, что существенно сократит физическую длину датчика. Такая структура получила название коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо [4].

В статье на основании сравнительного анализа свойств контактных и бесконтактных датчиков, реализованных на базе коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо, установлены их предельные метрологические характеристики, идентифицированы источники погрешностей, а также определены перспективные направления дальнейшего совершенствования применительно к задачам измерения диэлектрической проницаемости жидких сред.

Коаксиальный кабельный интерферометр Фабри – Перо схематично показан на рис. 1.

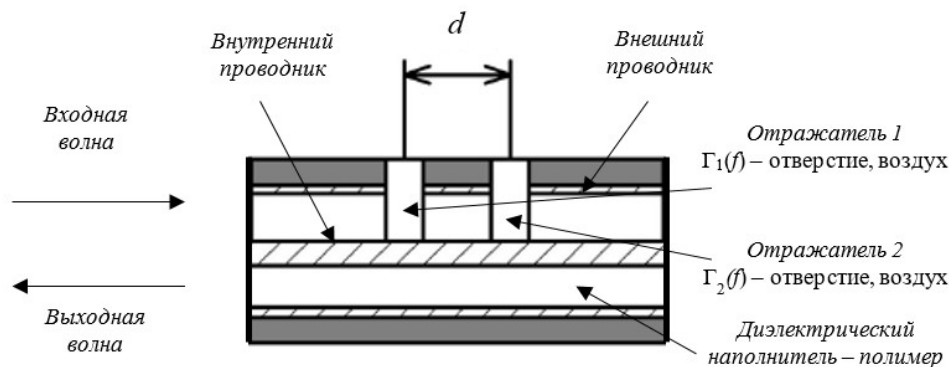


Рис. 1

Два отражателя в коаксиальном кабеле [6] формируются методом сверления. Когда входная электромагнитная волна подается в коаксиальный кабель, она частично отражается от двух отражателей, расположенных на расстоянии d друг от друга. Отраженная волна представляет собой интерференцию двух отраженных волн с разностью фаз.

Отражатели характеризуются низкой отражательной способностью. В результате многократные отражения между ними можно считать незначительными и не учитывать при расчете. Предполагая, что амплитудные коэффициенты отражения двух отражателей одинаковы, две отраженные волны (U_1 и U_2) можно записать как

$$U_1 = \Gamma(f) \exp(-\alpha z_1) \cos(2\pi f t); \quad (1)$$

$$U_2 = \Gamma(f) \exp(-\alpha z_2) [\cos(2\pi f(t + \tau))]; \quad (2)$$

$$\tau = 2d \sqrt{\epsilon_r} / c, \quad (3)$$

где $\Gamma(f)$ – амплитудный коэффициент отражения отражателя; f – частота электромагнитной волны, распространяющейся внутри кабеля; α – коэффициент потерь при распространении; z – координаты отражателей по оси кабеля; τ – временная задержка между двумя отраженными волнами; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость внутреннего диэлектрического наполнителя кабеля; c – скорость света в вакууме.

Две отраженные волны имеют временную задержку, которая связана с расстоянием между двумя отражателями и фазовой скоростью волны. Интерференционный сигнал U представляет собой сумму двух отраженных волн, которую можно записать как

$$U = 2\Gamma(f) \exp(-\alpha z) \cos(2\pi f \tau) [\cos(2\pi f(t + \tau))]. \quad (4)$$

Уравнение (4) описывает волну с амплитудой $2\Gamma(f) \exp(-\alpha z) \cos(2\pi f \tau)$ и фазой $2\pi f \tau$. Амплитуда и фаза изменяются как функции частоты и временной задержки τ . По сути, амплитуда спектра изменяется синусоидально при сканировании частоты зондирующей волны.

В (4) единственным неизвестным параметром является коэффициент отражения $\Gamma(f)$, который зависит от ϵ_{rd} – относительной диэлектрической проницаемости диэлектрического заполнения отверстий, формирующих коаксиальный кабельный интерферометр Фабри – Перо. Коаксиальная кабельная бреггов-

ская структура с фазовым сдвигом является аналогом коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо с длиной резонатора d , равной нечетному числу ее полупериодов. Коаксиальная кабельная брэгговская структура с фазовым сдвигом π может использоваться для повышения чувствительности измерителей диэлектрической проницаемости жидких сред на основе анализа частотной зависимости коэффициента отражения кабеля от диэлектрической постоянной и тангенса диэлектрических потерь жидкости, заполняющей неоднородность. Так, в работе [1] приведена зависимость частотной характеристики $|S_{11}|$ коаксиальной кабельной брэгговской структуры с фазовым сдвигом от ϵ_{rd} (таблица).

Параметры	ϵ_{rd}							
	3	4	5	6	7	8	9	10
$ S_{11} $, у.е.	0,75	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,15	0,1
f , ГГц	2,70	2,725	2,75	2,775	2,8	2,82	2,84	2,86

Как видно из таблицы, контроль диэлектрической постоянной жидкой среды, заполняющей отверстие коаксиального кабеля, методом измерения смещения узкой резонансной частоты коаксиальной кабельной брэгговской структуры с помощью сканирующего векторного анализатора характеризуется достаточно высоким разрешением. Дальнейшее увеличение разрешения возможно, если коаксиальный кабельный интерферометр Фабри – Перо будет формироваться по всей длине резонатора, для чего она должна быть заполнена исследуемой жидкой средой.

При условии заполнения тестируемой жидкостью всего резонатора коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо фазовая задержка δ между двумя волнами определяется формулой

$$\delta = 4\pi fd \sqrt{\epsilon_r} / c. \quad (5)$$

Когда фазовая задержка равна $2m\pi$ (m – целое число, т. е. 1, 2, 3, ...), в спектральной области можно получить резонансную картину. Резонансная частота f_{res} в спектре отражения может быть записана как расстояние между двумя последовательными минимумами спектра, определяемое как свободный спектральный диапазон FSR , который выражается как

$$FSR = c / 2d \sqrt{\epsilon_r}. \quad (6)$$

Когда спектр смещается из-за изменения диэлектрической постоянной жидкой среды, заполнившей отверстия отражателей, сдвиг резонансной частоты может быть рассчитан по формуле

$$\Delta f_{res} = -f_{res} \Delta \epsilon_r / 2\epsilon_r = -mc \Delta \epsilon_r / 4d \epsilon_r^{3/2}. \quad (7)$$

Таким образом, изменение диэлектрической постоянной жидкой среды в отверстии отражателя может быть определено мониторингом сдвига резонансной частоты при фиксированной длине полости.

Из формулы (7) видно, что чувствительность измерения диэлектрической постоянной жидкости $\Delta f / \Delta \epsilon_r$ для коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо составляет $-mc \Delta \epsilon_r / 4d \epsilon_r^{3/2}$, что пропорционально числу m (номер гармоники) и обратно пропорционально физической длине между отражателями d и абсолютной диэлектрической постоянной анализируемого жидкого вещества ϵ_r . Следует отметить, что формула (7) используется для измерения изменения диэлектрической постоянной $\Delta \epsilon_r$, а не ее абсолютного значения ϵ_r . Чувствительность измерения изменения диэлектрической постоянной можно считать линейной, если изменение мало.

Для измерения абсолютного значения диэлектрической постоянной жидкости используется (6) получением FSR из записанного спектра отражения, где физическая длина между отражателями d и скорость света в вакууме c являются математическими константами.

Рассмотрим варианты внутреннего [7] рис. 2 и концевой [8] (рис. 3) коаксиальных кабельных интерферометров Фабри – Перо с заполненным резонатором.

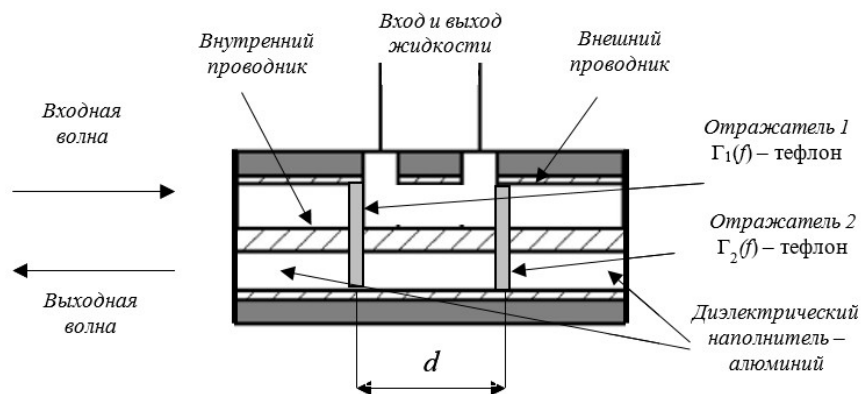


Рис. 2

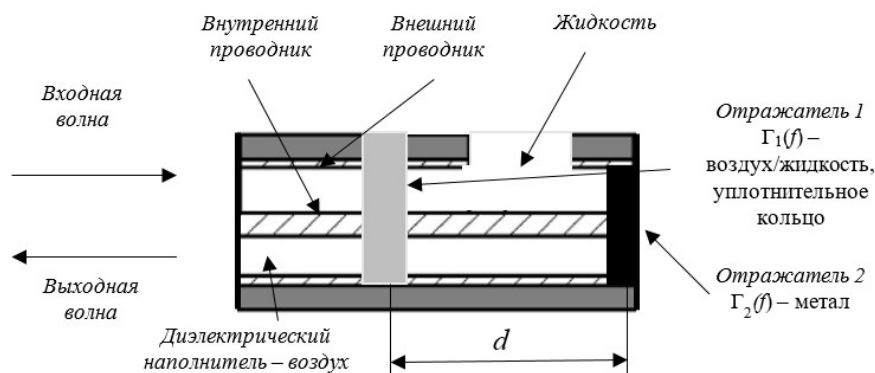


Рис. 3

Во внутреннем коаксиальном кабельном интерферометре Фабри – Перо использован металлокерамический коаксиальный кабель с заполнением оксидом алюминия и тефлоновыми отражателями. Резонансная частота коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо при сканировании определялась в диапазоне 0,1...6 ГГц, а амплитуда отклика калибровалась по диэлектрической проницаемости сухого воздуха. Поскольку при изменении температуры диэлектрическая проницаемость сухого воздуха изменяется незначительно (10^{-4}), то погрешность ее измерения в диапазоне температур 20...50 °С составляет 10^{-2} и определяется расстоянием d , а также приборной погрешностью векторного анализатора цепей [7].

В концевом коаксиальном кабельном интерферометре Фабри – Перо [8] использован коаксиальный кабель с воздушным заполнением и двумя отражателями, первый из которых сформирован переходом «воздух – жидкость», а второй – закорачивающим металлическим диском. Резонансная частота коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо при сканировании определялась в диапазоне 0,01...1,2 ГГц, а амплитуда отклика также калибровалась по диэлектрической проницаемости сухого воздуха. Погрешность ее измерения при температуре 20 ± 1 °С составила 10^{-4} , при этом температурный режим выдерживался с погрешностью в 0,01 °С [8], и его влияние на погрешность измерения не учитывалось.

На рис. 4 показана схематическая диаграмма концевого бесконтактного коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо [9].

Использовался полый воздушный коаксиальный кабель с внутренним и внешним проводниками из нержавеющей стали. Конструкция кабеля обеспечивает характеристическое сопротивление приблизительно 50,8 Ом для согласования с коммерческим гибким коаксиальным кабелем 50 Ом. Кроме того, она обеспечивает гораздо более высокую термостойкость по сравнению с традиционными микроволновыми датчиками (например, коаксиальным кабельным интерферометром Фабри – Перо на гибких полимерных кабелях или кольцевыми резонаторами на основе печатных плат [10]). В отличие от ранее исследованных коаксиальных кабельных интерферометров Фабри – Перо, предлагаемая конструкция отражателей ха-

рактируется высокими значениями коэффициента отражения. Отражатель первого типа выполнен в виде цилиндрического стального стержня диаметром 3 мм, обеспечивающего замыкание внутреннего и внешнего проводников, с коэффициентом отражения, превышающим 70 %. Отражатель второго типа представляет собой кольцевую структуру, демонстрирующую отражательную способность более 90 %. Коэффициенты отражения двух отражателей так же, как и в других конструкциях, являются функциями частоты. В данном случае следует отметить, что 70 и 90 % – это стабильные значения отражательной способности, не изменяющейся в диапазоне частот сканирования векторного анализатора цепей 0,3...6 ГГц [10].

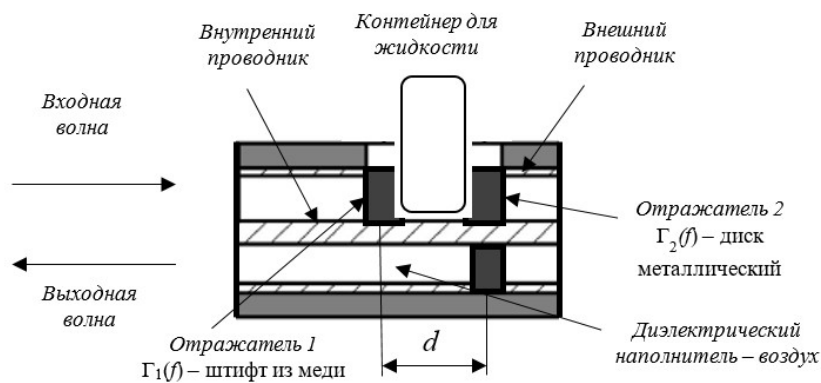


Рис. 4

Когда микроволновый сигнал подается в полый коаксиальный кабельный интерферометр Фабри – Перо, большая часть сигнала отражается от первого отражателя, а оставшаяся часть сигнала распространяется ко второму отражателю с фазовой задержкой. На втором отражателе снова отражается большая часть сигнала. Внутри полости, образованной двумя отражателями, происходят многократные отражения, в результате чего образуется резонатор Фабри – Перо. Амплитуду спектра отражения U с учетом многократных отражений можно рассчитать по формуле

$$U = \sqrt{\frac{\Gamma_1^2(f) - 2\Gamma_1(f)\Gamma_2(f)\exp(-\alpha z)\cos\delta + (\Gamma_2(f)\exp(-\alpha z))^2}{1 - 2\Gamma_1(f)\Gamma_2(f)\exp(-\alpha z)\cos\delta + \Gamma_1^2(f)(\Gamma_2(f)\exp(-\alpha z))^2}} \quad (8)$$

Как видно из рис. 4, в конструкции резонатора Фабри – Перо выполнена открытая канавка, которая приводит к утечке электромагнитной волны, передающей сигнал внутри коаксиального кабеля. Когда контейнер, заполненный жидкостью, подносят к открытой канавке, просачивающаяся электромагнитная волна будет взаимодействовать с частью жидкости внутри контейнера. Поскольку относительная диэлектрическая проницаемость жидкости отличается от диэлектрической проницаемости воздуха, эффективная относительная диэлектрическая проницаемость среды резонансной полости изменится, что приведет к сдвигу резонансной частоты. Таким образом, диэлектрические свойства исследуемой жидкости можно определить, отслеживая сдвиг резонансной частоты, если известен объем жидкости, взаимодействующей с электромагнитной волной.

Поскольку в качестве сред, формирующих резонатор, используются различные материалы (воздух, стекло, жидкость), эффективная относительная диэлектрическая проницаемость среды может быть выражена как

$$\sqrt{\epsilon_r}d = mc/2f_{\text{res}} = \sqrt{\epsilon_a}d_a + \sqrt{\epsilon_g}d_g + \sqrt{\epsilon_l}d_l, \quad (9)$$

где ϵ_a , ϵ_g , ϵ_l и d_a , d_g , d_l – относительная диэлектрическая проницаемость и эффективные длины заполняющего резонатор воздуха, стекла и жидкости.

Резонансная частота коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо при сканировании определялась в диапазоне 2,35...2,6 ГГц, а амплитуда отклика также калибровалась по диэлектрической

проницаемости сухого воздуха. Погрешность измерения диэлектрической проницаемости в работе [9] составила 10^{-4} , при этом контроль температурного режима, несмотря на жесткость конструкции и ее устойчивость к изменению температуры, осуществлялся. Это обусловлено тем, что внесение в резонатор отличных по температуре стекла и жидкости вызывало переходный процесс в ходе измерений.

Для оценки влияний факторов окружающей среды (температуры, деформации) на погрешность измерения диэлектрической проницаемости с помощью коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо [11] выразим (7) как относительный сдвиг резонансной частоты без учета знака изменения:

$$\Delta f_{\text{res}}/f_{\text{res}} = (\Delta d/d) + (\Delta \epsilon_r/2\epsilon_r). \quad (10)$$

Когда коаксиальный кабель удлиняется с изменением деформации $\Delta \epsilon$, длина кабеля d увеличится на Δd , а диэлектрическая постоянная ϵ_r уменьшится на $\Delta \epsilon_r$:

$$\Delta d/d = \Delta \epsilon; \quad \Delta \epsilon_r/\epsilon_r = -P_{\text{eff}}\Delta \epsilon, \quad (11)$$

где P_{eff} – эффективный коэффициент Поккельса внутреннего диэлектрического материала в коаксиальном кабеле.

Следовательно, относительный сдвиг резонансной частоты можно переписать как

$$\Delta f_{\text{res}}/f_{\text{res}} = (P_{\text{eff}}/2 - 1)\Delta \epsilon = -\Delta \epsilon. \quad (12)$$

Поскольку значение коэффициента Поккельса в коаксиальном кабеле обычно меньше единицы, изменение деформации $\Delta \epsilon$ приблизительно равно относительному сдвигу резонансной частоты. При разработке коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо для измерения диэлектрической проницаемости жидких сред можно конструктивно избежать механического деформационного удлинения или укорочения кабеля.

Когда температура окружающей среды вокруг кабеля увеличивается на ΔT , диэлектрическая постоянная ϵ_r и длина d изменяются на $\Delta \epsilon_r$ и Δd :

$$\Delta d/d = \alpha_{\text{СТЕ}}\Delta T; \quad \Delta \epsilon_r/\epsilon_r = \alpha_{\text{ТСК}}\Delta T, \quad (13)$$

где $\alpha_{\text{СТЕ}}$, $\alpha_{\text{ТСК}}$ – температурные коэффициенты теплового расширения и диэлектрической постоянной.

Объединив эти два фактора, относительный сдвиг резонансной частоты можно переписать следующим образом:

$$\Delta f_{\text{res}}/f_{\text{res}} = (\alpha_{\text{СТЕ}} + \alpha_{\text{ТСК}}/2)\Delta T. \quad (14)$$

Из (14) видно, что тепловое расширение и диэлектрический тепловой эффект могут вносить вклад в относительный сдвиг резонансной частоты. Эта ошибка может привести к температурным перекрестным помехам в коаксиальном кабельном интерферометре Фабри – Перо и повлиять на точность его измерения. При этом, если $P_{\text{eff}} = 0$, а $\alpha_{\text{СТЕ}} = 120 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_{\text{ТСК}} = 100 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, изменение температуры на $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ может привести к эквивалентному изменению деформации на $170 \text{ } \mu\epsilon$. Таким образом, даже после калибровки практических коаксиальных кабельных интерферометров Фабри – Перо неизбежно будет присутствовать случайная ошибка определения диэлектрической проницаемости или ограничение по конечной точности. В этом случае собственная точность коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо подавляется температурными помехами. В связи с этим для уменьшения и устранения температурных помех эффективный коэффициент теплового расширения, включающий и $\alpha_{\text{СТЕ}}$, и $\alpha_{\text{ТСК}}$, должен быть достаточно низким.

Таким образом, при проектировании коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо необходимо исключить как влияние деформации, так и температуры за счет применения специальных наполнителей в коаксиальных кабелях или методов, применяемых в волоконных технологиях.

Коаксиальный кабельный интерферометр Фабри – Перо в области измерения диэлектрической проницаемости жидких сред не является стандартным промышленным инструментом мониторинга, и для продвижения этой технологии до уровня практически применимого продукта требуются дальнейшие исследования. Потенциальные преимущества использования коаксиальных кабельных интерферометров Фабри – Перо, дополняющих или заменяющих волоконные устройства, многочисленны.

Коаксиальные кабели могут выдерживать более интенсивное воздействие сложных, агрессивных условий окружающей среды по температуре и деформациям. Повышенная механическая прочность конструкции коаксиального кабеля обуславливает его устойчивость к более сложным процедурам установки. Методы конструирования и производства, а также методы сбора и анализа сигнала с коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо отличаются меньшей сложностью, что обуславливает их потенциальную экономическую эффективность.

Однако результаты проведенного анализа литературных источников свидетельствуют о том, что трансформация концепции коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо в технологически реализуемое решение требует решения ряда научно-исследовательских задач.

Измерения диэлектрической проницаемости жидких сред с помощью коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо могут иметь существенную погрешность в результате свертки с эффектами деформации и температуры. Оба фактора окружающей среды негативно влияют на параметры интерферограмм для определения диэлектрической проницаемости.

Свертку эффектов деформации и температуры можно минимизировать, выбирая диэлектрические материалы, которые проявляют преимущественную чувствительность к деформации или температуре в зависимости от того, какое условие необходимо контролировать (можно применить коаксиальные кабели в низко-жестком резиновом или жестком металлокерамическом исполнении).

По аналогии с волоконными технологиями [12, 13] можно использовать эталонный коаксиальный кабельный интерферометр Фабри – Перо наряду с коаксиальным кабельным интерферометром Фабри – Перо, контролирующим деформацию, или коаксиальной кабельной брэгговской структурой для компенсации температуры.

По аналогии с волоконными технологиями [14] можно использовать метод двух волокон, позволяющий одновременно контролировать деформацию и температуру либо один из факторов для компенсации другого.

Возможна разработка коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо, комбинированного с волоконными интерферометрами Фабри – Перо или волоконными брэгговскими решетками для решения задач компенсации.

Применение методов анализа сигналов для мониторинга параметров интерферограмм представляет собой ключевой подход к определению влияния температуры на измерения деформации. Современные достижения в области машинного обучения и нейронных сетей обеспечивают возможность ускоренной классификации изменений интерферограмм для определения диэлектрической проницаемости жидких сред, вызванные температурой и деформацией, методом восстановления обратной сверткой влияния эффектов окружающей среды.

Поставленные задачи определяют несомненную актуальность дальнейших исследований коаксиальных кабельных интерферометров Фабри – Перо для их развития и практической пригодности не только в лабораторных, но и в полевых условиях для мониторинга диэлектрической проницаемости жидких сред.

В статье кратко рассмотрены современные достижения в области применения коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо для решения задач характеристики жидкостей на основе их диэлектрической проницаемости. Были продемонстрированы их возможности и преимущества перед волоконно-оптическими аналогами и резонансными сенсорами на печатных платах. Коаксиальные кабельные интерферометры Фабри – Перо являются платформой для разработки мультиплексных, недорогих, надежных и устойчивых по температуре датчиков, поскольку для их изготовления можно использовать проводящие материалы с высокой термической и деформационной стабильностью. Кроме того, отмеча-

ется высокая линейность отклика и большой динамический диапазон измерений. Однако перед их использованием в полевых условиях необходимы дополнительные исследования по обеспечению универсальной деформационной и температурной стабильности, не всегда достижимой конструктивными решениями. Показаны примеры, при которых изменение параметров окружающей среды может привести к погрешностям, превышающим разрешающую способность измерения диэлектрической проницаемости жидких сред или приводящим к ограничению их точности. Для развития платформы коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо в практически пригодную технологию в статье поставлены научно-исследовательские задачи и предложены решения, направленные на повышение их универсальной деформационной и температурной стабильности.

Работа выполнена за счет предоставленного в 2025 г. Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и поисковых исследований в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Morozov O.G. et al.* Special Types of FBG and CoaxBG Structures for Telecommunication and Monitoring Systems // Proceedings of SPIE. 2015. Vol. 9533. Article № 95330C.
2. *Zhu C., Alsalmán O., Huang J.* From Fiber Bragg Gratings to Coaxial Cable Bragg Gratings: One-Dimensional Microwave Quasi-Periodic Photonic Crystals // Journal of Applied Physics. 2023. Vol. 133. № 16. Article № 164503.
3. *Wei T. et al.* Coaxial Cable Bragg Grating // Applied Physics Letters. 2011. Vol. 99. № 11. Article № 113517.
4. *Zhu C., Huang J.* Coaxial Cable Sensing: Review and Perspective // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2024. Vol. 72. № 3. P. 1790–1809.
5. *Alhussein A.N.D. et al.* Fiber Bragg Grating Sensors: Design, Applications, and Comparison with Other Sensing Technologies // Sensors. 2025. Vol. 25. № 7. Article № 2289.
6. *Ahmed M.F. et al.* High Quality Factor Coaxial Cable Fabry–Perot Resonator for Sensing Applications // IEEE Sensors Journal. 2017. Vol. 17. P. 3052–3057.
7. *Zeng S. et al.* A Metal-Ceramic Coaxial Cable Fabry–Pérot Microwave Interferometer for Monitoring Fluid Dielectric Constant // Sensors and Actuators A: Physical. 2017. Vol. 257. P. 1–7.
8. *Zhu C. et al.* A Hollow Coaxial Cable Fabry–Pérot Resonator for Liquid Dielectric Constant Measurement // Review of Scientific Instruments. 2018. Vol. 89. № 4. Article № 045003.
9. *Zhu C. et al.* Contactless Liquid Interface Measurement Based on a Hollow Coaxial Cable Resonator // Sensors and Actuators A: Physical. 2019. Vol. 285. P. 623–627.
10. *Lee C.S., Yang C.-L.* Complementary Split-Ring Resonators for Measuring Dielectric Constants and Loss Tangents // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2014. Vol. 24. № 8. P. 563–565.
11. *Cheng B.* Coaxial Cable Sensors Based on Fabry-Perot Interferometers and Their Applications in Distributed Sensing [Electronical Resource]. URL: https://tigerprints.clemson.edu/all_dissertations/2028 (дата обращения: 10.02.2026).
12. *Белов Э.В. и др.* Одномерный инклинометр. Численное моделирование // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2020. № 1. С. 35–39.
13. *Белов Э.В. и др.* Математическая модель одномерного инклинометра // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2020. № 1. С. 40–45.
14. *Федотов М.Ю.* Теоретические исследования термокомпенсации результатов диагностики полимерных композитов методом двух оптических волокон // Дефектоскопия. 2023. № 10. С. 53–65.

Поступила в редколлегию 10.03.26

COAXIAL CABLE FABRY–PEROT INTERFEROMETERS IN LIQUID MEDIA DIELECTRIC CONTROL

O.G. Morozov, G.A. Morozov, and O.V. Nikishina

This paper analyzes the characteristics and design features of a new class of sensing elements – coaxial cable Fabry–Perot interferometers – for monitoring the permittivity of liquid media.

The aim of the study is to determine their ultimate capabilities and identify the main sources of error in determining the primary measured parameter. Key factors influencing measurement accuracy are considered, including temperature, deformation, coaxial cable construction, and contact with the liquid medium. Further research is outlined to reduce the impact of these factors, using technologies employed in fiber-optic Fabry–Perot interferometers.

Keywords: Fabry–Perot interferometer; coaxial cable; permittivity of liquid media; contact and non-contact measurement methods; polymer, metal-ceramic, and air-filled cables; temperature; deformation.

Морозов Олег Геннадьевич – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: ogmorozov@kai.ru

Морозов Геннадий Александрович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: gamorozov@kai.ru

Никишина Ольга Викторовна – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: kazpa@mail.ru

ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ НА ПОЛОМ ВОЗДУШНОМ И ДВУХ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КООКСИАЛЬНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРАХ ФАБРИ – ПЕРО

О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, О.В. Никишина, Р.В. Фархутдинов

Проведен анализ характеристик и конструктивных особенностей нового класса чувствительных элементов для измерителей уровня жидкости с микрометрическим разрешением. Цель работы – компенсация погрешности измерений измерителя уровня жидкостей на базе полого воздушного коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо, вызванной перекрестной чувствительностью к изменениям температуры. Для достижения цели предложено применение в его структуре двух металлокерамических коаксиальных кабельных интерферометров Фабри – Перо, реализующих термокомпенсирующий подход на основе метода двух коаксиальных кабелей, как аналога метода двух волокон в оптическом диапазоне. Как дополнительный положительный эффект такого подхода отмечается устранение влияния погрешности, вызванной дрейфом сканирующей частоты векторного анализатора цепей, используемого для опроса интерферометров.

Ключевые слова: измеритель уровня жидкости, интерферометр Фабри – Перо, полый воздушный и металлокерамический коаксиальный кабель, компенсация перекрестной температурной чувствительности, метод двух коаксиальных кабелей.

Несмотря на значительные усилия, затраченные на разработку волоконно-оптических измерителей уровня жидкости, их практическое внедрение по-прежнему сопряжено с серьезными трудностями [1, 2]. Основные ограничения обусловлены следующими факторами: волоконно-оптические датчики характеризуются повышенной хрупкостью и склонностью к механическим повреждениям, а их долговременная стабильность остается главным источником погрешности измерений. Кроме того, производство таких датчиков является дорогостоящим и технологически сложным, особенно при использовании специализированных оптических волокон или формировании особых структур с применением лазерной микрообработки либо метода катастрофического плавления, что негативно сказывается на структурной целостности волокна [3]. Дополнительным существенным недостатком большинства представленных волоконно-оптических измерителей уровня жидкости является высокая температурная перекрестная погрешность, что обуславливает необходимость введения температурной компенсации для их практического применения. Решение данной задачи, в свою очередь, приводит к удорожанию и усложнению измерительной системы. Тем не менее наличие температурной компенсации следует рассматривать как характерный признак высокотехнологичной сенсорной структуры, а во многих практических приложениях ее реализация является необходимой. В волоконно-оптических датчиках для этих целей широко применяются метод опорного канала [4] и метод двух волокон [5].

Вследствие значительно большей надежности коаксиального кабеля по сравнению с оптическим волокном для мониторинга различных физических полей и параметров состояния конструкций применяются некоторые известные волоконно-оптические методы измерения, реализованные на базе коаксиальных кабелей. Примерами являются коаксиальные кабельные брегговские структуры [6–13], интерферометры Фабри – Перо [14–18], микроволновые соединители [19] и др. Жесткие требования (например, к точности изготовления) в производстве оптических волоконных датчиков могут быть значительно снижены при изготовлении датчиков на основе коаксиальных кабелей. Таким образом, измерители уровня жидкости на основе коаксиальных кабелей могут стать перспективным решением задач, которые возникают при использовании их оптических аналогов. Однако проблема перекрестных температурных погрешностей для коаксиальных кабелей также существует, но мало освещена в литературе, в том числе при использовании сенсоров на основе коаксиальных кабелей для измерения уровня жидкости. Отмечены программные решения с поправками, полученными по данным вынесенных опорных датчиков [20], конструктивных решений не найдено.

Цель работы – повышение разрешающей способности измерителя уровня жидкостей на базе поло-го воздушного коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо на основе применения в его структуре двух металлокерамических коаксиальных кабельных интерферометров Фабри – Перо, реали-зующих для перекрестных температурных помех теромокомпенсационный подход на основе метода двух коаксиальных кабелей как аналога метода двух волокон в оптическом диапазоне.

К вопросам физической реализации чувствительных элементов измерителей уровня на основе ко-аксиальных кабельных интерферометров Фабри – Перо можно отнести анализ применимости существую-щих типов коаксиальных кабелей, используемых в технике связи, в условиях измерения различного рода жидкостей; разработку методики изготовления коаксиальных кабельных интерферометров Фабри – Перо; модельные компьютерные и физические испытания образцов с высокоточным определением изме-рительных характеристик, например, с помощью векторных анализаторов цепей; предложения по разра-ботке устройств оперативного контроля и калибровки измерительных характеристик.

Эффективность использования коаксиальных кабельных интерферометров Фабри – Перо при кон-троле уровня жидкости во многом будет определяться типом выбранного коаксиального кабеля. Задача определения марки коаксиального кабеля в общем случае не является однозначной, в силу того что неко-торые критерии выбора представляются взаимоисключающими. Так, для обеспечения полного контакта с жидкостью наиболее целесообразным будет выбор кабеля большего диаметра (более 10–14 мм). В це-лях повышения разрешающей способности дискретного уровнемера возникает необходимость зондиро-вания резонансной характеристики датчика на более высоких частотах. Однако при заданном диаметре кабеля это приводит к ограничениям, обусловленным его полосой пропускания. Технологический про-цесс производства коаксиальных кабельных интерферометров Фабри – Перо также будет влиять на ха-рактеристики конечного преобразовательного устройства. Основные требования к процессу изготовле-ния включают точность обеспечения размера резонатора Фабри – Перо, соблюдение конструктивных и частотных параметров его отражателей, исключение повреждений структурных элементов кабеля и по-падания жидкости в не контактирующие с ней его участки. Оптимальным является изготовление коакси-альных кабельных интерферометров Фабри – Перо с возможностью одновременного оперативного кон-троля частотных характеристик его коэффициентов передачи и отражения в процессе производства по данным векторного анализатора цепей.

Температурные характеристики и агрессивные свойства среды накладывают ограничения на мате-риалы, из которых изготовлен коаксиальный кабель. Лучшими вариантами для обеспечения измерения в широком диапазоне температур является полый воздушный и металлокерамический коаксиальные кабе-ли с максимальной рабочей температурой до 500 °С. При этом их основным преимуществом являются низкие значения коэффициента теплового расширения и коэффициент Поккельса [21].

В измерительном коаксиальном кабельном интерферометре Фабри – Перо используется коакси-альный кабель с воздушным заполнением и отражателями, сформированными следующим образом: пер-вый реализован в виде закорачивающего металлического штыря, второй – за счет перехода воздух – жидкость. Гармоники резонансной частоты датчика находятся в диапазоне 0,5...3 ГГц, включая макси-мальную гармонику на частоте 2,5 ГГц, а амплитуда отклика калибровалась по диэлектрической прони-цаемости сухого воздуха. Погрешность измерения диэлектрической проницаемости в диапазоне темпе-ратур 30...60 °С составила 10^{-4} , при этом температурный режим программно компенсировался по заран-нее собранным данным с вынесенного в термокамеру аналогичного коаксиального кабельного интерферо-метра Фабри – Перо. В коаксиальном кабельном интерферометре Фабри – Перо проводники конструк-тивно реализованы в виде трубок из нержавеющей стали. При этом диаметр наружного проводника со-ставляет 14 мм, а внутреннего – 5 мм, что соответствует геометрическим параметрам, представленным в прототипе [21].

На рис. 1 представлен вариант такого датчика с частично заполненным жидкостью (водой) резона-тором.

В термокомпенсирующих коаксиальных кабельных интерферометрах Фабри – Перо использован металлокерамический коаксиальный кабель, изготовленный по аналогии с прототипом [10]. При изго-

товлении обоих коаксиальных кабельных интерферометров Фабри – Перо в качестве внешнего проводника применялась трубка с внутренним диаметром 3 мм, в качестве внутреннего проводника – проволока диаметром 1,5 мм. Между указанными проводниками размещена диэлектрическая трубка из оксида алюминия, выполняющая функцию изолятора и фиксированная с помощью керамического клея.

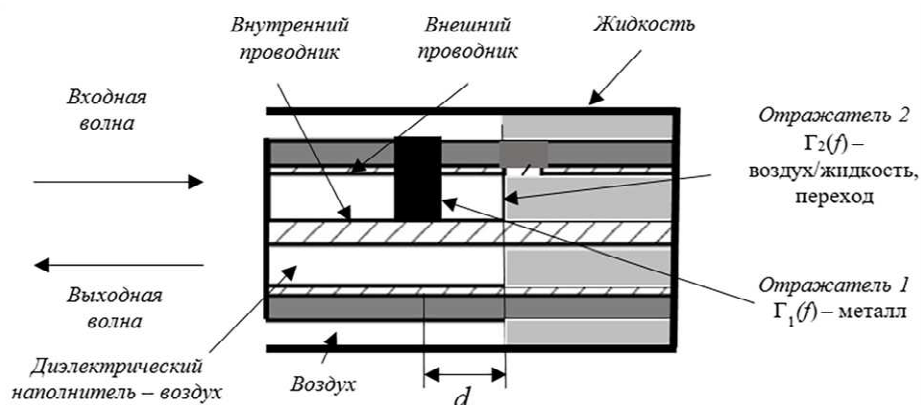


Рис. 1

Первый коаксиальный кабельный интерферометр Фабри – Перо с выемками в алюминии в виде полукруга схематично показан на рис. 2.

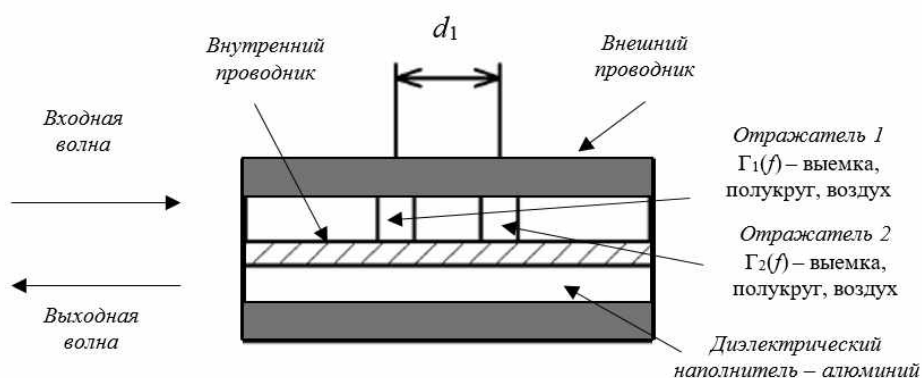


Рис. 2

Схема второго коаксиального кабельного интерферометра с выемками в алюминии в виде круга приведена на рис. 3.

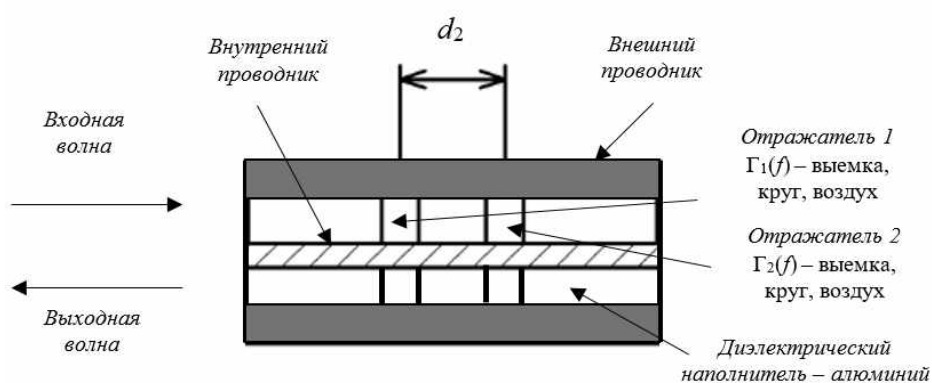


Рис. 3

Таким образом, отличие между двумя термокомпенсирующими коаксиальными кабельными интерферометрами Фабри – Перо заключается в разной форме воздушных выемок-отражателей и расстояниях между отражателями, отличающимися на 75 %, что позволяет датчикам работать в диапазоне 3,5 и 7 ГГц.

Структурная схема устройства показана на рис. 4.

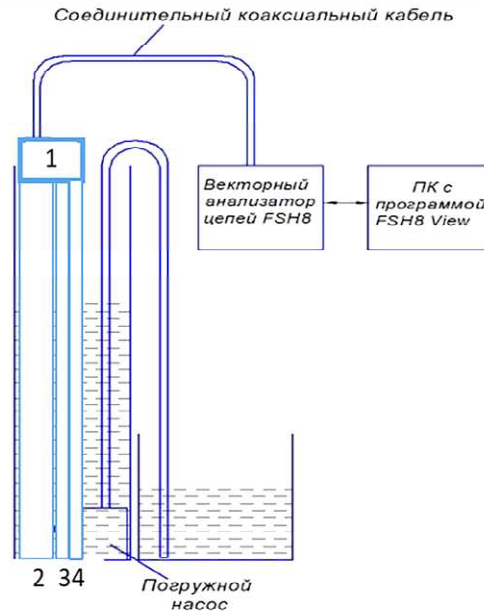


Рис. 4

Электромагнитная волна от порта векторного анализатора цепей (FSH8, диапазон сканирования – 0,01...8 ГГц) подается на сплиттер 1 по стандартному коаксиальному кабелю (типа RG-58). Сплиттер используется для деления сканирующего микроволнового сигнала между измерительным 2 и двумя термокомпенсирующими коаксиальными кабельными интерферометрами Фабри – Перо 3, 4. Комплект коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо 2–4 через переходные соединители подключен к сплиттеру. Комплект коаксиальных кабельных интерферометров Фабри – Перо помещали в мерный цилиндр с водой, подаваемой с помощью погружного насоса.

Сбор, запись и обработка данных осуществлялись персональным компьютером, подключенным к векторному анализатору цепей. Векторный анализатор цепей был настроен на измерение амплитудного спектра отражения S_{11} . Использовалось штатное программное обеспечение векторного анализатора цепей FSH8. Тепловое расширение длины резонаторной полости и вызванное температурой изменение диэлектрической постоянной воздуха способствуют сдвигу длины волны спектра отражения, который может вызвать температурные перекрестные помехи при измерении уровня.

При подаче микроволнового сканирующего сигнала на измерительный коаксиальный кабельный интерферометр Фабри – Перо в его резонаторе, образованном двумя отражателями, происходит многократное отражение падающей электромагнитной волны. Фазовая задержка между двумя парциальными волнами, которая обусловлена одним проходом, определяется формулой

$$\delta = 4\pi d / \lambda = 4\pi f d \sqrt{\varepsilon_r} / c, \quad (1)$$

где λ, f – длина волны и частота электромагнитной волны, распространяющейся внутри кабеля; d – длина резонансной полости; ε_r – эффективная диэлектрическая постоянная (или относительная диэлектрическая проницаемость) сухого воздуха, приблизительно равная единице; c – скорость света в вакууме. Когда фазовая задержка равна $2m\pi$ ($m = 1, 2, 3, \dots$), в спектральной области можно получить резонансную картину. Резонансная частота f_{res} может быть рассчитаны по формуле

$$f_{\text{res}} = c / \lambda_{\text{res}} = mc / 2d \sqrt{\varepsilon_r}. \quad (2)$$

Когда открытый конец измерительного коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо погружен в жидкость, граница раздела воздух – жидкость действует как второй отражатель, что показано

на рис. 1. Таким образом, при изменении уровня жидкости положение второго отражателя соответственно изменяется, что приводит к изменению длины резонатора d . Чем выше уровень жидкости, тем меньше будет длина резонатора. С учетом (2) резонансная длина волны λ_{res} в спектре отражения S_{11} измерительного коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо определяется формулой

$$\lambda_{\text{res}} = 2m/d . \quad (3)$$

Изменение резонансной длины волны $\Delta\lambda_{\text{res}}$ из-за изменения длины полости Δd может быть выражено как

$$\Delta\lambda_{\text{res}} = 2m/\Delta d = -2m/\Delta d' , \quad (4)$$

где $\Delta d'$ – изменение уровня жидкости.

Уравнение (4) показывает, что сдвиг резонансной длины волны датчика линейно пропорционален изменению длины полости. Чувствительность ($\Delta\lambda_{\text{res}}/\Delta d$) для измерительного коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо составляет $2/m$. Чем выше порядок резонансного провала, тем ниже будет чувствительность. Таким образом, необходимо выбрать первый порядок резонанса с частотой 2,5 ГГц при заданном измеряемом уровне жидкости. При амплитудных коэффициентах отражения отражателей $\Gamma_{1,2}(f)$, коэффициенте потерь при распространении сканирующего сигнала по кабелю α вдоль оси z , а также при известных координатах отражателей амплитуда спектра отражения U с учетом многократных отражений определяется с использованием программной среды ANSYS HFSS следующим образом:

$$U = \sqrt{\frac{\Gamma_1^2(f) - 2\Gamma_1(f)\Gamma_2(f)\exp(-\alpha z)\cos\delta + (\Gamma_2(f)\exp(-\alpha z))^2}{1 - 2\Gamma_1(f)\Gamma_2(f)\exp(-\alpha z)\cos\delta + \Gamma_1^2(f)(\Gamma_2(f)\exp(-\alpha z))^2}} . \quad (5)$$

Амплитуда и фаза изменяются как функции частоты и временной задержки τ . По сути, амплитуда спектра изменяется синусоидально при сканировании частоты зондирующей волны.

Термокомпенсирующие коаксиальные кабельные интерферометры Фабри – Перо измеряют температуру, отслеживая сдвиг интерферограммы относительно базовой линии, которая может быть определена при произвольной температуре T_0 , например, температуре лабораторного помещения. Для конкретного датчика интерференционный сигнал U , заданный уравнением (5), зависит только от произведения расстояния d и квадратного корня из относительной диэлектрической проницаемости ε_r в соответствии с δ , определяемой из (1). Расстояние d_T при температуре T выражается как

$$d_T = d_{T_0} + d_{T_0}\beta_T(T - T_0), \quad (6)$$

где β_T – коэффициент теплового расширения, определяемый для двух типов коаксиальных кабельных интерферометров Фабри – Перо: для конструкции с двумя полукруговыми отражателями, где в качестве элемента, задающего температурную чувствительность, выступает трубка из оксида алюминия, и для конструкции с двумя круговыми отражателями, где аналогичную функцию выполняет проволока из нержавеющей стали. Выбор трубки и проволоки для решения (6) определяется различным конструктивом двух термокомпенсирующих коаксиальных кабельных интерферометров Фабри – Перо как элементов, изменяющих свою длину при изменении температуры. Температурная зависимость ε_r часто задается как полиномиальная функция T [22]:

$$\varepsilon_{r,T} = \sum(a_i T^i), \quad (7)$$

где a_i , $a_0 = \varepsilon_r(T_0)$ – постоянные коэффициенты. Сдвиг частоты Δf_{res} отраженного сигнала, вычисленный через преобразование уравнения (5), реагирует на температуру только тогда, когда в материалах кабеля не происходит никаких химических или структурных изменений. Таким образом, изменение температуры можно измерять, отслеживая Δf_{res} .

Следует отметить, что разница в конструкциях двух термокомпенсирующих коаксиальных кабельных интерферометров Фабри – Перо позволяет предположить существенное различие в их характеристиках и полученных значениях Δf_{res} при одинаковой измеренной температуре.

На основании анализа научно-технической литературы установлено, что наиболее простым и технологически реализуемым оптическим методом одновременного измерения деформации и температуры среды с использованием волоконных брэгговских решеток в настоящее время является метод двух оптических волокон [5]. Суть указанного метода заключается в применении двух волокон, в которых сформированы волоконные брэгговские решетки, обеспечивающие температурную компенсацию. Данные решетки характеризуются существенно различающейся чувствительностью к температурному воздействию и деформации (либо только к одному из этих факторов), что достигается либо введением различных легирующих добавок в сердцевину волокон, либо за счет использования разных технологических режимов записи волоконных брэгговских решеток. В данном случае следует исследовать сдвиг резонансной частоты Δf_{res} , оценивая его по зависимостям изменения ε_r от изменения температуры T и длины резонатора d .

Таким образом, для реализации предлагаемого метода контроля Δf_{res} необходимо использовать первый 3 и второй 4 (см. рис. 4) термокомпенсирующие металлокерамические коаксиальные кабельные интерферометры Фабри – Перо, имеющие существенно отличающиеся деформационные d и/или температурные T коэффициенты $K_{d1,2,T1,2}$ по e_r .

Тогда

$$\begin{pmatrix} \Delta f_{\text{res1}}/f_{\text{res1}} \\ \Delta f_{\text{res2}}/f_{\text{res2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{d1} & K_{T1} \\ K_{d2} & K_{T2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta d \\ \Delta T \end{pmatrix} = \bar{K} \begin{pmatrix} \Delta d \\ \Delta T \end{pmatrix}. \quad (8)$$

При постоянных коэффициентах K (линейная модель оптического контроля) и определителе матрицы $\det(\bar{K}) \neq 0$ уравнение (8) может быть решено аналитически:

$$\begin{pmatrix} \Delta d \\ \Delta T \end{pmatrix} = \bar{K}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta f_{\text{res1}}/f_{\text{res1}} \\ \Delta f_{\text{res2}}/f_{\text{res2}} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Обратная матрица в данном случае выражается уравнением

$$\bar{K}^{-1} = \frac{1}{\det(\bar{K})} \begin{pmatrix} K_{T2} & -K_{T1} \\ -K_{d2} & K_{d1} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Таким образом, для дальнейших исследований необходимо провести вычислительный эксперимент, способный подтвердить эффективность применения двух термокомпенсирующих металлокерамических коаксиальных кабельных интерферометров Фабри – Перо при измерении уровня жидкости измерительным полым воздушным коаксиальным кабельным интерферометром Фабри – Перо по методике, отраженной в формулах (6) – (10), с учетом данных прототипов [1, 21].

На рис. 5 представлен смоделированный в MATLAB S_{11} -отклик измерительного полого воздушно-го коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо при высоте емкости с водой 200 мм, выполненный по аналогии с работой [1].

Резонансная частота увеличивается (или резонансная длина волны уменьшается) по мере увеличения уровня жидкости в емкости (или уменьшения длины резонатора), что хорошо согласуется с формулами (2), (3), амплитуда резонансного провала также увеличивается (при недостаточной связи) и достигает максимума около 2,4 ГГц (критическая связь). Чувствительность измерения уровня воды составляет -500 мкм/мм (сдвиг резонансной длины волны/изменение уровня жидкости) в диапазоне 200 мм (рис. 6) при разрешающей способности измерения уровня жидкости 5 мкм. На практике частотная характеристика имеет обратный наклон, но нелинейна.

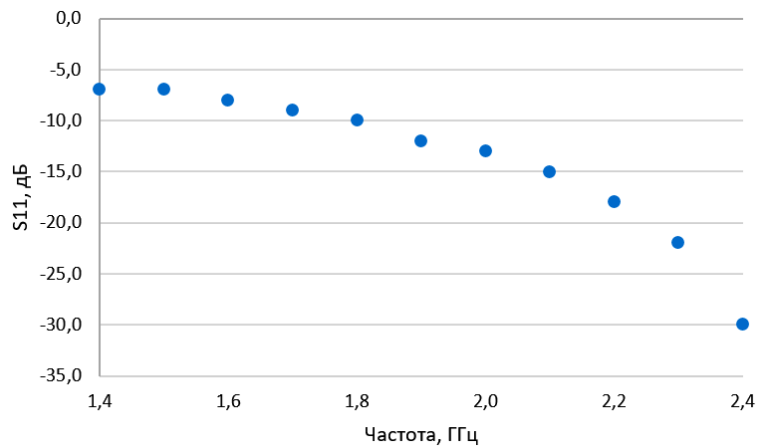


Рис. 5

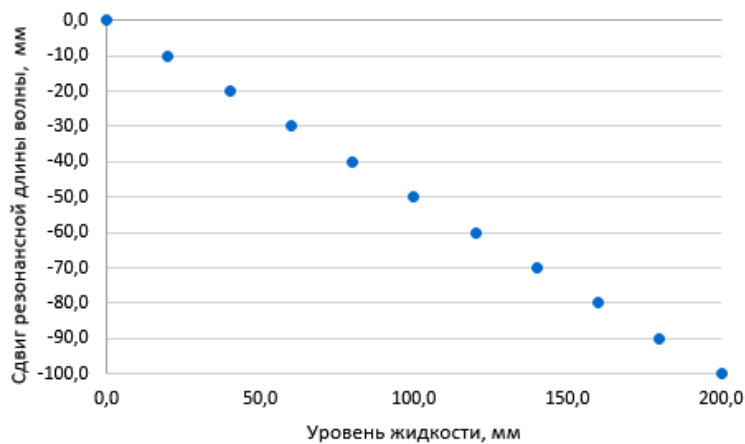


Рис. 6

Температурная характеристика измерительного коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо была определена, как и в прототипе [1], с использованием термокамеры. Модель датчика длиной 40 см была помещена в термокамеру с разрешением измерения температуры 0,5 °С. Результат измерений позволил определить чувствительность измерительного коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо к температуре как 1 мкм/град и перекрестную чувствительность температуры и уровня жидкости, равную 2 мкм/град (сдвиг резонансной длины волны/температура), что свидетельствует о необходимости применения термокомпенсации. При применении термокомпенсации можно исключить влияние температуры за счет предложенного метода двух коаксиальных кабелей.

В термокомпенсации на основе корреляции между Δf и температурой (рис. 7) температурная зависимость Δf в терминах «сдвига резонансной частоты на градус» определялась, как в прототипе [21], и составила -2 МГц/град для коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо 3 с двумя полукруговыми отражателями и -1 МГц/град для коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо 4 с двумя круговыми отражателями.

Поскольку в обоих коаксиальных кабельных интерферометрах Фабри – Перо использованы идентичные изоляционные материалы и одинаковый материал отражателей (при этом длины резонаторов различаются, а их резонансные частоты отличаются приблизительно в два раза), можно заключить, что сравнение температурной чувствительности двух рассматриваемых датчиков в большей степени определяется разницей их резонансных частот, нежели материальными или конструктивными параметрами.

Векторный анализатор цепей имеет предельное разрешение частотного сканирования, равное 1 Гц, что на несколько порядков меньше 1 МГц. Благодаря этому оба коаксиальных кабельных интерферометра Фабри – Перо, в принципе, способны регистрировать изменения температуры с точностью до долей градуса Цельсия.

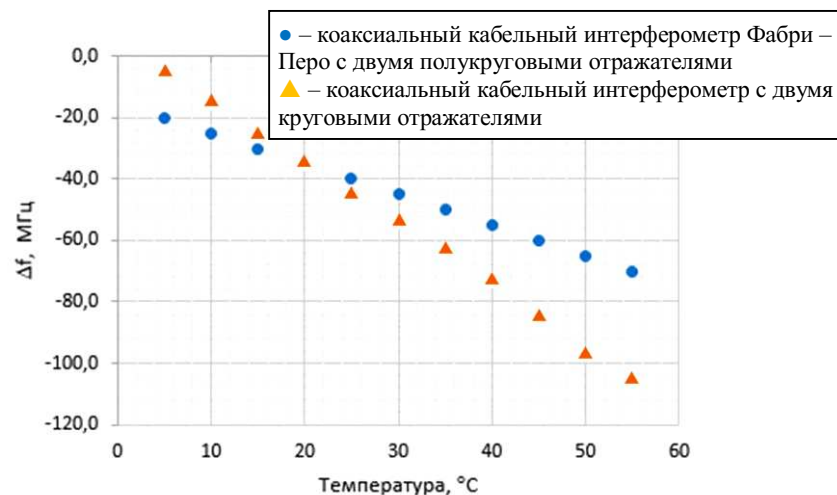


Рис. 7

Измеренные сигналы с выхода обоих коаксиальных кабельных интерферометров Фабри – Перо передаются в микропроцессор для сравнения со значениями, сохраненными в памяти, с целью получения двух резонансных частот и температуры, соответствующей обоим значениям. Таким образом, термокомпенсация позволяет измерять температуру без влияния дрейфа сканирующей частоты и исключить из погрешности измерений составляющую перекрестной чувствительности температуры и уровня жидкости измерительного канала.

В данной статье представлен простой, экономичный и надежный датчик уровня жидкости на основе полого воздушного коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо с добавлением двух термокомпенсирующих кабельных интерферометров Фабри – Перо с диапазоном измерений 0... 200 мм. В полном воздушном коаксиальном кабельном интерферометре Фабри – Перо первый отражатель сформирован закорачивающим стальным штырем, замыкающим внутренний и внешний проводники, а граница раздела воздух – жидкость действует как второй отражатель. Таким образом, из двух отражателей формируется коаксиальный кабельный интерферометр Фабри – Перо. На основе конструкции полого воздушного коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо информация об уровне жидкости напрямую коррелирует с длиной его резонатора. Изменение длины резонатора можно получить, отслеживая сдвиг его резонансной частоты или длины волны. Исследования температурной зависимости полого воздушного коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо показали необходимость введения в его структуру термокомпенсирующего канала.

Было предложено применить аналог метода двух волокон, широко используемый в целях термокомпенсации в волоконно-оптических сенсорных системах, для чего был сформулирован метод двух коаксиальных кабелей. Для реализации метода необходимо дополнительно использовать два термокомпенсирующих коаксиальных кабельных интерферометра Фабри – Перо, имеющих существенно отличающиеся деформационные и/или температурные отклики. Для реализации термокомпенсирующих коаксиальных кабельных интерферометров интерферометр Фабри – Перо использованы два металлокерамических коаксиальных кабеля, в которых сформированы резонаторы различной длины с полукруговыми в одном случае и круговыми в другом воздушными отражателями, выполненными в наполнителе на основе оксида алюминия.

Применение линейной модели термокомпенсации с использованием метода двух коаксиальных кабелей позволяет исключить погрешности измерений уровня жидкости, связанные с влиянием дрейфа сканирующей частоты и перекрестной чувствительности температуры и уровня жидкости измерительного канала.

В дальнейшем длину измерительного коаксиального кабельного интерферометра Фабри – Перо можно увеличить до нескольких метров, а конкретное значение будет определяться потерями в нем и отношением сигнал/шум обрабатываемых интерферограмм.

Работа выполнена за счет предоставленного в 2025 г. Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и поисковых исследований в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zhu C. et al.* A Liquid-Level Sensor Based on a Hollow Coaxial Cable Fabry–Perot Resonator with Micrometer Resolution // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2018. Vol. 67. № 12. P. 2892–2897.
2. *Морозов О.Г., Шакирова А.И.* Радиофотонный измеритель уровня воды для гидротехнических плотин // *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*. 2020. № 3. С. 131–137.
3. *Morozov O.G. et al.* Fiber-Optic Hydraulic Sensor Based on an End-Face Fabry–Pérot Interferometer with an Open Cavity // *Photonics*. 2024. Vol. 11. № 1. Article № 22.
4. *Морозов О.Г., Польский Ю.Е.* Единое поле комплексированных ВОД в системах контроля параметров безопасности скоростных транспортных средств // *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*. 1997. № 4. С. 27–31.
5. *Федотов М.Ю.* Теоретические исследования термокомпенсации результатов диагностики полимерных композитов методом двух оптических волокон // *Дефектоскопия*. 2023. № 10. С. 53–65.
6. *Morozov O.G. et al.* Special Types of FBG and CoaxBG Structures for Telecommunication and Monitoring Systems // *Proceedings SPIE*. 2015. Vol. 9533. Article № 95330C.
7. *Zhu C., Alsalmán O., Huang J.* From Fiber Bragg Gratings to Coaxial Cable Bragg Gratings: One-Dimensional Microwave Quasi-Periodic Photonic Crystals // *Journal of Applied Physics*. 2023. Vol. 133. № 16. Article № 164503.
8. *Wei T. et al.* Coaxial Cable Bragg Grating // *Applied Physics Letters*. 2011. Vol. 99. № 11. Article № 113517.
9. *Насыбуллин А.Р., Ишхаев Т.М., Фархутдинов Р.В. и др.* Сверхвысокочастотные брэгговские структуры в полуоткрытой коаксиальной линии // *Вопросы радиоэлектроники*. 2021. № 1. С. 4–12.
10. *Фархутдинов Р.В. и др.* Брэгговская СВЧ-структура в коаксиальном волноводе как датчик контроля диэлектрических параметров жидких сред // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2019. № 4-2. С. 114–120.
11. *Морозов О.Г., Насыбуллин А.Р.* Свойства сложно-периодических неоднородных систем в радиочастотных и оптических направляющих структурах // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2015. № 3-1. С. 16–22.
12. *Морозов Г.А. и др.* Коаксиальные брэгговские СВЧ-структуры в сенсорных системах // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2014. № 3. С. 65–70.
13. *Насыбуллин А.Р. и др.* Преобразовательный элемент измерителя уровня жидких продуктов на основе брэгговской СВЧ-структуры в коаксиальном кабеле // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 6 [Электронный журнал]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=16390> (дата обращения: 11.02.2026).
14. *Ahmed M.F. et al.* High Quality Factor Coaxial Cable Fabry–Perot Resonator for Sensing Applications // *IEEE Sensors Journal*. 2017. Vol. 17. P. 3052–3057.
15. *Zeng S. et al.* A Metal-Ceramic Coaxial Cable Fabry–Pérot Microwave Interferometer for Monitoring Fluid Dielectric Constant // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2017. Vol. 257. P. 1–7.
16. *Zhu C. et al.* A Hollow Coaxial Cable Fabry–Pérot Resonator for Liquid Dielectric Constant Measurement // *Review of Scientific Instruments*. 2018. Vol. 89. № 4. Article № 045003.
17. *Zhu C. et al.* Contactless Liquid Interface Measurement Based on a Hollow Coaxial Cable Resonator // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019. Vol. 285. P. 623–627.
18. *Zhu C., Huang J.* Coaxial Cable Sensing: Review and Perspective // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2024. Vol. 72. № 3. P. 1790–1809.
19. *Huang J. et al.* Coaxial Cable Bragg Grating Assisted Microwave Coupler // *Review of Scientific Instruments*. 2014. Vol. 85. Article № 014703.
20. *Федотов М.Ю.* Моделирование термокомпенсации данных оптического контроля композитных конструкций внешним волоконно-оптическим датчиком температуры // *Контроль. Диагностика*. 2024. № 1 (307). С. 4–13.
21. *Trontz A. et al.* // Development of Metal-Ceramic Coaxial Cable Fabry–Pérot Interferometric Sensors for High Temperature Monitoring // *Sensors*. 2015. Vol. 15. P. 24914–24925.
22. *Li H. et al.* Frequency and Temperature Dependence of the Dielectric Properties of a PCB Substrate for Advanced Packaging Applications // *Journal of the Korean Physical Society*. 2009. Vol. 54. P. 1096–1099.

Поступила в редколлегию 11.03.26

A THERMOCOMPENSATED LIQUID LEVEL METER BASED ON A HOLLOW AIR AND TWO METAL-CERAMIC COAXIAL CABLE FABRY–PEROT INTERFEROMETERS

O.G. Morozov, G.A. Morozov, O.V. Nikishina, and R.V. Farkhutdinov

This paper analyzes the characteristics and design features of a new class of sensing elements for liquid level meters with micrometer resolution. The objective of the study is to compensate the measurement error of a liquid level meter based on a hollow air-filled coaxial cable Fabry–Perot interferometer caused by cross-sensitivity to temperature changes. To achieve this goal, it is proposed to incorporate two metal-ceramic coaxial cable Fabry–Perot interferometers into the interferometer structure. This interferometer utilizes a temperature-compensating approach based on the two-coaxial cable method, analogous to the two-fiber method in the optical range. An additional benefit of this approach is the elimination of the error caused by the scanning frequency drift of the vector network analyzer used to interrogate the interferometers.

Keywords: liquid level meter, Fabry–Perot interferometer, hollow air-filled and metal-ceramic coaxial cable, temperature cross-sensitivity compensation, two-coaxial cable method.

Морозов Олег Геннадьевич – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: ogmorozov@kai.ru

Морозов Геннадий Александрович – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: gamorozov@kai.ru

Никишина Ольга Викторовна – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: kazpa@mail.ru

Фархутдинов Рафаэль Вазирович – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: rvfarkhutdinov@kai.ru

АЛГОРИТМ РЕГИСТРАЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ МАКСИМУМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ СЕРДЦА ДЛЯ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

О.А. Мухаметзянов, С.С. Седов, П.А. Салдаева

Разработан алгоритм регистрации временного положения вершин R-пиков электрокардиосигналов, основанный на численном интегрировании анализируемых сигналов методом трапеций. Алгоритм реализован в среде программирования MATLAB. Тестирование алгоритма проведено на основе электрокардиосигналов из базы данных PTB Diagnostic ECG Database. Приведены результаты работы алгоритма на основе анализа 1031 R-пика. Результаты показали высокую надежность в определении временного положения искомым точек.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, локальные максимумы, численное интегрирование, метод трапеций.

Цифровая обработка электрокардиосигналов представляет собой значимое направление на стыке инженерных и медицинских дисциплин. Актуальность данного направления обусловлена высоким уровнем смертности от сердечно-сосудистых заболеваний, что, в свою очередь, определяет необходимость дальнейшего развития научно-технических решений в этой области. Множество задач цифровой обработки электрокардиосигналов решаются на основе регистрации временного положения QRS-комплексов и их составляющих. QRS-комплексы представляют собой электрические импульсы, возникающие на определенных участках электрокардиосигналов при каждом биении сердца – кардиоцикле. Они состоят в норме из трех последовательных пиков (Q-, R- и S-пики), отражающих процесс возбуждения желудочков сердца. R-пики – это локальные максимумы кардиоциклов. Классическое решение задачи регистрации элементов QRS-комплексов – алгоритм Пана – Томпкинса [1]. Эта задача имеет большое значение для последующей обработки и анализа электрокардиосигналов, в частности, для задач обнаружения различных аритмий сердца, а также в области электрокардиографии высокого разрешения для временного усреднения сигнала.

Алгоритм Пана – Томпкинса состоит из следующих этапов.

1. Предварительная обработка сигналов.
2. Вычисление производной сигнала.
3. Возведение значений сигнала в квадрат с целью усиления локальных максимумов.
4. Использование интегрирующего фильтра.
5. Оценка временного положения элементов QRS-комплекса.

Данный алгоритм применяется многими исследователями, в частности, в работах [2–7], однако существуют задачи цифровой обработки электрокардиосигналов, в которых требуется оценить только временное положение локальных максимумов (R-пиков) [8]. В таких задачах применение стандартного алгоритма Пана – Томпкинса и ряда его операций представляется избыточным решением.

Целью настоящего исследования является разработка алгоритма регистрации временного положения R-пиков, характеризующегося пониженной вычислительной сложностью относительно алгоритма Пана – Томпкинса. Данный алгоритм может быть использован во многих задачах анализа электрокардиосигналов, в частности в области электрокардиографии высокого разрешения.

Первый этап алгоритма предусматривает предварительную обработку электрокардиосигналов – использование полосовой фильтрации в диапазоне частот 2...40 Гц. Полосовой фильтр (нерекурсивный, с оконной функцией Кайзера) реализован на основе средств приложения Signal Analyzer (фильтр с амплитудно-частотной характеристикой с крутизной –60 дБ).

Выбор частот среза определяется рядом факторов. При установке нижней частоты среза на уровне 2 Гц обеспечивается эффективное подавление низкочастотного дрейфа изолинии. Верхняя частота среза

выбирается ниже 50 Гц (основная гармоника сетевой помехи), снижение верхней частоты среза ниже 40 Гц приводит к искажению формы исходного электрокардиосигнала.

Второй этап – вычисление максимального U_{\max} и минимального U_{\min} значения напряжения электрокардиосигналов (предположительно один из R-пиков). Вычисление U_{\max} осуществляется в соответствии с условием

$$U_{\max} = \begin{cases} U_i, & U_i \geq U_{i+1} \\ U_{i+1}, & U_{i+1} < U_i \end{cases}; i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где n – количество отсчетов сигнала.

Вычисление U_{\min} осуществляется в соответствии с условием

$$U_{\min} = \begin{cases} U_i, & U_i \leq U_{i+1} \\ U_{i+1}, & U_{i+1} > U_i \end{cases}; i = \overline{1, n}. \quad (2)$$

Это необходимо для возможного инвертирования сигнала. Сначала вычисляется U_{\max} и U_{\min} , затем они сравниваются по модулю, и в случае, если $|U_{\min}| > |U_{\max}|$, производится инвертирование сигнала, и значение U_{\min} принимается за U_{\max} . В большинстве электрокардиосигналов R-пик – это локальный максимум, однако существуют электрокардиосигналы, в которых в качестве точки синхронизации может выступать локальный минимум. В связи с этим для таких случаев необходимо инвертирование сигнала. Пример такого электрокардиосигнала представлен на рис. 1: *a* – исходный сигнал; *b* – инвертированный сигнал.

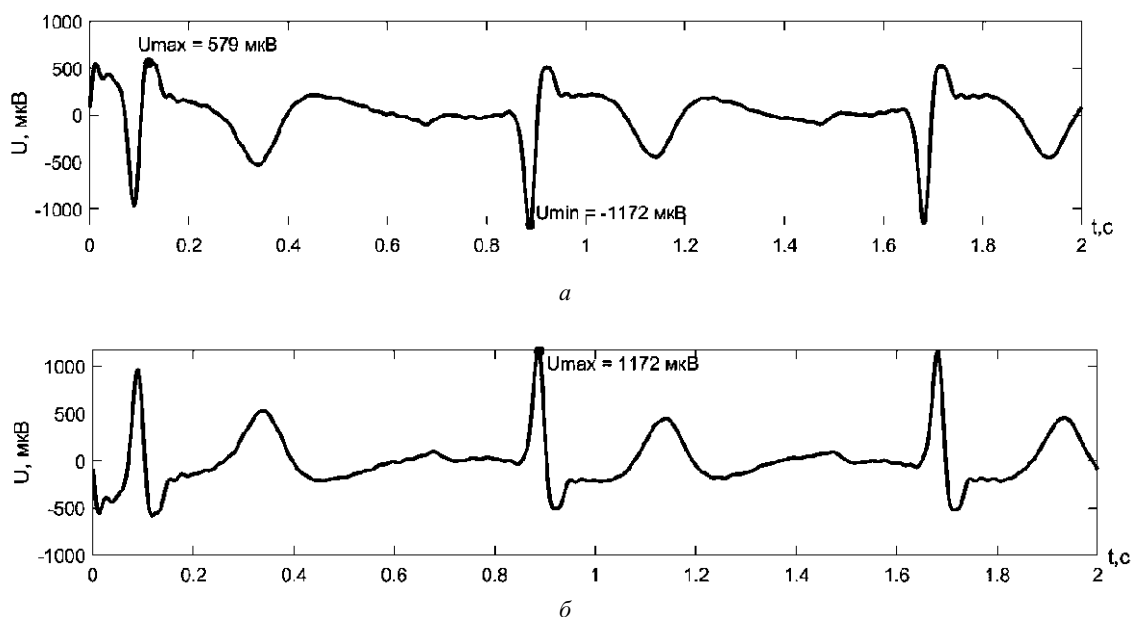


Рис. 1

Третий этап – устранение значений напряжения электрокардиосигналов ниже отметки $0,5 U_{\max}$. Так как электрокардиосигнал представляет собой массив значений, то в алгоритме введен условный оператор, который присваивает нулю все значения напряжения ниже порога.

Четвертый этап – вычисление площади под кривой (area under the curve (AUC)) в рамках временного интервала (окна). Длительность окна в данной работе составляет 40 мс. Вычисление AUC осуществляется в соответствии с численным интегрированием методом трапеций:

$$AUC = \sum_{i=1}^w \frac{U(t_i) + U(t_{i+1})}{2} (t_{i+1} - t_i), \quad (3)$$

где $w = 40$ мс – длительность временного окна; $U(t)$ – значение напряжения электрокардиосигнала в момент времени t .

Пятый этап – вычисление максимального значения AUC_{max} в локальном временном интервале. В случае нескольких одинаковых значений временное положение максимума принимается за срединное из данных значений. Временное положение этого максимума принимается за временное положение соответствующего R-пика (рис. 2). После определения AUC_{max} следующее значение данного параметра вычисляется через 300 мс для исключения из анализа T-пиков.

Этапы алгоритма в рамках электрокардиосигнала представлены на рис. 2: a – исходный сигнал; b – сигнал после третьего этапа алгоритма; $в$ – сигнал после пятого этапа алгоритма.

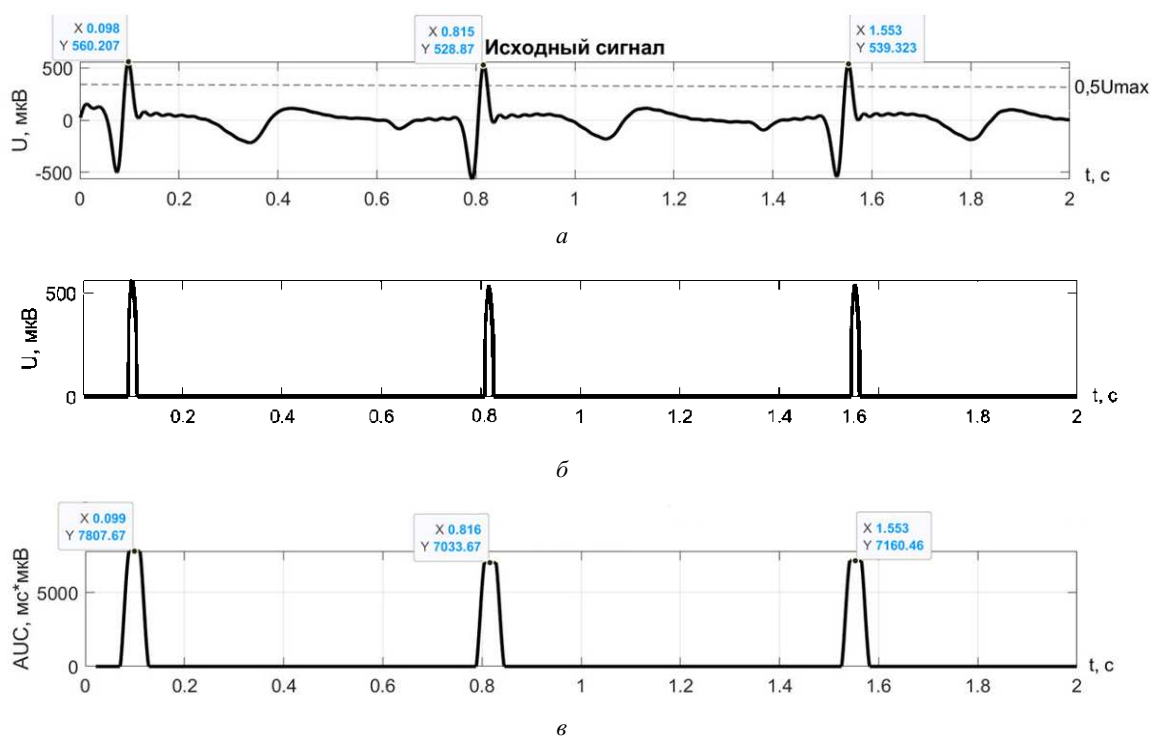


Рис. 2

Точность локализации временного положения R-пиков для предложенного алгоритма определяется относительной погрешностью [9]:

$$\varepsilon = \frac{t_{R_PT} - t_{R_AUC}}{t_{R_AUC}}, \quad (4)$$

где t_{R_PT} – временное положение зарегистрированного R-пика по алгоритму Пана – Томпкинса; t_{R_AUC} – временное положение зарегистрированного R-пика по предложенному алгоритму.

В качестве выборки использовались 26 записей из базы данных реальных электрокардиосигналов в открытом доступе [10]. Каждая запись содержала электрокардиосигнал по ортогональным отведениям X, Y, Z Франка [11]. Проанализировано 78 электрокардиосигналов. Длительность анализируемых электрокардиосигналов – 10 с. Частота дискретизации анализируемых электрокардиосигналов – 1 кГц. В рамках каждого электрокардиосигнала присутствовали 9–18 кардиоциклов. Всего оценке подвергся 1031 кардиоцикл. Алгоритм протестирован в программном комплексе MATLAB. В результате тестирования алгоритма в 9 кардиоциклах R-пики зарегистрированы ошибочно. Таким образом, эффективность детекции R-зубцов составила 99,7 % от общего числа зарегистрированных кардиоциклов.

Приведем сводные данные по оставшимся 1022 кардиоциклам (относительная погрешность/ количество зарегистрированных R-пиков): 0/967; 0,01–0,02/35; 0,03–0,04/4; 0,05–0,06/1; 0,07–0,08/1; 0,09–0,1/2; более 0,1/12.

Среднее значение относительной погрешности $\varepsilon_{cp} \approx 0,01$. Наличие ε_{cp} обусловлено различиями на этапе предварительной обработки сигналов (используемые фильтры и частоты среза). Такое отклонение является допустимым, так как при временном усреднении сигналов в задачах электрокардиографии высокого разрешения исходное отношение сигнал/шум повышается значительно.

Таким образом, в работе представлен алгоритм регистрации временного положения R-пикув электрокардиосигналов. В основе алгоритма лежит численное интегрирование анализируемых сигналов методом трапеций. Введен новый параметр, характеризующий временное положение вершины R-пикув – «площадь под кривой». По максимальному значению данного параметра принимается решение о положении искомой точки.

Работа алгоритма проверена с использованием программного обеспечения MATLAB на основе анализа 1031 R-пикув. В результате алгоритм показал высокую точность локализации временного положения R-пикув (среднее значение относительной погрешности $\varepsilon_{cp} \approx 0,01$) и высокую надежность (успешно зарегистрированы 99,7 % R-пикув) работы по сравнению со стандартным решением (алгоритмом Пана – Томпкинса).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pan J., Tompkins W.J. A Real-Time QRS Detection Algorithm // IEEE Transactions On Biomedical Engineering. 1985. Vol. 32. № 3. P. 230–236.
2. Balta D., Akyemiş E.M. Arrhythmia Detection Using Pan–Tompkins Algorithm and Hilbert Transform with Real-Time ECG Signals // Academic Perspective Procedia. 2021. Vol. 4. № 1. P. 307–315.
3. Al-Jabbar A. et al. Clinical Fusion for Real-Time Complex QRS Pattern Detection in Wearable ECG Using the Pan-Tompkins Algorithm // Fusion: Practice & Applications. 2023. Vol. 12. № 2. P. 172–184.
4. Karri M., Annavarapu C.S.R. A Real-Time Embedded System to Detect QRS-complex and Arrhythmia Classification Using LSTM through Hybridized Features // Expert Systems with Applications. 2023. Vol. 214. Article № 119221.
5. İhsan A., Doğan N. An Innovative Image Encryption Algorithm Enhanced with the Pan–Tompkins Algorithm for Optimal Security // Multimedia Tools and Applications. 2024. Vol. 83. № 35. P. 82589–82619.
6. Rahman M.O., Augustyniak P., Olejarczyk E. The QRS Detection Using the Modified Pan–Tompkins Algorithm // Proc. of the IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT, May 29–31, 2024, Florence, Italy. P. 328–332.
7. Ahmed A.F. A Novel Improved Pan-Tompkins Method for QRS Complex Detection of the ECG Signal // Signal, Image and Video Processing. 2025. Vol. 19. № 12. P. 1–13.
8. Breithardt G. et al. Standards for Analysis of Ventricular Late Potentials Using High-Resolution or Signal-Averaged Electrocardiography. A Statement by a Task Force Committee of the European Society of Cardiology, the American Heart Association, and the American College of Cardiology // Circulation. 1991. Vol. 83. № 4. P. 1481–1488.
9. Абдульманов P.P., Казанов Л.И. Измерения физических величин. Самара: СамГАПС, 2006. 25 с.
10. Physionet: PTB Diagnostic ECG Database [Electronical Resource]. URL: <https://www.physionet.org/content/ptbdb/1.0.0/> (дата обращения: 22.12.2025).
11. Frank E. An Accurate, Clinically Practical System for Spatial Vectorcardiography // Circulation. 1956. Vol. 13. № 5. P. 737–749.

Поступила в редколлегию 22.01.26

ALGORITHM OF ELECTRICAL HEART SIGNALS' LOCAL MAXIMA REGISTRATION FOR HIGH-RESOLUTION ELECTROCARDIOGRAPHY TASKS

O.A. Mukhametzyanov, S.S. Sedov, and P.A. Saldaeva

Algorithm of R-peaks time location's registration in electrocardiosignals is developed. Algorithm is based on numerical integration of analyzed signals by trapezoidal approach. MATLAB program environment is used to realize an algorithm. Testing of algorithm is performed on electrocardiosignals from PTB Diagnostic ECG Database. Results of algorithm's performance

based on 1031 R-peak are presented. High reliability in the terms of desired points' time location detection is shown.

Keywords: digital signal processing, local maxima, numerical integration, trapezoidal approach.

Мухаметзянов Оскар Айдарович – ст. преподаватель (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: vision_void@mail.ru

Седов Станислав Сергеевич – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: s.sedow@gmail.com

Салдаева Полина Александровна – студент (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: saldaevvva@gmail.com

АЛГОРИТМ И СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ВЕСЕЛ В АКАДЕМИЧЕСКОЙ ГРЕБЛЕ

Т.Ф. Щербакова, С.С. Седов, Р.Ю. Запорожец

Разработан алгоритм регистрации и обработки параметров движения весел спортивной лодки. Проведен анализ движения весла при гребле, на основе которого определен тип датчиков, подходящих для контроля движения весла. Обоснована частота опроса датчиков и определена скорость передаваемой информации. Разработана структурная схема беспроводной телеметрической системы, реализующей данный алгоритм. Произведен и обоснован выбор элементной базы для этой системы и проведено сравнение с существующими решениями.

Ключевые слова: телеметрия, академическая гребля, беспроводная система передачи данных, надежность, масштабируемость.

Достижение высоких результатов в гребном спорте напрямую зависит от эффективности тренировочного процесса и оптимальной комплектации команды с учетом синхронности и координации гребковых действий. В связи с этим требуется разработка системы, обеспечивающей в реальном времени предоставление тренеру данных о кинематике движения весел, а также регистрацию и хранение этих параметров на сервере. Указанное решение позволит оперативно корректировать технику гребли в процессе тренировки, проводить анализ тренировочной деятельности и оптимизировать подбор состава гребцов.

Целью работы является разработка алгоритма регистрации и предварительной обработки параметров движения весел спортивной лодки в процессе гребли и реализация этого алгоритма в виде беспроводной телеметрической системы с выбором элементной базы.

В последнее время на рынке спортивных технологий появилось несколько специализированных телеметрических комплексов, позволяющих собирать данные о движении лодки и работе гребцов. Большая их часть изначально разрабатывалась для исследовательских проектов в университетских лабораториях или по заказу профессиональных клубов и федераций гребли.

Ряд решений предполагает монтаж контроллеров и датчиков на корпус лодки с использованием кабелей для передачи сигналов. Например, BioRowTel (Великобритания) [1], а также отдельные системы университетских проектов закрепляли измерительные блоки в районе уключин и дополнительный центральный блок – в носовой части лодки. К преимуществам таких решений относились более стабильная работа, так как проводные системы меньше подвержены воздействию шумов при передаче информации. Однако кабели мешают процессу гребли, их надежность становится критичной при регулярном снятии/установке датчиков, а герметизация соединений значительно усложняется. Также увеличивается вес и снижается удобство монтажа в лодках.

С началом активного внедрения беспроводных технологий некоторые производители начали предлагать решения, в которых блок с датчиками на весле связывается по Bluetooth с центральным приемником (планшетом или смартфоном).

Приведем примеры таких решений.

NK SpeedCoach (Nielsen – Kellerman) – устройство с GPS и акселерометром для установки на лодке, передающее в режиме реального времени данные о темпе, скорости и пройденной дистанции [2]. Данная система ориентирована главным образом на одного гребца. Аналогичные комплексы от Rowing in Motion или Quiske используют IMU (инерциальный измерительный модуль) и подключаются к смартфону тренера, обеспечивая визуализацию угла, ритма, фазы гребка [3].

Преимущество беспроводных решений заключается в простоте установки (минимум проводов), возможности быстро настроить сопряжение с мобильными устройствами и оперативно просматривать

результаты. Вместе с тем при эксплуатации многоместных гребных судов (четверок и восьмерок) передача данных по протоколу Bluetooth сопряжена с проблемой нестабильности сигнала, обусловленной воздействием вибрационных помех, а также увеличением числа одновременно подключенных к сети устройств. В связи с этим в качестве более предпочтительного канала внутрилодочной связи целесообразно использование технологии Wi-Fi.

Некоторые производители (особенно в высокобюджетном секторе) интегрируют сенсоры непосредственно в конструкцию лодки: кабели, датчики и центральный компьютер прокладываются в карбоновом или композитном корпусе на стадии сборки. Примером могут служить отдельные модели гоночных лодок, оснащенные модулем сбора данных (акселерометры, датчики угла руля, иногда даже гироскопическая стабилизация) [4]. Преимущество этого подхода – уменьшение внешних габаритов и защищенность от попадания воды. Недостаток – высокая цена, сложная процедура ремонта и модернизации. Если требуется добавить новые датчики или сменить конфигурацию, фактически необходимо разбирать и проектировать заново корпус лодки с учетом изменившихся требований.

Анализируемые системы характеризуются высокой технической сложностью, значительной стоимостью, затруднительностью приобретения и обслуживания, а также закрытостью их экосистем для сторонней модификации. В современных геополитических и экономических условиях большинство подобных решений являются практически недоступными для российских гребных клубов. К числу сдерживающих факторов относятся финансовые ограничения (стоимость комплекта оборудования может достигать тысяч долларов), а также технические и юридические барьеры – отсутствие поставок и официального сервисного обслуживания, логистические и платежные сложности, а также потенциальная угроза отключения облачных сервисов на территории Российской Федерации. Кроме того, проприетарные системы не предоставляют открытого API или полного доступа к исходным данным, что затрудняет интеграцию в собственные тренерские программы и гибкую аналитику. Таким образом, можно сделать вывод о том, что создание собственной системы позволит устранить указанные ограничения и недостатки.

Движение весла в процессе гребли состоит из ряда гребков, которые следуют один за другим без пауз. Каждый гребок включает активную фазу (толчок или захват, проводка), когда лодка под давлением лопасти весла в воде продвигается вперед, и фазу расслабления (отдых или подготовка), когда весло переносится по воздуху на исходную позицию для следующего гребка [5]. Соотношение по времени между толчком и отдыхом (активной и пассивной фазами) составляет $t_{\text{проп}} = 1:1,2 \div 1:1,5$. Частота гребков варьируется в пределах $f_{\text{гр}} = 30 \div 45$ гребков/мин. Общий угол поворота весла при гребке в академической гребле составляет $\Delta\varphi = 90 \div 100^\circ$.

Поскольку весло при гребле движется в пространстве, это движение регистрируется в трех взаимно перпендикулярных плоскостях X, Y, Z . При этом измеряется угол поворота весла в этих плоскостях, так как различные точки весла проходят разное расстояние за один гребок. Также измеряется ускорение весла в процессе гребка, поскольку этот параметр лежит в основе правильной техники гребли.

Для реализации этих измерений применяется семейство датчиков MPU, представляющих собой трехосевые акселерометры-гироскопы, выполненные в едином корпусе и имеющие шестнадцатиразрядный аналого-цифровой преобразователь. Эти датчики измеряют угол поворота и ускорение объекта в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Таким образом, датчики выдают за одно измерение (за один отсчет) 6 значений по 16 бит каждое, следовательно, один датчик выдает $n_{\text{бит}} = 16 \cdot 6 = 96$ бит/отсчет. На весь динамический диапазон регистрируемого сигнала приходится $2^{16} = 65535$ уровней, что обеспечивает относительную точность съема сигнала в $100\% / 65535 = 0,0015\%$.

Частота опроса датчиков определяется следующим образом. При максимальной частоте гребка $f_{\text{грmax}} = 45$ гребков/мин один гребок совершается за $\Delta t_{\text{гр}} = 60 \text{ с} / 45 = 1,33 \text{ с}$. Тогда длительность активной фазы гребка $\Delta t_{\text{гр акт}}$ (толчка, когда движением весла под водой лодка проталкивается вперед) при соотношении между активной и пассивной фазами гребка $t_{\text{проп}} 1:1,5$ составит

$$\Delta t_{\text{гр акт}} = \Delta t_{\text{гр}} / (1 + 1,5) = 0,53 \text{ с} . \quad (1)$$

За это время весло повернется на $\Delta\varphi_{\max} = 100^\circ$. Следовательно, средняя угловая скорость поворота весла составит

$$\omega_{\text{ср}} = \Delta\varphi_{\max} / \Delta t_{\text{гр акт}} = 100^\circ / 0,53 \text{ с} = 189^\circ / \text{с} = 3,3 \text{ рад/с} . \quad (2)$$

Если выбрать частоту опроса датчиков $f_{\text{опр}} = 200 \text{ Гц}$, тогда временной интервал между двумя соседними отсчетами составит $\Delta t_{\text{отсч}} = 5 \text{ мс}$. За это время угол поворота весла в среднем составит менее 1° :

$$\Delta\varphi_0 = 1 \omega_{\text{ср}} \Delta t_{\text{дат}} = 189^\circ / \text{с} \cdot 0,005 \text{ с} = 0,95^\circ . \quad (3)$$

При этом скорость потока данных с одного датчика при частоте опроса 200 Гц составит

$$B_{\text{дат}} = n_{\text{бит}} \cdot f_{\text{опр}} = 96 \cdot 200 = 19200 \text{ бит/с} . \quad (4)$$

При максимальном количестве гребцов в лодке $M = 8$ (у каждого гребца по два весла, по одному датчику на весле) максимальная скорость потока данных составит

$$B_{\Sigma\text{max}} = 2B_{\text{дат}}M = 2 \cdot 19200 \cdot 8 = 307200 \text{ бит/с} \approx 307,2 \text{ кбит/с} . \quad (5)$$

Таким образом, проведенный анализ показал, что при использовании датчиков семейства MPU максимальная скорость передачи данных составит $B_{\Sigma\text{max}} = 307,2 \text{ кБит/с}$ (для восьми гребцов) или меньше при меньшем количестве гребцов. При этом съем сигнала осуществляется через каждые $\Delta\varphi_0 = 0,95^\circ$ поворота весла в среднем при высокой относительной точности съема 0,0015 %.

Общая структура предлагаемой системы регистрации и передачи информации о движении весла включает блоки, которые крепятся на каждом весле, с датчиками и микропроцессорами, которые опрашивают датчики с заданной частотой 200 Гц и подготавливают принятую информацию для дальнейшей отправки. Также целесообразно иметь на лодке (например, на носу или корме) центральный блок, который принимает всю информацию с весельных блоков, формирует ее в пакеты данных и отправляет в тренерский штаб и на сервер для хранения и обработки. Наиболее надежным способом организации связи между весельными блоками и центральным блоком на борту гребного судна представляется использование технологии Wi-Fi. Данный выбор обусловлен, во-первых, незначительным расстоянием между узлами связи внутри лодки (не превышающим 7 м), при котором обеспечивается устойчивый уровень сигнала. Во-вторых, беспроводная коммуникация имеет существенное преимущество перед проводной в условиях гребной лодки, где как спортсмены, так и весла находятся в постоянном движении на протяжении всей тренировки. Применение кабельных соединений создает помехи гребцам, а также сопряжено с высоким риском обрыва проводников.

Предлагаемая структура имеет ряд преимуществ. Она легко масштабируема, т. е. может использоваться для одиночек, двоек, четверок и восьмерок, меняется только количество весельных блоков. Беспроводная система позволяет все блоки заключать в герметичные корпуса, что исключает попадание воды внутрь устройств. В случае выхода из строя какого-либо блока он легко заменяется на идентичный.

Общий алгоритм сбора и первичной обработки данных приведен на рис. 1.

Сначала происходит инициализация центрального блока. Задаются следующие параметры: число отсчетов на канал N – число моментов времени, в которые датчики выдают данные, входящие в один пакет данных по каждому спортсмену; интервал наблюдения R – длительность тренировки, задается тренером; количество спортсменов M – один, два, четыре или восемь (максимальное число). Также центральный блок определяет начальные адреса блоков памяти записи данных по каждому спортсмену. Далее задаются начальные значения счетчиков i, j, L по параметрам N, R, M , и вызывается подпрограмма, по которой центральный блок последовательно опрашивает все датчики по i -му отсчету и записывает данные в области памяти, соответствующие j -му спортсмену. После окончания цикла по $j = 1, M$ (по всем спортсменам) идет переход к следующему отсчету $i = i + 1$, и повторяется цикл записи данных по

всем M спортсменам. После окончания цикла по $i=1, N$ текущие пакеты данных из N отсчетов по M спортсменам сформированы в памяти центрального блока, и вызывается подпрограмма их передачи в компьютер тренера и на сервер. После этого следует проверка окончания интервала наблюдения R , заданного тренером (длительности тренировки). Если он не закончен, то алгоритм переходит в начало, на начальные значения счетчиков $i=1$ и $j=1$ для формирования следующего пакета данных по всем спортсменам.

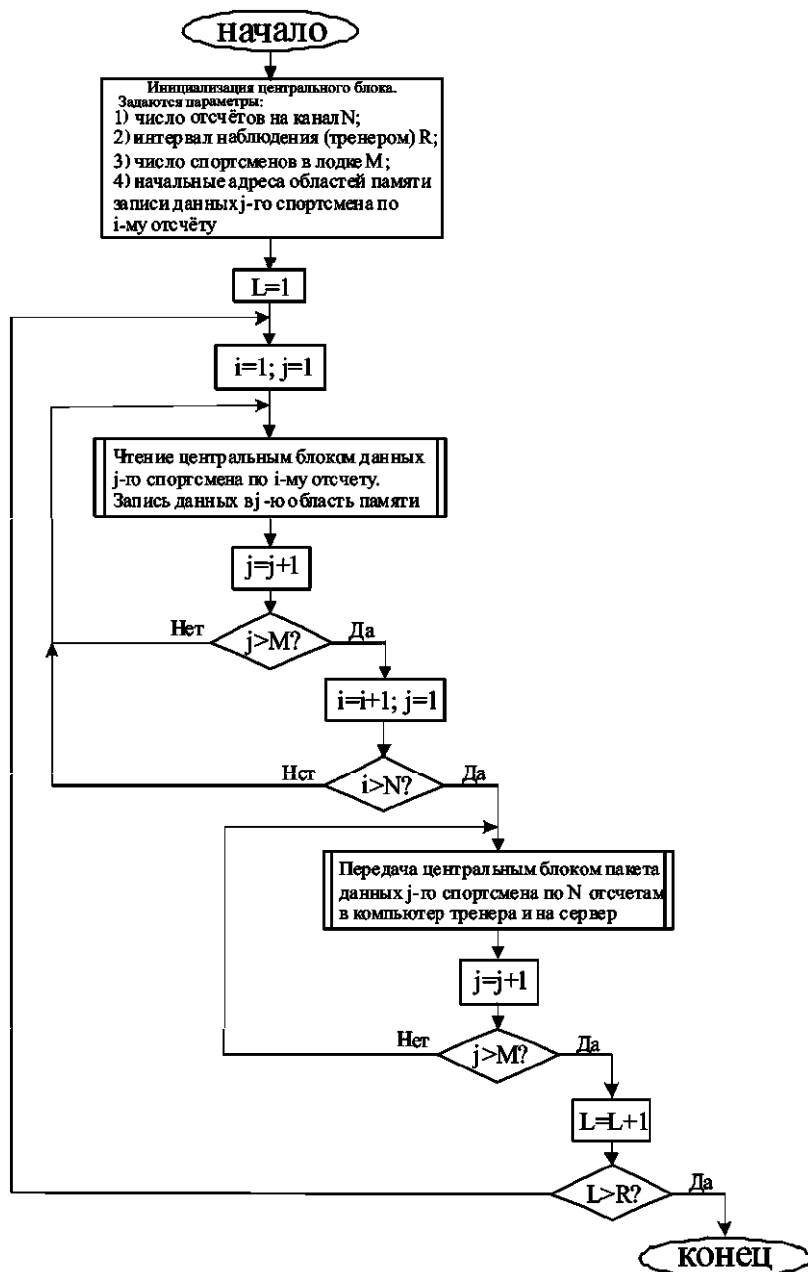


Рис 1

Для реализации алгоритма (см. рис. 1) в виде структурной схемы беспроводной телеметрической системы был проведен выбор оборудования для блоков системы. Основные принципы построения системы представлены в работе [6]. Для блока на весле рассмотрены датчики MPU-6050, BMI-160, ICM-20602, MPU-6500. В результате сравнения их характеристик выбран датчик MPU-6500 благодаря низкому уровню шума, адекватному диапазону напряжения и минимальным требованиям к питанию [7]. Далее для того же блока рассмотрены микроконтроллеры ESP32-S3, nRF52840, STM32. В результате проведенного анализа выбран микроконтроллер ESP32-S3, который характеризуется достаточной для

поставленной задачи вычислительной мощностью и быстродействием и оснащен встроенным модулем Wi-Fi [8].

Затем была выбрана технология связи внутри лодки, которая осуществляется между блоками на веслах и центральным блоком. Рассматривались технологии BLE, Zigbee, LoRaWAN, Wi-Fi. Технология BLE нестабильна при одновременном взаимодействии с большим числом устройств, технологии Zigbee и LoRaWAN имеют ограниченную скорость передачи данных [9]. В результате выбрана технология Wi-Fi 802.11n [10], которая обеспечивает необходимую скорость передачи данных и стабильность связи при расстоянии передачи 10–15 м.

Произведен выбор одноплатного компьютера для центрального блока. Рассматривались одноплатные компьютеры Jetson Nano и Raspberry Pi4. Компьютер Jetson Nano отличается высоким энергопотреблением, неприемлемым для автономного питания. Одноплатный компьютер Raspberry Pi4 [11] выбран из-за низкого энергопотребления, встроенной поддержки LTE-модемов и надежности работы.

Для связи лодки с компьютером тренера на берегу и с сервером выбран LTE-модем SIM7600E-H, способный обеспечить стабильную и дальнюю связь и надежную передачу требуемого объема данных.

Таким образом, в результате анализа возможностей основных современных телеметрических систем, а также анализа и обоснованного выбора ряда датчиков и устройств, используемых в гребле, предлагается телеметрическая система, полностью соответствующая выдвинутым требованиям. Она основана на современных микроконтроллерах ESP32, датчиках MPU-6500 и одноплатном компьютере Raspberry Pi4 с LTE-модулем.

На рис. 2 представлена структура системы на спортивной лодке для четырех гребцов. В правой части схемы показаны идентичные блоки, располагающиеся на веслах, в левой части представлен центральный блок системы, осуществляющий сбор данных с блоков на веслах, упаковку данных в пакеты и дальнейшую их отправку с помощью LTE-модуля.

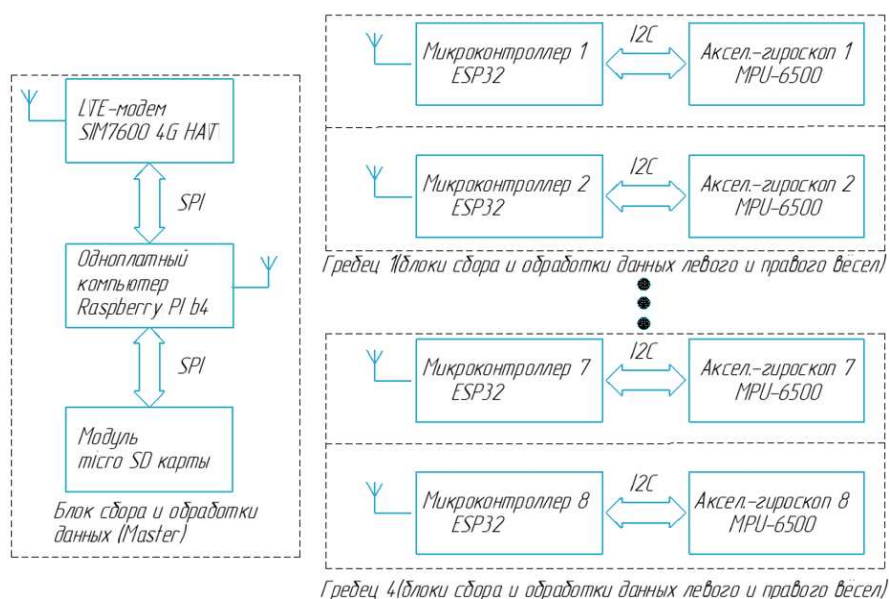


Рис. 2

Основой измерительного блока на весле является датчик MPU-6500, который одновременно предоставляет показания акселерометра (линейные ускорения) и гироскопа (угловые скорости). Каждый канал имеет шестнадцатитбитное разрешение и выдает значения в диапазоне $-32768...32767$ уровней квантования. Физический диапазон для акселерометра обычно выбирается $\pm 4g$, гироскоп работает в диапазоне ± 250 град/с или ± 500 град/с. Преобразование исходных отсчетов в реальную величину осуществляется по формуле

$$P = \frac{S}{K}, \quad (6)$$

где P – искомая физическая величина; S – число уровней квантования, выданных датчиком; K – коэффициент, который задается заводскими настройками датчика (например, для гироскопа с диапазоном ± 250 град/с это примерно 131 отсчет на 1 град/с, а для акселерометра $\pm 4g$ – 8192 отсчета на $1g$).

При опросе датчика микроконтроллер ESP32 собирает данные, записывает их в буфер для последующей передачи. После N опросов датчика (см. рис. 1) ESP32 формирует структуру пакета – время (таймер микроконтроллера), угловую скорость, ускорение по осям X , Y , Z . Пакеты отправляются по протоколу UDP или TCP с помощью технологии Wi-Fi на одноплатный процессор Raspberry Pi4. Так как приоритетом является сохранность всех пакетов (во избежание потерь информации), выбирается протокол TCP, так как протокол UDP сокращает задержки, но может допускать случайную потерю части пакетов в условиях помех.

На Raspberry Pi4 используется приложение (написанное, например, на Python или C++), принимающее пакеты и связывающее их с идентификаторами блоков на веслах (каждый блок имеет свой IP или MAC-адрес). Это приложение может записывать данные в буфер, синхронизировать время прихода и вычислять задержку для каждого блока, а затем по пакетам отсылать данные через LTE-модем. В случае стабильной работы мобильной сети можно настроить постоянное соединение с удаленным сервером: каждая секунда тренировочного процесса отражается в базе данных, к которой тренер получает доступ в реальном времени через веб-интерфейс.

Систематический сбор данных (синхронность углов гребков, отслеживание циклов гребка) обеспечивает получение подробной картины, что позволяет тренерам анализировать биомеханику каждого гребца, выявлять расхождения в работе гребцов. При соответствующей поддержке серверного программного обеспечения можно строить «портрет гребка», отображающий кривые угла и ускорения за каждый цикл, и находить отличия от эталонной или более эффективной техники.

Важным параметром является время автономной работы устройств на весле. Поскольку батарея должна быть компактной и влагозащищенной, режимы «сна» микроконтроллера ESP32 и оптимизация передачи данных играют существенную роль. В активном режиме передачи ESP32 потребляет ток до 150–200 мА, в режиме «сна» среднее потребление тока снижается вдвое. Датчик MPU-6500 в стандартном режиме измерений и передачи данных потребляет ток 3–4 мА, что не так критично. Таким образом, система способна работать более 4 ч на батарее емкостью 800–1000 мА·ч, обеспечивая типичную продолжительность тренировки.

Питание одноплатного процессора Raspberry Pi осуществляется от отдельного аккумулятора. LTE-модуль также требует дополнительно 100–200 мА при активном подключении, но, поскольку Raspberry Pi работает от аккумулятора большей емкости, чем блоки на веслах, это не создает серьезных ограничений. При необходимости пользователь может отключать LTE-модуль и работать в режиме офлайн, архивируя данные локально, а затем загружая их в сервер после окончания тренировки.

Представленная в работе телеметрическая система сочетает компактность блоков (ESP32 и MPU-6500) и высокие возможности передачи данных (Wi-Fi внутри лодки и LTE для передачи с лодки в центр).

Преимущества разработанной системы заключаются в следующем.

1. Гибкая архитектура.

При необходимости несложно добавить дополнительные блоки на веслах, например биосенсоры, силовые датчики (тензодатчики).

2. Беспроводная связь.

Упрощает монтаж и герметизацию, что критично при использовании в водной среде.

3. Оперативность анализа.

Тренер видит ключевые показатели в реальном масштабе времени.

4. Подбор экипажа лодки.

Анализируя собранные системой данные о тренировочном процессе, тренер может оптимально подобрать экипаж по критерию синхронности и эффективности его работы.

5. Возможность масштабирования системы.

Благодаря блочной архитектуре система характеризуется высокой масштабируемостью и может быть адаптирована к различным конфигурациям лодок и переменному числу спортсменов без возникновения принципиальных технических ограничений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kleshnev V.* BioRowTel: On-Board Rowing Telemetry System: Technical Leaflet. Cambridge: BioRow Ltd., 2019. 12 p.
2. Nielsen-Kellerman. Speed Coach GPS Model 2: Instruction Manual. Boothwyn, 2023. 56 p.
3. Rowing in Motion GmbH. Sensor Platform White Paper. Munich, 2022. 18 p.
4. Quiske RowPod: Technical Specification. Helsinki, 2024. 20 p.
5. Жуков С.Е., Тарасова О.А., Загоровский В.А. Искусство быть тренером по гребле академической. Минск: БГУФК, 2021. 91 с.
6. Щербакова Т.Ф., Седов С.С., Копьев М.А. Телеметрическая система сбора и первичной обработки информации со спортивной лодки // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2023. № 4. С. 138–141.
7. InvenSense Inc. MPU-6500 Product Specification. San Jose, 2013. 52 p.
8. Espressif Systems. ESP32-S3 Technical Reference Manual. Shanghai, 2023. 892 p.
9. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети: принципы, технологии, протоколы. М.: Питер, 2010. 943 с.
10. Лихолетова Е.С. и др. Пропускная способность канала связи как гарантия качества цифрового дистанционного управления непрерывным техническим объектом // Вестник МГПУ. Сер. Информатика. 2015. № 8. С. 5–8.
11. Raspberry Pi 4 Model B: Technical Specifications. Cambridge: Raspberry Pi Trading Ltd., 2020. 40 p.

Поступила в редколлегию 16.02.26

ALGORITHM AND SYSTEM FOR REGISTRATION AND PRIMARY PROCESSING OF DYNAMIC OAR MOVEMENT PARAMETERS IN ACADEMIC ROWING

T.F. Scherbakova, S.S. Sedov, and R.Yu. Zaporozhets

An algorithm and a system have been developed for recording and processing the movement parameters of sports boat oars. Analysis of oars movement during rowing was carried out, on the basis of which the type of sensors suitable for monitoring the oars movement was determined, the frequency of polling the sensors was justified and the speed of the transmitted information was determined. A block diagram of a wireless telemetry system implementing this algorithm has been developed. The choice of the element base for this system was made and justified and a comparison with existing solutions was made.

Keywords: telemetry, academic rowing, wireless data transmission system, reliability, scalability.

Щербакова Татьяна Филипповна – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: TFScherbakova@kai.ru

Седов Станислав Сергеевич – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: s.sedov@gmail.com

Запорожец Роман Юрьевич – студент (КНИТУ-КАИ, Казань)
E-mail: romanzaporozhetsss@gmail.com

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. Внутрисуточные 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**

2026, № 1 (123)

Ответственный за выпуск *Е.М. Зиннатуллина*
Компьютерная верстка – *А.А. Золина*

Подписано в печать 20.03.26. Выход в свет 25.03.26
Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 16.
Тираж 200. Заказ А53. 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