

ПЕРМСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ФИЗИКА ДЛЯ ПЕРМСКОГО КРАЯ

Материалы региональной
научно-практической конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых

Выпуск 15



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФИЗИКА ДЛЯ ПЕРМСКОГО КРАЯ

*Материалы
региональной научно-практической конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых*

Выпуск 15



Пермь 2022

УДК 53(470.53)
ББК 22.3(2Рос4Пер)
Ф503

Физика для Пермского края [Электронный ресурс] : материалы региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / под общ. ред. Н. Н. Картавых; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Электронные данные. – Пермь, 2022. – Вып. 15. – 20 Мб; 178 с. – Режим доступа: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/sborniki/fizika-v-permskom-krae-2022.pdf>. – Заглавие с экрана.

ISBN 978-5-7944-3875-8 (вып. 15)
ISBN 978-5-7944-1699-2

В данном сборнике представлены материалы региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, проходившей на базе Пермского государственного национального исследовательского университета с 20 по 28 апреля 2022 г. Традиционно в конференции принимали участие не только представители вузов и научных учреждений Пермского края, но и работники наукоемких промышленных предприятий региона.

Тематика сборника охватывает широкий спектр актуальных исследований в области физической гидродинамики, физики твердого тела, перспективных материалов и технологий, физики мягких конденсированных сред, радиофизики и электроники, информационных технологий, методов и средств защиты информации.

Издание предназначено для научных работников, аспирантов и студентов естественнонаучных специальностей вузов.

УДК 53(470.53)
ББК 22.3(2Рос4Пер)

*Издается по решению ученого совета физического факультета
Пермского государственного национального исследовательского университета*

Рецензенты

Константинов Ю. А. – к. т. н., старший научный сотрудник с исполнением функций зав. лабораторией фотоники Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН;

Паршакова Я. Н. – к. ф.-м. н., с. н. с. лаборатории вычислительной гидродинамики Института механики сплошных сред УрО РАН

ISBN 978-5-7944-3875-8 (вып. 15)
ISBN 978-5-7944-1699-2

© ПГНИУ, 2022

ОРГАНИЗАТОРЫ

Физический факультет Пермского государственного национального исследовательского университета.

Председатель конференции

Лунегов И. В. – к. ф.-м. н., доцент, и. о. декана физического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета, зав. кафедрой радиоэлектроники и защиты информации.

Члены оргкомитета

Бабушкин И. А. – к. ф.-м. н., доцент, зав. кафедрой общей физики;

Волынцев А. Б. – д. ф.-м. н., профессор, зав. кафедрой нанотехнологий и микро-системной техники;

Демин В. А. – д. ф.-м. н., доцент, зав. кафедрой теоретической физики;

Макаров Д. В. – к. ф.-м. н., доцент, зав. кафедрой физики фазовых переходов;

Ученый секретарь конференции

Картавых Н. Н. – к. ф.-м. н., зам. декана физического факультета по научной работе.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Волохов Н. С., Хаямов Д. О., Сосунов А. В., Напарин М. А.</i> Термогравиметрия нанокompозита Со-С.....	6
<i>Мясникова Е. В., Семенова О. Р.</i> Рентгенографическое исследование микроструктуры тонких слоев оксида алюминия	11
<i>Веикурова Н. В., Картавых Н. Н.</i> Электроконвекция слабопроводящей жидкости в невесомости при антисимметричном внешнем сигнале.....	18
<i>Задорожный Н. И., Петров Д. А.</i> Статистическая теория жидкокристаллических композитов углеродных нанотрубок: сферическое приближение.....	24
<i>Казанцев П. Н., Краузин П. В.</i> Уточнение порога термомагнитной конвекции магнитной жидкости в шаровой полости.....	30
<i>Копытова Е. А., Петров Д. А.</i> Метод эффективного поля в физике жидкокристаллических композитов углеродных нанотрубок.....	36
<i>Копытова Е. А., Мезенцева А. М., Возжаков М. И.</i> Методика расчета параметров жидкокристаллической ячейки	40
<i>Крыласова О. С., Макарихина Е. И., Овчинников Т. А., Худяков И. Ю.</i> Диэлектрический анализ магнитной жидкости.....	45
<i>Кучукова А. Т., Краузина М. Т., Краузин П. В.</i> Влияние магнитного поля на конвекцию магнитной жидкости в горизонтальном кольцевом зазоре.....	50
<i>Ильин В. А., Суханов М. О.</i> Хаотические и периодические режимы электроконвекции идеального жидкого диэлектрика в переменном электрическом поле.....	56
<i>Володин И. В., Алабужев А. А.</i> Магнитное поле в тонком слое ферро-жидкости под действием вертикальных вибраций.....	62
<i>Гаричева Ю. В., Заякина И. А., Любимова Т. П., Иванцов А. О.</i> Численное моделирование взаимодействия капли воды с жидкостью в зависимости от её вязкости.....	66
<i>Демин В. А., Костыря А. В.</i> Численное моделирование трёхфазного потока газ-жидкость-твёрдые частицы в установке погружного горения.....	72
<i>Анкудинова К. С., Семёнов В. А.</i> Параметрическая неустойчивость шара, подвешенного на струне с переменным натяжением.....	78

<i>Фаттахова И. А., Рыбкин К. А., Любимова Т. П., Кучинский М. О.</i> Особенности генерации микропузырьков в растворах SDS вблизи точки мицеллообразования.....	83
<i>Аль-Балуши А. А. А, Журавлев А. А., Вольхин И. Л.</i> Исследование температурных дрейфов волоконно-оптического датчика электрического потенциала.....	89
<i>Андреева А. А., Гнездилова Д. И., Манцуоров А. В.</i> Разработка микропроцессорного термостата	94
<i>Барминов А. В., Пигасов М. В., Бушуев Я. А., Романов М. А., Манцуоров А. В.</i> Разработка цифрового пульсоксиметра.....	100
<i>Ванюков В. В., Вольхин И. Л.</i> Импульсный источник вторичного электропитания	106
<i>Гаркушин А. А., Расулев Р. П., Нифонтова Е. В., Криштон В. В., Вольхин И. Л.</i> Разработка системы мониторинга с энергоснабжением по оптическому волокну.....	112
<i>Гаркушин А. А., Цао М. С., Голубчиков Е. А., Скрябин С. А., Харитонов Д. Р., Мишуткин Д. А., Вольхин И. Л.</i> Разработка модулей системы сбора данных с датчиков физических величин.....	119
<i>Давыдов М. А., Черепанов И. Н.</i> Биометрическая аутентификации по венозному рисунку ладони.....	125
<i>Жужгов М. В., Семёнов В. А.</i> О недостатках управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования в информационных системах класса ERP	131
<i>Кадочиков И. В., Горбушин В. Ю., Торопыцын Д. С., Рябов А. П., Вольхин И. Л., Гаркушин А. А., Шилова О. Д.</i> Универсальная метеостанция на основе цифровых компонентов.....	138
<i>Корякина Д. О.</i> Разработка модели оптимального стриминга.....	144
<i>Лунегов А. И., Лунегов И. В.</i> Математическое моделирование физических процессов в суперлюминесцентном волоконном источнике оптического излучения.....	150
<i>Матарзин С. В., Черепанов И. Н.</i> Анализ данных социальных сетей... ..	155
<i>Опарин Н. И., Мушинский С. С., Вольхин И. Л.</i> Уменьшение вибрационной погрешности волоконно-оптического гироскопа.....	160
<i>Плотников Е. С., Манцуоров А. В.</i> Разработка системы первичного анализа индуктора проточной части импульсного электромагнитного преобразователя расхода ПРИМ.....	166
<i>Третьяков Д. А., Селетков И. П.</i> SaaS платформа электронной коммерции с использованием Telegram ботов.....	172

ТЕРМОГРАВИМЕТРИЯ НАНОКОМПОЗИТА Co-C

Н. С. Волохов, Д. О. Хаюмов, А. В. Сосунов, М. А. Напарин
Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева 15

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии проведена оценка энергии активации трансформации нанокompозита Co-C при нагреве. Установлено, что материал имеет четыре реакции в характерных диапазонах температур от 100 до 700 °С. Проведен элементный анализ исследуемых образцов и рассчитана энергия активации наблюдаемых реакций.

Ключевые слова: нанокompозит; термогравиметрия; энергия активации

THERMOGRAVIMETRY Co-C NANOCOMPOSITE

N. S. Volokhov, D. O. Khaiumov, A. V. Sosunov, M. A. Naparin
Perm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

The activation energy of the transformation of the Co-C nanocomposite under heating was estimated by differential scanning calorimetry. It is established that the material has four reactions in temperature ranges from 100 to 700 °C. The activation energy was calculated and elemental analysis was carried out for the samples.

Keywords: nanocomposite; thermogravimetric; activation energy

1. Введение

Металлические наночастицы и мезопористые углеродные материалы представляют большой интерес как в фундаментальном изучении их свойств, так и в использовании их в различных приложениях. Графеноподобные структуры уже нашли своё применение в качестве обкладок суперконденсаторов [1] благодаря своей большой удельной площади поверхности и способности адсорбировать ионы [2]. Однако, в литературе нет примеров изучения нанокompозита Co-C методом дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрии.

Целью данной работы является анализ структуры нанокompозита Co-C и оценка энергии активаций реакций, протекающих в нём при нагреве.

2. Получение образцов

Нанокompозит Co-C был получен в два этапа. Первый этап состоял в создании и сушке прекурсора, а второй – в отжиге полученного материала. Для получения прекурсора смешивали тетрагидрат ацетата кобальта ($\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) и лимонную кислоту ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) в соотношении 1:1, после чего смесь растворяли в дистиллированной воде. Из полученного раствора выпаривали всю воду в автоклаве в течении 7 дней при температуре 85 °С.

Затем проводили отжиг прекурсора в атмосфере азота при температуре

600°C в течении 10 минут. После этого образец охлаждали до комнатной температуры в инертной атмосфере, чтобы исключить окисление материала. Подробное исследование микро и наноструктуры данных материалов представлено в работе [1].

3. Методика эксперимента

Микроструктуру исследуемых образцов исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа S-3400N Hitachi при ускоряющем напряжении 20 кВ в режиме вторичных электронов. Исследование элементного состава образцов проводили с помощью энергодисперсионного анализа на приставке INCA.

Исследование превращений образцов проводилось на установке STA-449C Jupiter. Принцип действия прибора основан на равномерном одновременном нагреве исследуемого образца и эталона с измерением разности их тепловых потоков. Встроенные высокоточные весы позволяют следить за изменением массы образца в ходе процесса нагрева или охлаждения. Схема установки показана на (рис. 1).

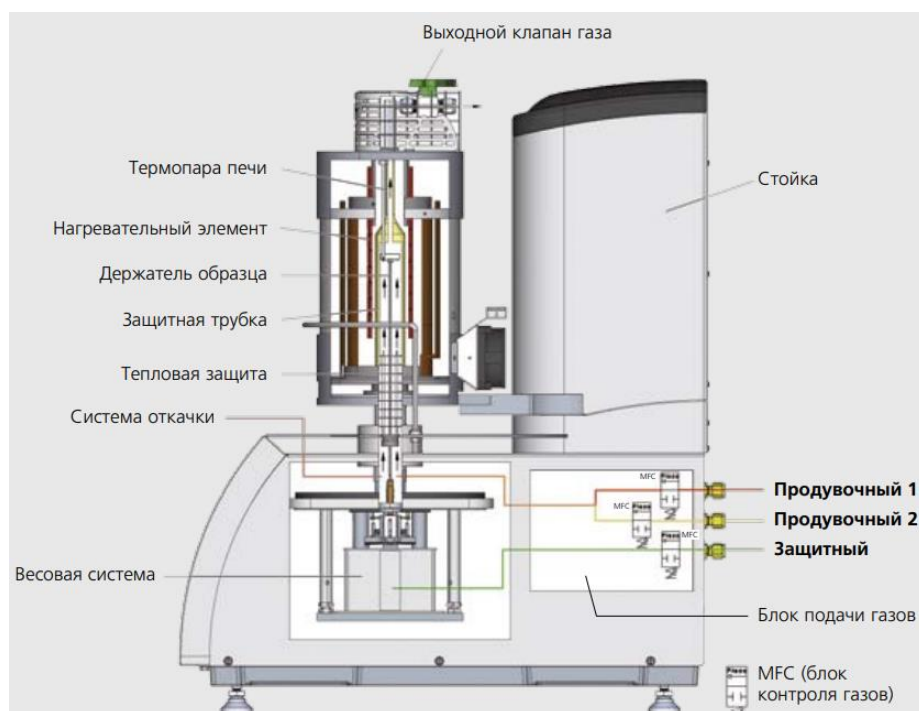


Рис. 1. Схема установки STA-449C Jupiter [3]

Образец и эталон помещали в тигли, после чего из рабочей камеры откачивался воздух, и камера заполнялась аргоном со скоростью потока 25 мл/мин. Нагрев происходил с различными скоростями 5 – 40°C/мин в атмосфере аргона до 700 °C. После чего охлаждался до 150°C. Точность измерения температуры $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Точность определения веса ± 0.001 мг.

Были получены зависимости изменения теплового потока и массы от температуры с помощью программы Proteus Analysis.

4. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены изображения микроструктуры исследуемых образцов. Поверхность образцов представляет собой зёрна размером 200 – 500 мкм, которые в свою очередь состоят из субзёрен размером 5 – 30 мкм.

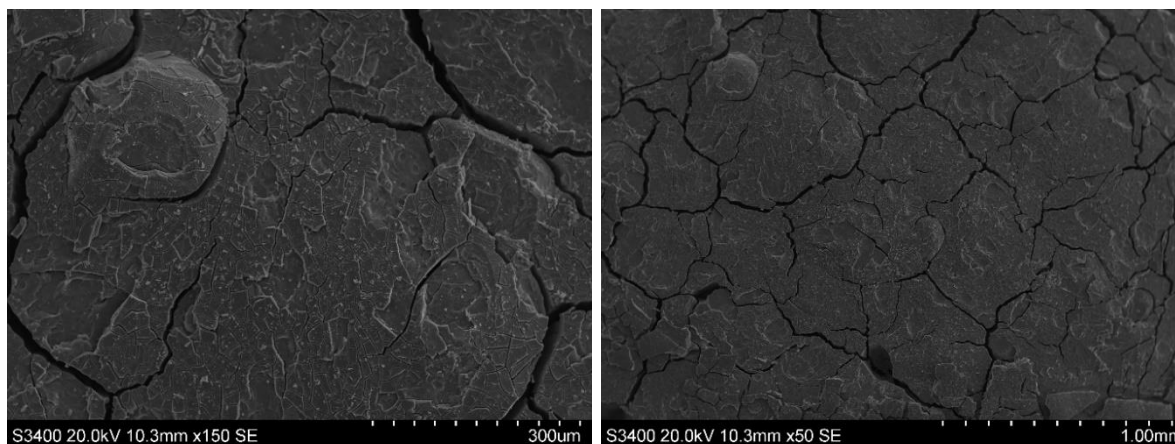


Рис. 2. Изображения микроструктуры кобальтовых наночастиц при различном увеличении

В ходе работы были получены три различных образца, каждый из которых имел разное соотношение элементов в своем составе (табл. 1) Элементный анализ показал, что в каждом из образцов наблюдается различное соотношение кобальта и кислорода.

Табл. 1. Весовое соотношение кобальта, кислорода и углерода для трёх полученных образцов

№ Образца	Весовой Со, %	Весовой О, %	Весовой С, %
1	60.3	11.7	28.0
2	74.0	4.0	22.0
3	77.7	5.7	16.6

По данным дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) были построены температурные (ТГ) и дифференциальные (ДТГ) кривые (рис. 3), на которых наблюдаются максимумы температур, при которых происходили реакции, сопровождаемые большой потерей массы образцов.

По формуле Киссинджера [4], были рассчитаны энергии активаций реакций для каждого из полученных максимумов на кривых по формуле:

$$E = -R \frac{d[\ln(\frac{\beta}{T_{\text{макс}}^2})]}{d(\frac{1}{T_{\text{макс}}^2})},$$

где R , β , $T_{\text{макс}}$ – универсальная газовая постоянная, скорость нагрева в К/мин и максимальная температура в Кельвинах, соответственно. Энергией

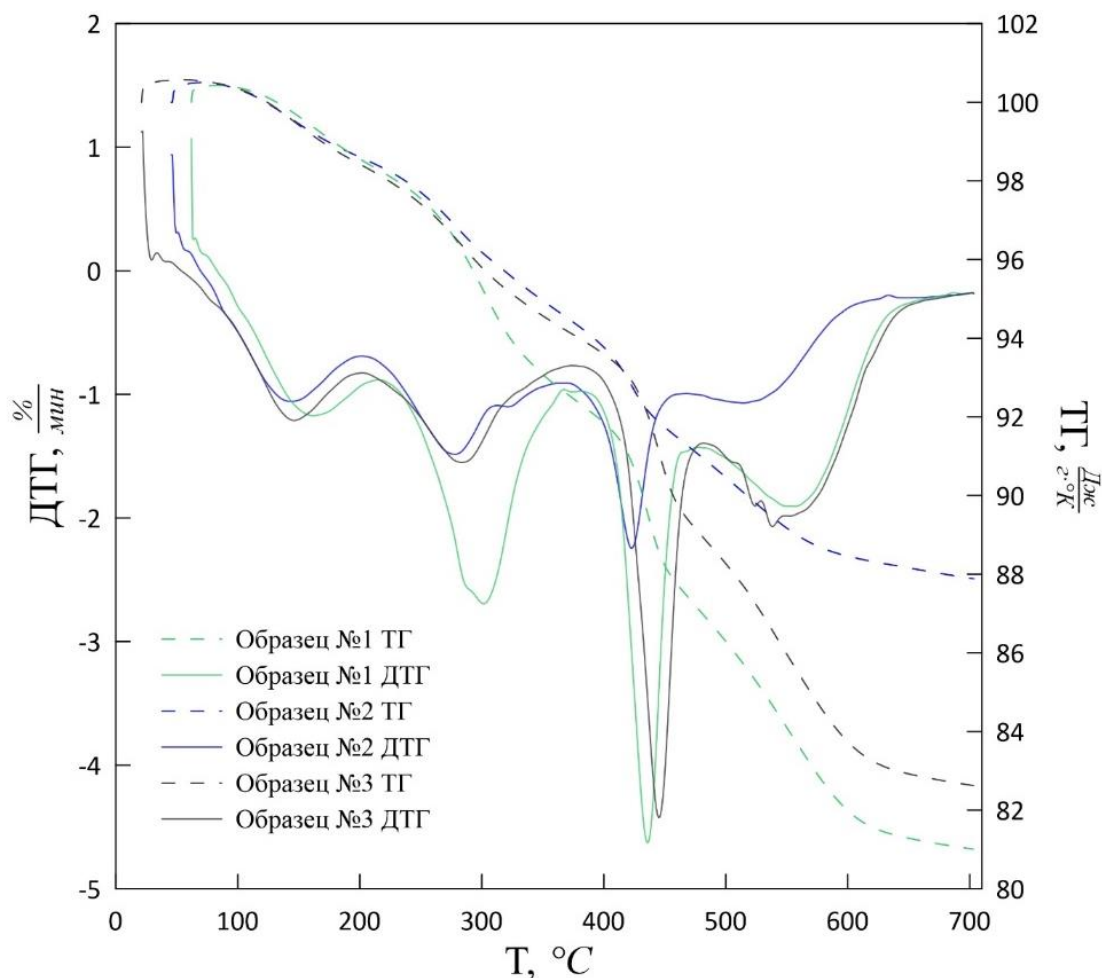


Рис. 3. Термограммы нагрева кобальтовых наночастиц для трёх образцов

активации принято считать энергию необходимую для начала какого-либо процесса.

Начало процесса соответствует точке, где функция отклоняется от монотонного хода, а конец – максимум функции [4]. Из графика видно, что у нанокompозита Co-C наблюдается четыре характерных диапазона температур, на каждом из которых, наблюдаются реакции, сопровождающиеся потерей массы образца. При этом можно утверждать, что реакции не является фазовыми переходами второго рода, т. к. они не сопровождается изменением веса образца.

Полученные значения энергии активации (табл. 2), позволяют утверждать, что данный эффект характерен для композитного материала кобальтовых наночастиц покрытых углеродом. Это следует из того, что энергия активации значительно ниже для реакций, происходящих при нагреве при тех же условиях для массивного кобальта. Смещение пиков у разных образцов на кривых, для каждого диапазона температур (140 – 165 °C, 270 – 305 °C, 420 – 450 °C, 510 – 560 °C) может говорить о том, что данное явление коррелирует с элементарным составом материала.

*Табл. 2. Энергия активации фазового перехода
в интервале температур от 420 до 450°C*

№ Образца	T _{макс} , °C	E, кДж
1	435.7	55.6
2	422.7	54.4
3	445.4	56.5

5. Заключение

Методом электронной микроскопии и термогравиметрии были получены элементный анализ и термограммы для нанокompозита Co-C. Определена энергия активации для реакций, протекающих при различных температурах.

Список литературы

1. Рудаков Г. А., Сосунов А. В., Пономарев Р. С., Хеннер В. К. и др. Синтез полых углеродных наноболочек и их применение для суперконденсаторов // Физика твердого тела. 2018. Т. 60. № 1. С. 165-170.
2. Chen X., Paul R., Dai L. Carbon-based supercapacitors for efficient energy storage // National Science Review. 2017. Vol. 4. P. 453-489.
3. NETZSCH Analyzing and testing [Электронный ресурс]. URL: <https://analyzing-testing.netzsch.com/ru/pribory-resheniya/sinhronnyj-termicheskij-analiz-termogravimetriya-i-dsk/sta-449-f3-jupiter> (дата обращения: 10.06.2022).
4. Спивак Л. В., Рамт А. В. Дифференциальный калориметрический анализ и термограмметрия при фазовых переходах в конденсированных средах: учеб.-метод. пособие. Пермь: Перм. гос. ун-т., 2007. 23 с.

РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ТОНКИХ СЛОЕВ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Е. В. Мясникова, О. Р. Семенова

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

Проведен рентгеновский фазовый анализ тонких волноводных слоев, напылённых методом электронно-лучевого осаждения на подложки монокристаллического кремния. Показано, что образцы с осажденными слоями оксида алюминия содержат как аморфную фазу, так и кристаллические δ - и γ -фазы оксида алюминия. Дана оценка качества оптических волноводов на основе оксида алюминия с точки зрения структурных характеристик.

Ключевые слова: оксид алюминия; рентгенографический анализ; аморфная фаза

X-RAY EXAMINATION OF THE MICROSTRUCTURE OF THIN LAYERS OF ALUMINUM OXIDE

E. V. Myasnikova, O. R. Semenova

Perm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

An X-ray phase analysis of the thin waveguide layers deposited by the electron-beam deposition onto the single-crystal silicon substrates has been carried out. It is shown that the samples with deposited aluminum oxide layers contain both an amorphous phase and crystalline δ - and γ -phases of aluminum oxide. The quality of optical waveguides based on aluminum oxide is estimated from the point of view of the structural characteristics.

Keywords: aluminium oxide; X-ray analysis; amorphous phase

В настоящее время в связи со стремительным развитием твердотельной интегральной оптоэлектроники и фотоники значительное внимание уделяется изучению эффектов и явлений в наноразмерных структурах. Используя особенности наноразмерных эффектов и явлений, создаются принципиально новые изделия интегральной электроники. Например, в гигагерцевом диапазоне частот информация, кодируемая потоком фотонов, передается через каскад оптических элементов, связанных между собой оптическими каналами и образующих интегральные схемы.

Одним из условий получения качественных оптических интегральных схем является изготовление эффективной волноводной структуры. Оксидные пленки вентильных металлов успешно могут быть использованы для этих целей, а именно для изготовления тонкослойных (или иначе тонкопленочных) волноводов, применяемых в интегральной электронике.

Лидирующее место среди оксидных пленок занимает оксид алюминия Al_2O_3 . Высокая прозрачность в широком спектральном диапазоне и значительная стойкость к большим плотностям оптического излучения

делает его очень перспективным для использования в интегральных оптических схемах.

Для применения в оптоэлектронике тонкие слои Al_2O_3 получают различными методами послойного осаждения на подложку в вакууме. Важным критерием выбора метода является получение аморфных слоев. Структура таких материалов, как правило, определяется методами дифракционного структурного анализа. Поэтому настоящая работа посвящена исследованию структуры тонких слоев Al_2O_3 на кремниевых подложках, полученных методом электронно-лучевого напыления.

Оксид алюминия, обычно называемый глиноземом, – это бесцветный нерастворимый в воде кристалл, амфотерный оксид. Анализ исследования структур и свойств полиморфных модификаций Al_2O_3 показывает, что их микроструктуры и физико-механические свойства сильно зависят от чистоты исходных материалов, способов получения, а также наличия и состава добавок и примесей [1]. В природе можно встретить только тригональную α -модификацию Al_2O_3 в виде минерала корунда. Еще одна модификация γ - Al_2O_3 имеет кубическую кристаллическую решетку, у β -модификации гексагональная кристаллическая решетка.

Существует также аморфный Al_2O_3 – алюмогель, образующийся при обезвоживании гелеобразного $\text{Al}(\text{OH})_3$ и представляющий собой пористое, иногда прозрачное вещество [2, 3].

Известны также следующие кристаллические модификации оксида алюминия: χ -, ε -, δ -, θ -, ρ -, κ -, η - Al_2O_3 , называемые переходными фазами, их свойства слабо изучены [3]. Список полиморфных модификаций Al_2O_3 и их различия в кристаллической структуре представлены в табл. 1 (a , b , c – параметры элементарной ячейки).

Хотя кристаллические структуры большинства полиморфных модификаций Al_2O_3 отчетливо различаются, межплоскостные расстояния d некоторых кристаллографических плоскостей в наиболее распространенных модификациях (γ -, θ -, δ -, α -фазах) очень похожи (табл. 2). Этот факт затрудняет быстро и эффективно проводить фазовый рентгенографический анализ. Из-за близкого сходства межплоскостных расстояний d среди этих полиморфов идентификация фаз при превращении в поликристаллическом Al_2O_3 может быть неоднозначной. Более того, большинство этих полиморфов сосуществуют во время фазового превращения оксида алюминия Al_2O_3 [4].

В зависимости от типа структурной модели принято следующее преимущественное разделение некристаллических диэлектриков: стекла, аморфные тела (в том числе пленки) и некристаллические полимеры. Оксид алюминия Al_2O_3 относится к группе стеклообразных оксидов, поскольку его пленки (тонкие слои) имеют большее сходство с соответствующими стеклами, чем с аморфными телами [5].

Табл. 1. Полиморфные модификации Al_2O_3 [3]

Фаза	Сингония/Тип решетки	Пространственная группа	a , Å	b , Å	c , Å
α - Al_2O_3	Тригональная/ корунд	R3c	4.75	—	12.99
γ - Al_2O_3	Кубическая/ шпинель	Fd $\bar{3}$ m	7.95	—	—
η - Al_2O_3	Кубическая/ шпинель	Fd $\bar{3}$ m	5.58	—	—
δ - Al_2O_3	Тетрагональная/ деформированная шпинель	—	7.94	—	23.50
θ - Al_2O_3	Моноклинная/ деформированная шпинель	C2/m	11.24	5.72	13.44
χ - Al_2O_3	Гексагональная/ —	—	5.56	—	13.44
κ - Al_2O_3	Гексагональная/ ϵ - Ga_2O_3	—	9.71	—	17.80

По сравнению с кристаллом оксид алюминия в аморфном состоянии является более сложным объектом, физические свойства которого недостаточно изучены. Аморфная структура оксида алюминия характеризуется наличием ближнего порядка. Аморфную сетку образуют полиэдры (тетраэдры и октаэдры), соединенные в вершинах кислородными мостиками и составляющие беспорядочную пространственную сетку из четырех и шестичленных колец и цепочек [5, 6].

При создании волноводов важно, чтобы осажденный оксид алюминия был однородным и аморфным. Поэтому без структурных исследований не обойтись.

В настоящей работе в качестве исследуемых образцов использовались аморфные пленки Al_2O_3 толщиной 1000 нм и 400 нм, полученные методом электронно-лучевого осаждения на подложках кремния. Предварительно до осаждения Al_2O_3 подложка кремния, представляющая монокристалл (кристаллографическая плоскость, совпадающая с поверхностью вейфера (100)), окислялась в парах воды в печи при температуре 1150°C в течение 17 часов. Таким образом, на подложке формируется оксид кремния толщиной около 2 мкм. Этот процесс является неотъемлемой частью изготовления волновода на основе оксида алюминия. При подборе режима изготовления волноводов некоторые образцы отжигали.

Табл. 2. Сравнение межплоскостных расстояний (d), индексов отражения (hkl) и относительных интенсивностей дифракции (I)* некоторых кристаллографических плоскостей γ -, θ -, δ -, α - Al_2O_3 [4]

γ - Al_2O_3			θ - Al_2O_3			δ - Al_2O_3			α - Al_2O_3		
(hkl)	d , Å	I , %	(hkl)	d , Å	I , %	(hkl)	d , Å	I , %	(hkl)	d , Å	I , %
111	4.56	40	201	4.54	18		4.55	30			
220	2.80	20	401	2.83	80		2.87	40			
							2.73	80			
311	2.39	80	111	2.44	60		2.43	60	110	2.38	40
222	2.28	50	401	2.31	45		2.28	40			
			202	2.26	35						
400	1.98	100	112	2.02	45		1.99	80	113	2.08	100
							1.95	30			
511	1.52	30	313	1.54	25		1.51	30			
							1.49	40			
440	1.39	100	403	1.39	100		1.40	60	214	1.40	30
			710	1.43	10		1.39	100	300	1.37	50
444	1.14	20					1.14	20			

*По данным Объединенного комитета по стандартам порошковой дифракции (JCFDS), $a = 7.96$ Å, $c = 23.42$ Å.

Структурные исследования проводили на дифрактометре Bruker D8 Advance Eсо с использованием излучения кобальта. Был исследован диапазон углов 2θ : 15° – 85° с шагом 0.02° . Полученные дифрактограммы представлены на рис. 1 – 3, из которых видно, что присутствуют небольшие дифракционные пики, указывающие на наличие некоторой доли кристаллических фаз, смешанных с аморфными структурами, так как на рентгенограмме имеется диффузное гало. Для наглядного изображения дифракционных картин от осажденных слоев, части дифрактограмм, содержащие максимумы, отвечающие отражению (400) от монокристаллической подложки на угле 82.8° не показаны, так как максимумы от подложки на несколько порядков превышают высоту интересующих нас пиков.

Для исключения кристаллических фаз, которые могут сформироваться при окислении монокристалла кремния, также были получены дифрактограммы от образцов, на которые Al_2O_3 , не наносился. Одна из них представлена на рис. 4. Съемка проводилась на дифрактометре ДРОН-0,5 с медным излучением. Из рис. 4 видно, что на рентгенограмме присутствуют только отражения (400) от монокристаллического кремния на фоне аморфной фазы оксида кремния. Два пика отвечают β и α компонентам излучения. Таким образом, максимумы (пики) на рис. 1 – 3 отвечают фазам Al_2O_3 .

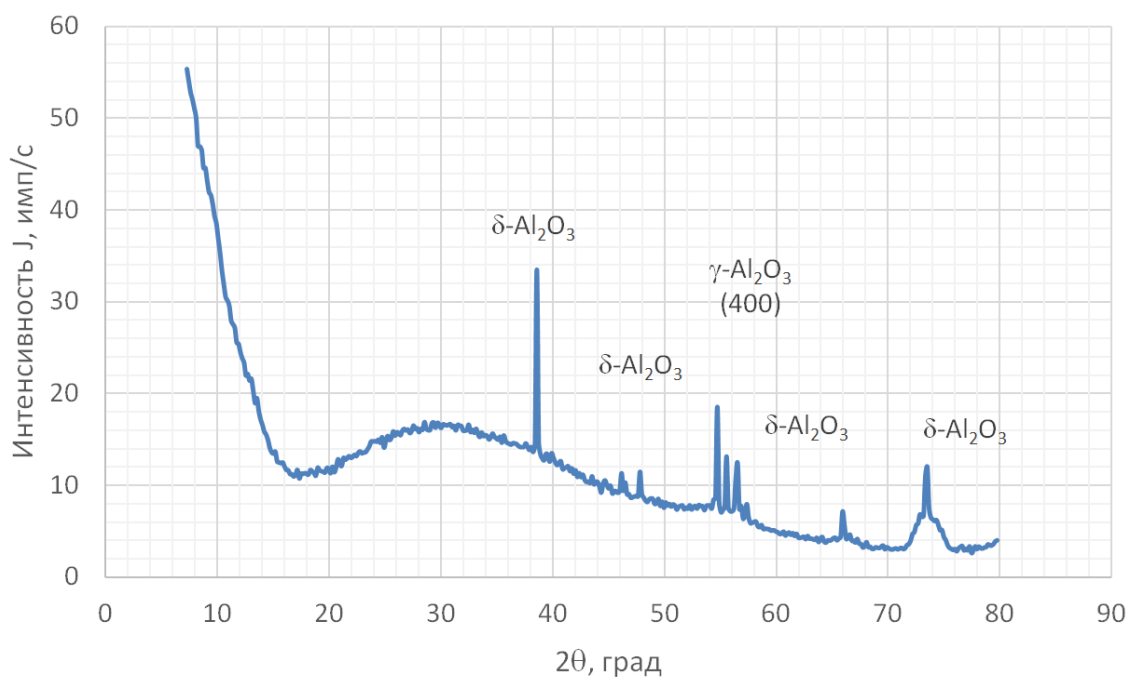


Рис. 1. Экспериментальная рентгенограмма оксида алюминия (слой 1000 нм, образец без отжига), излучение λ_{Co}

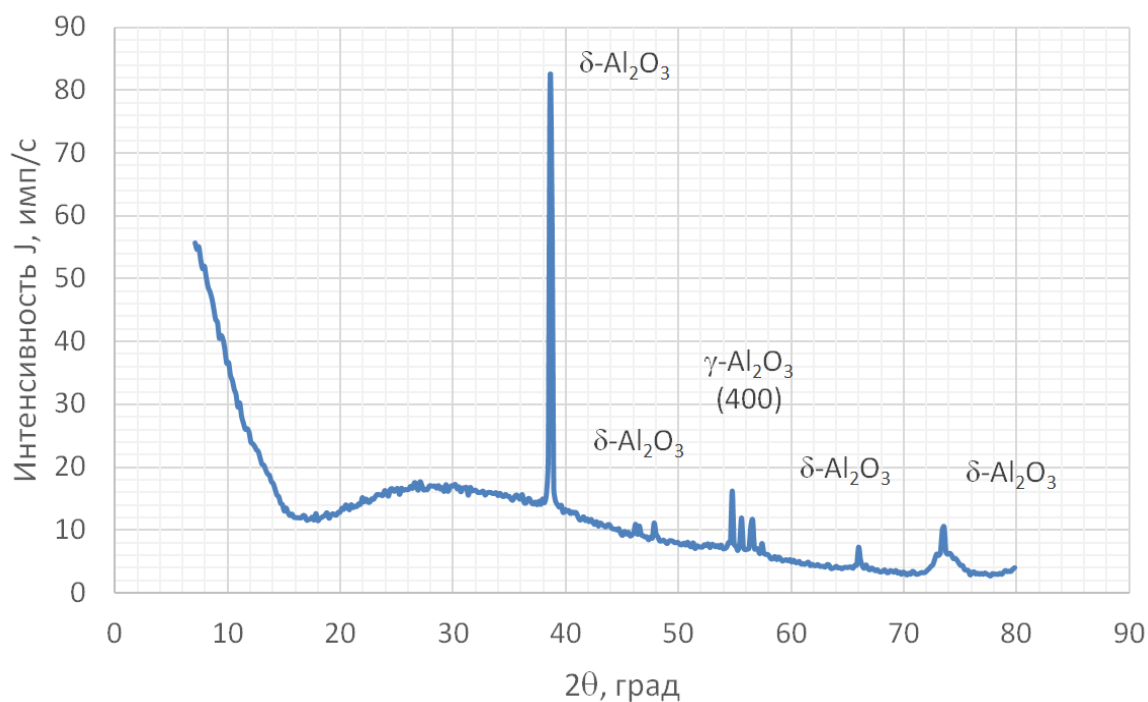


Рис. 2. Экспериментальная рентгенограмма оксида алюминия (слой 400 нм без, образец без отжига), излучение λ_{Co}

С использованием таблиц межплоскостных расстояний d для различных кристаллических фаз Al_2O_3 было определено, что максимумы на рис. 1 – 3 принадлежат δ- и γ-фазам, которые, могут являться первичными формами кристаллизации Al_2O_3 из расплава.

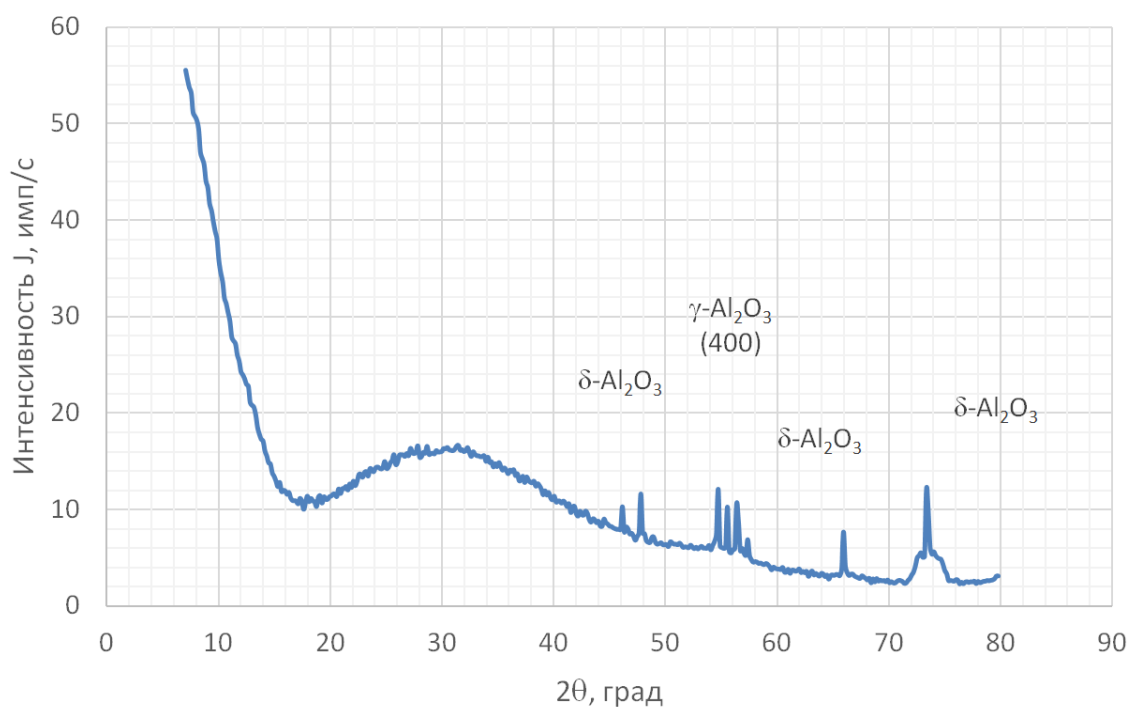


Рис.3. Экспериментальная рентгенограмма оксида алюминия (слой 400 нм, отжиг при 800 °С), излучение λCo

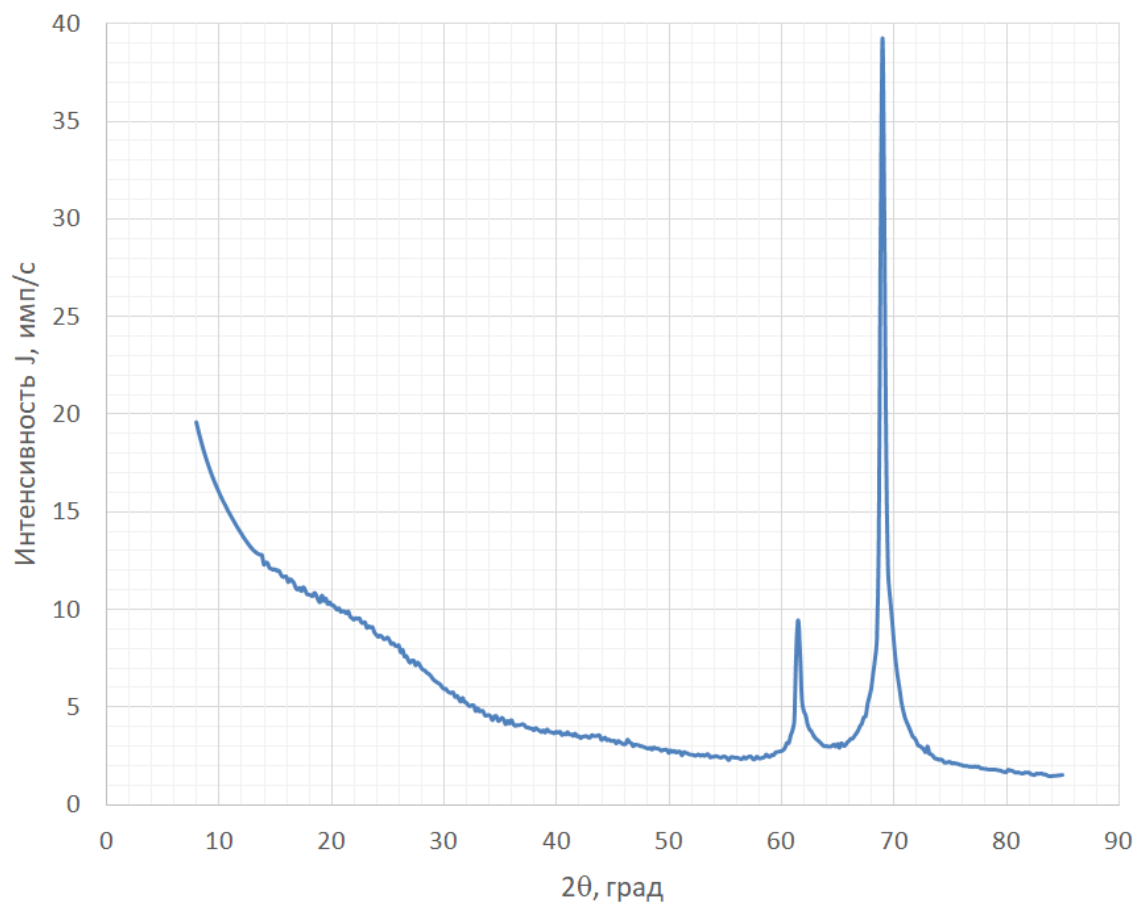


Рис. 4. Экспериментальная рентгенограмма подложки перед осаждением оксида алюминия, излучение λSi

Из сравнения рис. 2 и 3 следует, что отжиг привел к уменьшению или исчезновению некоторых дифракционных пиков. Это связано с тем, что в результате повышения температуры происходит фазовая рекристаллизация, которая вызывает рост кристаллических зерен. Так как дифрактограммы были получены без вращения исследуемых образцов, то слишком крупные зерна могли выйти из отражающего положения. Кроме того, отжиг приводит к изменению количественного соотношения кристаллической и аморфной долей в фазовом составе исследуемых образцов, что также отражается на дифрактограмме.

Доказательством, роста поликристаллических зерен, также является увеличение механических напряжений в исследуемых образцах, после отжига образцы становились очень хрупкими.

Из анализа дифрактограмм на рис. 1 – 4 следует, что выбранный режим создания тонкого слоя оксида алюминия требует коррекции, так как наряду с аморфной фазой присутствует кристаллическая фаза оксида алюминия. Наличие кристаллических включений может привести к оптическим потерям из-за рассеяния света на границах зерен.

Список литературы

1. *Shanmugan S., Sarah A. S., Nur Jassriatul Aida J., Mutharasu D.* Structural, surface and optical analysis of Al_2O_3 . Thin film on Al substrates prepared by chemical vapor deposition method // Journal of Scientific Research & Reports. 2016. Vol. 11. №6. P. 1-10.
2. Оксид алюминия: свойства, способы получения, применение // Инжиниринговый химико-технологический центр [Электронный ресурс]. URL: <https://ect-center.com/blog/alumina-1> (дата обращения: 18.05.2022).
3. *Клишин А. П.* Формирование кристаллических фаз в оксидах алюминия и циркония в постоянном магнитном поле при спекании компактированных порошков: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. Нац. иссл. Томский политех. ун-т, Томск, 2019. 173 с.
4. *Chou T. C., Nieh T. G.* Nucleation and concurrent anomalous grain growth of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ during $\gamma \rightarrow \alpha$ phase transformation // Journal of The American Ceramic Society. 1991. Vol. 74. №9. P. 2270-79.
5. *Борисова Т. М., Кастро Р. А.* Влияние режима синтеза оксидного слоя на диэлектрические свойства структур $\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. Серия Общественные и гуманитарные науки. 2013. № 154. С. 53-64.
6. *Борисова Т. М.* Поляризационные процессы в слоях аморфного оксида алюминия, полученного методом молекулярного наслаивания: автореф. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. Росс. гос. пед. ун-т им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, 2014. 17 с.

ЭЛЕКТРОКОНВЕКЦИЯ СЛАБОПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ В НЕВЕСОМОСТИ ПРИ АНТИСИММЕТРИЧНОМ ВНЕШНЕМ СИГНАЛЕ

Н. В. Вешкурова, Н. Н. Картавых

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

На основе маломодовой модели электроконвекции проведено численное моделирование устойчивости течений слабопроводящей жидкости в условиях отсутствия гравитации в негармоническом электрическом поле. Найдены границы электроконвективной неустойчивости, соответствующие различным режимам поведения слабопроводящей жидкости: квазипериодическим, синхронным или субгармоническим колебаниям. Найдены зависимости критических волновых чисел и критических значений электрического параметра от частоты внешнего воздействия.

Ключевые слова: электроконвекция; слабопроводящая жидкость; электрокондуктивный механизм неустойчивости

ELECTROCONVECTION OF A POORLY CONDUCTING FLUID UNDER WEIGHTLESSNESS WITH AN ANTISYMMETRIC EXTERNAL SIGNAL

N. V. Veshkurova, N. N. Kartavykh

Perm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

Numerical simulation of a poorly conducting fluid flows stability under weightlessness with an antisymmetric external signal is studied. Low-mode model of electroconvection is used. The electroconvective instability boundaries of the poorly conducting fluid different oscillation regimes (quasiperiodic, synchronous or subharmonic) are found. The dependences of critical wave numbers and critical electric parameter on the external influence frequency are found.

Keywords: electroconvection; poorly conducting fluid; instability electroconductive mechanism

Конвекция слабопроводящей жидкости в электрическом поле возникает благодаря действию электроконвективных механизмов неустойчивости, связанных с различными способами образования электрического заряда в жидкости [1]. В настоящей работе рассматривается электрокондуктивный механизм неустойчивости, связанный с зависимостью электропроводимости среды от температуры: этот механизм проявляет себя в случае неоднородного нагрева жидкостей [2, 3]. Исследование и анализ колебательных структур параметрической электроконвекции, возникающих в слабопроводящих средах в негармонических электрических полях ранее проводились в работах [3, 4].

Рассматривается плоский горизонтальный слой неоднородно нагретой вязкой несжимаемой слабопроводящей жидкости, находящейся в невесомости и в переменном вертикальном электрическом поле с напряжённостью $\mathbf{E}(t)$.

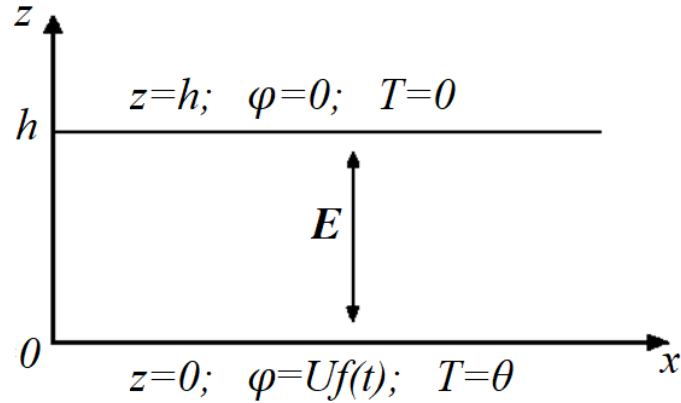


Рис. 1. Геометрия задачи

Координаты обкладок конденсатора $z = 0, h$ (h – толщина слоя). Нижняя и верхняя границы имеют разные температуры: $T(0) = \theta$, $T(h) = 0$. Здесь θ – это разность температур между обкладками конденсатора. Потенциал верхней границы: $\varphi(h) = 0$, а потенциал нижней границы периодически меняется со временем $\varphi(0) = Uf(t)$, где U – амплитуда напряжения, $f(t) = -\cos(\pi vt)$ – периодическая во времени функция (рис. 1).

Форма внешнего электрического поля на периоде изменяется по закону:

$$E(t) = -E_0 \cos(\pi vt),$$

здесь E_0 , ν – амплитуда напряжённости и частота переменного поля. Стоит отметить, что данный тип внешнего воздействия соответствует антисимметричному относительно середины периода T^* сигналу (рис. 2).

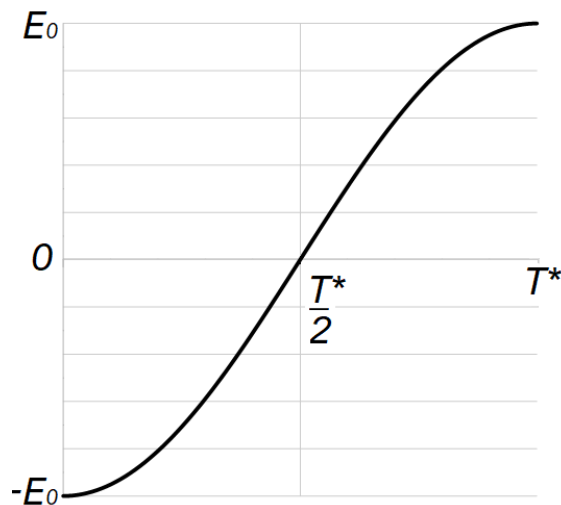


Рис. 2. Форма внешнего сигнала

Для описания движения жидкости в слое использовалась маломодовая модель электроконвекции [2]:

$$\begin{aligned}
 \dot{X} &= Pr(-X - eTf(t)), \\
 \dot{Y} &= -Y + X, \\
 \dot{W} &= -dW + V, \\
 \dot{V} &= Pr(-dV + eSf(t)/d), \\
 \dot{S} &= -gS - gYf(t), \\
 \dot{T} &= -gT - gWf(t),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где X, V – амплитуды пространственных гармоник функции тока, Y, W – температуры, S, T – плотности заряда. Введены следующие параметры:

$$\begin{aligned}
 e &= \frac{Ra_\sigma}{Ra_{\sigma_0}}, \quad Ra_{\sigma_0} = \frac{3\pi^4(1+k^2)^3}{8k^2}, \\
 d &= \frac{4+k^2}{1+k^2}, \quad g = \frac{Pr}{\pi^2(1+k^2)Pr_e},
 \end{aligned}$$

где e – нормированное электрическое число Рэлея, Ra_σ – электрический аналог числа Рэлея, Ra_{σ_0} – параметр системы, Pr – число Прандтля, Pr_e – электрическое число Прандтля, k – волновое число, характеризующее периодичность возмущений в плоскости слоя, d – геометрический параметр, g – параметр, определяющий отношение времени тепловых возмущений и возмущений заряда.

Любое линейно независимое решение уравнений системы (1) характеризуется мультипликаторами Флоке $\gamma_k = \exp(\lambda_k T^*)$ и может быть записано в виде: $X(t + T^*) = \gamma X(t)$, где $X(t)$ – вектор-столбец линейно независимых решений системы (1), γ – мультипликатор Флоке, T^* – период коэффициентов, $\lambda_k = Re\lambda_k + iIm\lambda_k$ – характеристические показатели. Упорядочим γ_k : $|\gamma_1| \geq |\gamma_2| \geq \dots \geq |\gamma_k|$. При $|\gamma_1| > 1$ наблюдается неустойчивость – появившиеся в системе возмущения возрастают. При $|\gamma| < 1$ возникающие в системе колебания затухают, что соответствует равновесному состоянию. При $|\gamma| = 1$ наблюдается область нейтральных возмущений.

Изучение движения слабопроводящей жидкости было проведено для следующего набора параметров: $Pr = 400$, $Pr_e = 30$, свойственных таким слабопроводящим жидкостям, как конденсаторные и трансформаторные масла, кукурузное масло [2, 3].

На рис. 3 приведена нейтральная кривая при частоте внешнего воздействия $\nu = 0.04$, локальные минимумы которой соответствуют разным типам колебательной неустойчивости. Глобальный минимум нейтральной кривой (рис. 3) соответствует субгармоническому отклику (красная линия): мультипликатор Флоке вещественный и равен минус единице. Следующий локальный минимум отвечает синхронным колебаниям (зелёная линия). В соседних минимумах нейтральной кривой синхронные и субгармонические отклики чередуются. На основной линии обнаружен квазипериодический отклик (черный цвет).

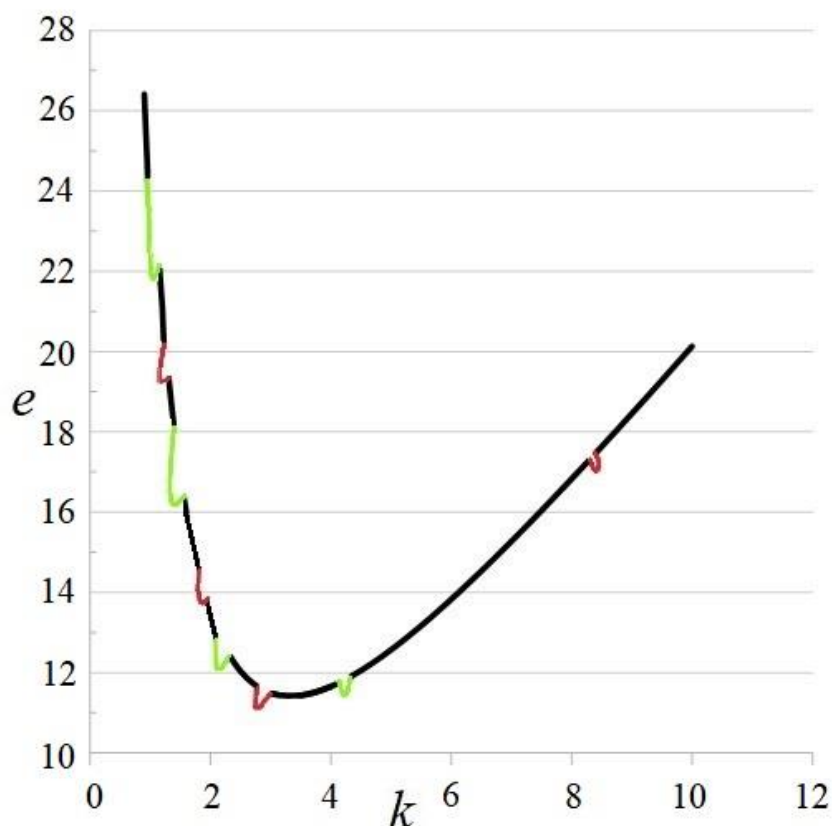
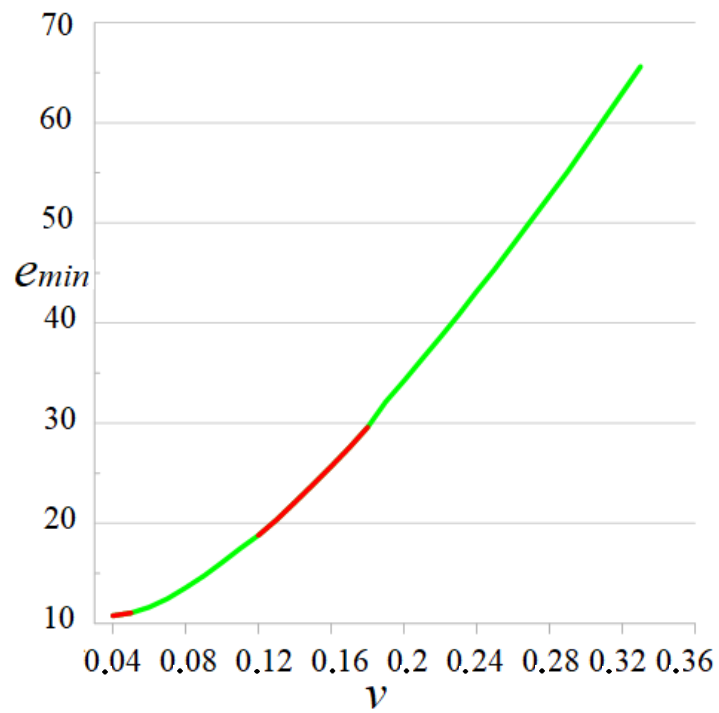


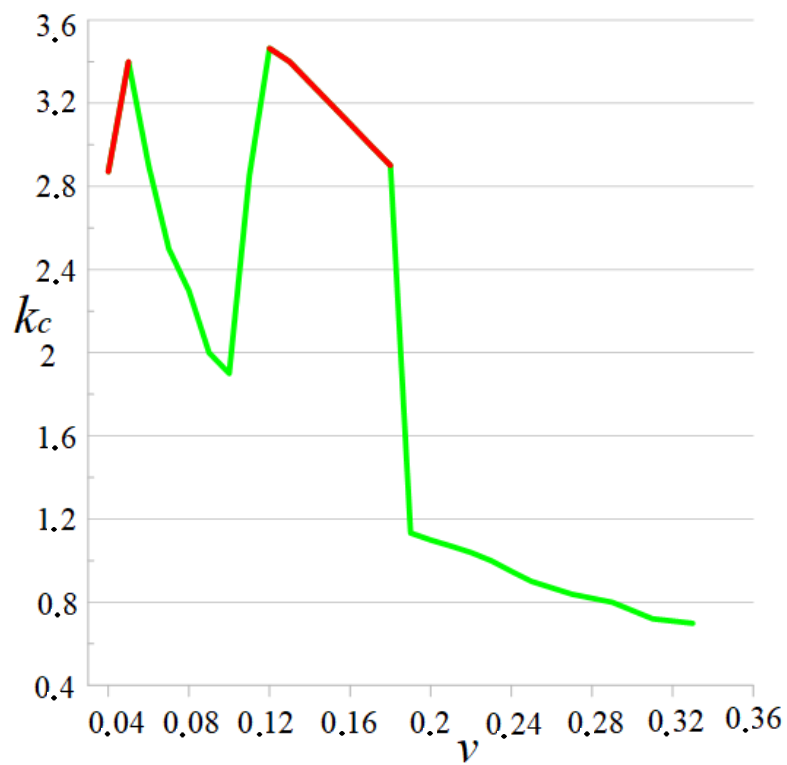
Рис. 3. Зависимость электрического параметра e от волнового числа k при частоте внешнего воздействия $\nu = 0.04$. Чёрная линия соответствует квазипериодическому отклику системы, красная – субгармоническому, зелёная – синхронному

Используя значения глобальных минимумов в интервале частот $\nu = [0.04; 0.33]$, были получены зависимости пороговых значений электрического параметра e_{min} и критических значений волнового числа k_c от частоты внешнего воздействия ν (рис. 4).

Можно заметить, что пороговое значение безразмерного электрического параметра e_{min} увеличивается с ростом частоты внешнего воздействия ν (рис. 4а), а значение критического волнового числа k_c резко изменяется при смене колебательного режима (рис. 4б).



a)



б)

Рис. 4. Зависимости порогового значения электрического параметра e_{min} (а) и критического волнового числа k_c (б) от частоты внешнего воздействия ν

На основе маломодовой модели электроконвекции исследованы течения неоднородно нагретой слабопроводящей жидкости в невесомости. Форма внешнего электрического поля соответствует антисимметричному относительно середины периода сигналу. Получены нейтральные кривые на плоскости «волновое число – электрический параметр», а также зависимости критических волновых чисел и пороговых значений амплитуды модуляции от частоты внешнего воздействия. Обнаружены синхронные, субгармонические и квазипериодические колебательные режимы.

Список литературы

1. Саранин В. А. Устойчивость равновесия, зарядка, конвекция и взаимодействие жидких масс в электрических полях. М.: Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. 332 с.
2. Ильин В. А., Пономарева Л. А. Электроконвекция слабопроводящей жидкости в высокочастотном электрическом поле // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2013. Вып. 3(25). С. 28–36.
3. Зайкова А. А., Картавых Н. Н. Поведение слабопроводящей жидкости при подогреве снизу в негармоническом электрическом поле // Физика для Пермского края: материалы региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Пермь, 2020. Вып. 13. С. 54–59.
4. Картавых Н. Н., Смородин Б. Л. Динамика электроконвективных структур нематического жидкого кристалла в негармоническом электрическом поле // Журнал технической физики. 2010. Т. 80. С. 64–69.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК: СФЕРИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ

Н. И. Задорожный, Д. А. Петров

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

Предложена молекулярно-статистическая теория суспензий углеродных нанотрубок в нематическом жидком кристалле. Рассмотрено сферическое приближение, позволяющее получить уравнения ориентационного состояния суспензии в простой аналитической форме. Построены температурные зависимости параметров порядка системы, которые качественно совпадают с результатами полученных ранее в рамках точной модели среднего поля.

Ключевые слова: жидкий кристалл; углеродные нанотрубки; теория среднего поля

STATISTICAL THEORY OF LIQUID CRYSTAL COMPOSITES OF CARBON NANOTUBES: SPHERICAL APPROXIMATION

N. I. Zadorozhny, D. A. Petrov

Perm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

A molecular-statistical theory of suspensions of carbon nanotubes in a nematic liquid crystal is proposed. The spherical approximation is considered, which makes it possible to obtain the equations of the orientational state of the suspension in a simple analytical form. The temperature dependences of the order parameters of the system are constructed, which qualitatively coincide with the results obtained earlier in the framework of the exact mean-field model.

Keywords: liquid crystal; carbon nanotubes; mean-field theory

Модель среднего поля, предложенная Майером и Заупе [1] для описания нематической фазы, является наиболее плодотворной в физике жидких кристаллов (ЖК). Она хоть и принадлежит к классу точно решаемых моделей, но требует численного решения нелинейного интегрального уравнения ориентационного равновесия для параметра порядка ЖК. Однако, существует способ существенно упростить подход Майера и Заупе, используя известное в теории магнетизма сферическое приближение, которое было успешно применено для описания ориентационного упорядочения нематического ЖК [3]. Сферическое приближение позволяет точно вычислить статистический интеграл ЖК и получить уравнение для параметра порядка ЖК в простой аналитической форме. В настоящей работе мы рассмотрим молекулярно-статистическую теорию среднего поля ЖК суспензий углеродных нанотрубок (УНТ) [3], для которой мы применим сферическое приближение.

Рассмотрим суспензию УНТ в ЖК, состоящую из N_n молекул и N_p нанотрубок. Выберем однотипные симметричные бесследовые тензоры ориентации для описания ориентации отдельной молекулы нематического ЖК и УНТ соответственно

$$v_{ik}^\alpha = \sqrt{\frac{3}{2}} \left(v_{\alpha i} v_{\alpha k} - \frac{1}{3} v_\alpha^2 \delta_{ik} \right), \quad e_{ik}^\beta = \sqrt{\frac{3}{2}} \left(e_{\beta i} e_{\beta k} - \frac{1}{3} e_\beta^2 \delta_{ik} \right). \quad (1)$$

Здесь векторы \mathbf{v}_α и \mathbf{e}_β направлены соответственно вдоль длинных осей α -й молекулы нематика ($\alpha = 1, 2, \dots, N_p$) и β -й нанотрубки ($\beta = 1, 2, \dots, N_n$). Считаем, эти векторы подчиняющимися сферической связи, то есть предполагаем, что единичность векторов ориентации компонентов суспензии сохраняется лишь в среднем [4]. Условие сферической связи можно представить в виде

$$\langle v_\alpha^2 \rangle = \frac{1}{N_n} \sum_{\alpha=1}^{N_n} v_\alpha^2 = 1, \quad \langle e_\beta^2 \rangle = \frac{1}{N_p} \sum_{\beta=1}^{N_p} e_\beta^2 = 1. \quad (2)$$

Макроскопические тензоры ориентации компонентов суспензии получаются путем статистического усреднения тензоров (1)

$$\eta_{ik} = \langle v_{ik}^\alpha \rangle, \quad S_{ik} = \langle e_{ik}^\beta \rangle. \quad (3)$$

Будем рассматривать планарное сцепление молекул ЖК и УНТ, тогда направления преимущественной ориентации (главные оси нематического порядка) компонентов суспензии совпадают и могут быть определены общим единичным вектором – директором $\mathbf{n} = (0, 0, 1)$. В этом случае макроскопические тензоры ориентации можно представить в виде

$$\eta_{ik} = \sqrt{\frac{3}{2}} \eta \left(n_i n_k - \frac{1}{3} \delta_{ik} \right), \quad S_{ik} = \sqrt{\frac{3}{2}} S \left(n_i n_k - \frac{1}{3} \delta_{ik} \right). \quad (4)$$

Здесь соответственно введены скалярные параметры порядка ЖК и УНТ

$$\eta = \frac{3}{2} \left\langle (\mathbf{n} \mathbf{v}_\alpha)^2 - \frac{1}{3} v_\alpha^2 \right\rangle, \quad S = \frac{3}{2} \left\langle (\mathbf{n} \mathbf{e}_\beta)^2 - \frac{1}{3} e_\beta^2 \right\rangle, \quad (5)$$

которые показывают степень упорядочения молекул нематика и нанотрубок в направлении \mathbf{n} .

В рамках модели среднего поля свободная энергия суспензии УНТ в нематическом ЖК F может быть представлена в безразмерном виде [3]

$$\mathcal{F} = \frac{F v_n}{\lambda V} = -\frac{1}{2} y_n^2 \eta_{ik}^n \eta_{ik}^n - \frac{1}{2} y_p^2 \gamma^2 (\omega_p + \kappa \tau) \eta_{ik}^p \eta_{ik}^p - y_n y_p \gamma \omega \eta_{ik}^n \eta_{ik}^p + \\ + y_n \tau \langle \ln W_n \rangle + y_p \gamma \tau \langle \ln W_p \rangle. \quad (6)$$

Здесь $y_n = v_n N_n / V$ и $y_p = v_p N_p / V$ – объёмные доли компонентов суспензии, (v_n и $v_p = \pi D_p^2 L_p / 4$ – соответственно объёмы молекулы ЖК и цилиндрической УНТ, а D_p и L_p – соответственно диаметр и длина нанотрубки), $\gamma = v_n / v_p$. Роль константы среднего поля Майера-Заупе здесь играет величина $\lambda = A_n / v_n$, где A_n – энергия взаимодействия молекул ЖК A_n . Безразмерный параметр $\omega = A / A_n$ характеризует относительную роль энергии ориентационного взаимодействия A между нанотрубками и молекулами ЖК, а параметр $\omega_p = A_p / A_n$ описывает относительную роль энергии взаимодействия A_p между примесными УНТ, параметр $\kappa = 5\pi D_p^2 L_p^2 / (16v_n)$ учитывает исключённый объём нанотрубок, то есть стерическое отталкивание. Здесь также определена безразмерная температура $\tau = k_B T / \lambda$ (k_B – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура), а величины W_n и W_p соответственно отвечают одночастичным функциям распределения молекул и УНТ по ориентациям их длинных осей.

Равновесные функции распределения W_n и W_p могут быть найдены из условия минимума свободной энергии \mathcal{F} . При минимизации требуется дополнительно учесть сферическую связь (2) и условия нормировки для функций распределения с помощью метода множителей Лагранжа. Для этого составим вспомогательный функционал

$$\begin{aligned} \tilde{\mathcal{F}} = \mathcal{F} + \lambda_n \left[\int W_n d\mathbf{v} - 1 \right] + y_n \kappa_n \left[\int \mathbf{v}^2 W_n d\mathbf{v} - 1 \right] + \\ + \lambda_p \left[\int W_p d\mathbf{e} - 1 \right] + y_p \gamma \kappa_p \left[\int \mathbf{e}^2 W_p d\mathbf{e} - 1 \right], \end{aligned} \quad (7)$$

где λ_n , κ_n , λ_p и κ_p – неопределённые множители Лагранжа.

После вычисления всех сверток тензоров и вариации (7) по W_n и W_p получим нормированный результат для функций распределения

$$\begin{aligned} W_n &= b_n^{-1} \exp \left\{ \frac{3}{2} \sigma_n \left[(\mathbf{n}\mathbf{v})^2 - \frac{1}{3} \mathbf{v}^2 \right] - \frac{\kappa_n}{\tau} \mathbf{v}^2 \right\}, \\ W_p &= b_p^{-1} \exp \left\{ \frac{3}{2} \sigma_p \left[(\mathbf{n}\mathbf{e})^2 - \frac{1}{3} \mathbf{e}^2 \right] - \frac{\kappa_p}{\tau} \mathbf{e}^2 \right\}, \end{aligned} \quad (8)$$

где введены обозначения

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \frac{1}{\tau} (y_n \eta + \gamma \omega y_p S), \quad \sigma_p = \frac{1}{\tau} (y_p \gamma (\omega_p + \kappa \tau) S + y_n \omega \eta), \\ b_n &= \frac{2\tau\pi}{\tau\sigma_n + 2\kappa_n} \sqrt{\frac{\tau\pi}{\kappa_n - \tau\sigma_n}}, \quad b_p = \frac{2\tau\pi}{\tau\sigma_p + 2\kappa_p} \sqrt{\frac{\tau\pi}{\kappa_p - \tau\sigma_p}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Подстановка полученных функций распределений (8) в (6) с учётом определений (5) позволяет записать свободную энергию суспензии в аналитическом виде

$$\mathcal{F} = \frac{1}{2}y_n^2\eta^2 + \frac{1}{2}y_p^2\gamma^2S^2(\omega + \kappa\tau) + y_n y_p \gamma \omega \eta S - \\ - y_n \tau \left(\frac{\kappa_n}{\tau} + \ln(b_n) - \sigma_n \eta \right) - y_p \gamma \tau \left(\frac{\kappa_p}{\tau} + \ln(b_p) - \sigma_p S \right). \quad (10)$$

Уравнения ориентационного равновесия и множители Лагранжа определяются из условий минимума свободной энергии (10)

$$\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \eta} = \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial S} = \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \kappa_n} = \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \kappa_p} = 0. \quad (11)$$

Решая систему уравнений (11), находим лагранжевы множители

$$\kappa_n = \frac{3\tau}{2(2\eta + 1)} + \tau\sigma_n, \quad \kappa_p = \frac{3\tau}{2(1 - S)} - \frac{1}{2}\tau\sigma_p$$

и получаем систему уравнений ориентационного состояния суспензии УНТ в ЖК в простой аналитической форме

$$3\eta\tau - (1 - \eta)(1 + 2\eta)(y_n\eta + y_p\gamma\omega S) = 0, \\ 3S\tau - (1 - S)(1 + 2S)(y_n\omega\eta + y_p\gamma S(\kappa\tau + \omega_p)) = 0. \quad (12)$$

В частном случае отсутствия дисперсионных и стерических взаимодействий между нанотрубками ($\omega_p = 0$ и $\kappa = 0$) этот результат совпадает с ранее полученным в работе [4], где рассматривалась суспензия анизометричных частиц в ЖК.

Система уравнений (12) допускает высокотемпературное изотропное решение $\eta = S = 0$, которое теряет устойчивость при понижении температуры. Точке потери устойчивости изотропной фазы отвечает температура Кюри-Вейсса τ_* , вблизи которой значения параметров порядка можно считать малыми. В низшем порядке разложения (12) по степеням η и S находим

$$\tau_* = \frac{y_n y_p (3 - \gamma y_p \kappa) + 3\gamma y_p \omega_p}{6 y_n (3 - \gamma y_p \kappa)} \cdot \left[1 + \sqrt{1 + \frac{3 \cdot 4 y_p (\omega^2 - \omega_p) y_n (3 - \gamma y_p \kappa)}{(y_n (3 - \gamma y_p \kappa) + 3\gamma y_p \omega_p)^2}} \right]. \quad (13)$$

При высоких температурах для достаточно больших концентраций примеси вместо изотропной фазы должна существовать паранематическая фаза, в которой длинные оси нанотрубок упорядочены силами стерического отталкивания и благодаря силам ориентационного сцепления с молекулами появляется частичное упорядочение ЖК. Критическая концентрация y_{p*} – граница устойчивости изотропной фазы может быть найдена аналогично температуре Кюри-Вейсса

$$y_{p*} = \frac{3\tau - 3\gamma\tau(\omega_p + \kappa\tau) + \gamma(\omega_p - \omega^2 + \kappa\tau)}{2\gamma(\omega_p - \omega^2 + \kappa\tau)} \cdot \left[1 - \sqrt{1 + \frac{3 \cdot 4\tau\gamma(\omega_p - \omega^2 + \kappa\tau)(3\tau - 1)}{(3\tau - 3\gamma\tau(\omega_p + \kappa\tau) + \gamma(\omega_p - \omega^2 + \kappa\tau))^2}} \right]. \quad (14)$$

Выражения (13) и (14), полученные в рамках сферического приближения, сводятся к результатам точной модели среднего поля [4] простой заменой всех числовых множителей 3 на 5.

На рисунке показаны температурные зависимости параметров порядка ЖК и УНТ, полученные в результате решения системы уравнений (12) для различных значений энергии сцепления частиц с матрицей ω . Значения материальных параметров брались из работы [3] $\omega_p = 0$, $y_p = 0.02$, $D_p = 2$ нм и $L_p = 100$ нм. На рисунке вертикальные отрезки отвечают равновесным переходам первого рода между нематической и изотропной фазами, либо между нематической и паранематической фазами. Синей штриховой линией обозначена кривая сосуществования паранематической и нематической фаз. Зелёная линия отвечает кривой сосуществования паранематической и изотропной фаз, а красная линия – кривая сосуществования нематической и изотропной фаз.

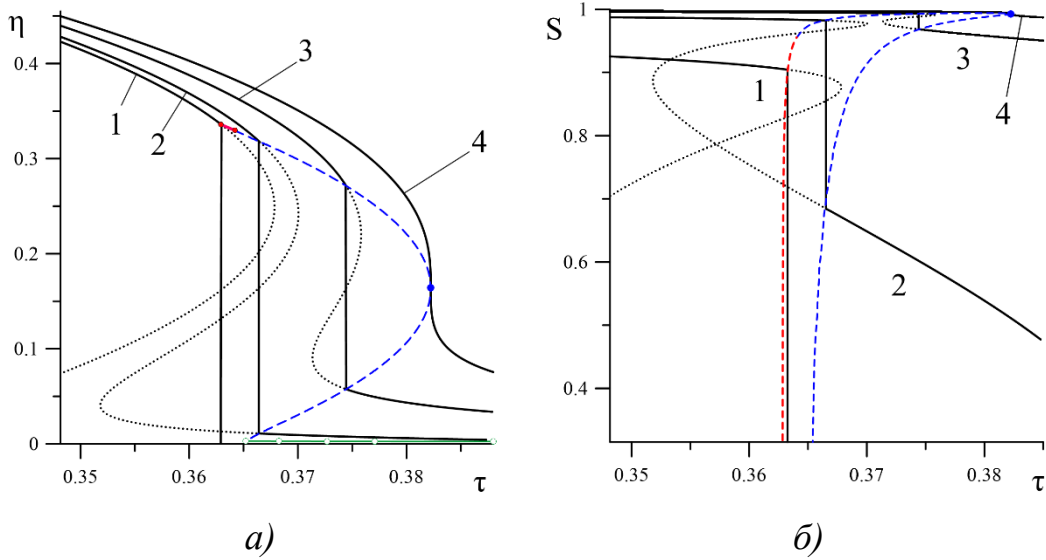


Рисунок. Зависимости параметров порядка (а) ЖК и (б) УНТ от температуры при различных значениях энергии сцепления ω . $D_p = 2$ нм и $L_p = 100$ нм. Кривая 1 отвечает $\omega = 10$; кривые 2, 3 и 4 соответственно отвечают $\omega = 65$, $\omega = 200$ и $\omega = \omega_{cr} = 330.73$

Из рисунка видно, что при низких температурах суспензия находится в сильно упорядоченном состоянии, отвечающем нематической фазе. С ростом температуры при относительно слабом сцеплении происходит переход в

изотропную фазу (кривая 1). С увеличением энергии сцепления ω благодаря эффектам стерического отталкивания УНТ переход из нематической фазы происходит в паранематическую фазу со слабым упорядочением молекул ЖК и всё еще сильным упорядочением примесных нанотрубок (см. кривые 2 и 3). С дальнейшим ростом температуры происходит следующий переход из паранематической в изотропную фазу (на рисунке не представлен). При энергии сцепления, превышающей критическое значение $\omega = \omega_{cr} = 330.73$ (кривая 4) теряется различие между нематической и паранематической фазами, т.е. переход нематик – паранематик становится непрерывным.

Представленные на рисунке результаты качественно совпадают с результатами «точной» теории среднего поля [3], для которой требовалось численно решать систему нелинейных интегральных уравнений ориентационного состояния.

Список литературы

1. *De Gennes P. G., Prost J.* The Physics of Liquid Crystals. Clarendon Press, Oxford, 1993. 597 p.
2. *Vertogen G., Van der Meer B. W.* A simple molecular statistical treatment of nematics // *Physica A*. 1979. Vol. 99. P. 237–250.
3. *Petrov D. A., Zakhlevnykh A. N.* Statistical theory of magnetic field induced phase transitions in negative diamagnetic anisotropy liquid crystals doped with carbon nanotubes // *Journal of Molecular Liquids*. 2019. Vol. 287. 110901.
4. *Захлевных А. Н., Лубнин М. С., Петров Д. А.* Об одной простой молекулярно-статистической модели жидкокристаллической суспензии анизометричных частиц // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2016. Т. 150. Вып. 5 (11). С. 1041–1051.

УТОЧНЕНИЕ ПОРОГА ТЕРМОМАГНИТНОЙ КОНВЕКЦИИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В ШАРОВОЙ ПОЛОСТИ

П. Н. Казанцев, П. В. Краузин

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

В данной работе исследуется влияние температурной зависимости магнитной проницаемости неоднородно нагретой магнитной жидкости, заполняющей шаровую полость, на систему уравнений термомангнитной конвекции относительно бесконечно малых возмущений. На основе данной системы с помощью метода Галеркина получены критические числа Рэлея. Произведено сравнение полученных критических чисел с результатами модели, в которой температурная зависимость магнитной проницаемости не учитывалась частично.

Ключевые слова: магнитная жидкость; шаровая полость; конвективная устойчивость

THERMOMAGNETIC CONVECTION THRESHOLD REFINEMENT IN A MAGNETIC FLUID FILLED A SPHERICAL CAVITY

P. N. Kazantsev, P. V. Krauzin

Perm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

In this paper, the influence of the temperature dependence of the magnetic permeability inside a cavity filled with inhomogeneously heated ferrofluid on the system of thermomagnetic convection equation. Using the Galerkin method critical Rayleigh numbers are obtained. These critical numbers were compared to the results of the model where magnetic permeability dependence on temperature is not fully considered.

Keywords: ferrofluid; spherical cavity; convective stability

Пусть шаровая полость (рис. 1), окруженная бесконечным немагнитным массивом с теплопроводностью λ_m , заполнена магнитной жидкостью с теплопроводностью λ_f и магнитной проницаемостью $\mu = \mu(H, T)$. Вдали от полости заданы однородное магнитное поле H_∞ и температурный градиент γ_∞ , соответствующий подогреву снизу.

Система уравнений конвекции несжимаемой МЖ имеет вид [1]:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) &= -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} + \mu_0 M \nabla H, \quad \nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \\ \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) T_f &= \kappa_f \Delta T_f, \quad \frac{\partial T_m}{\partial t} = \kappa_m \Delta T_m, \\ \nabla \times \mathbf{H} &= 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}), \end{aligned} \tag{1}$$

где ρ – плотность жидкости, \mathbf{v} – скорость, p – давление, η – коэффициент сдвиговой вязкости, $\kappa = \lambda/(\rho c_p)$ – коэффициент температуропроводности, c_p – изобарная удельная теплоемкость, μ_0 – магнитная постоянная, T – температура, \mathbf{M} – намагниченность, \mathbf{H} – напряженность магнитного поля, \mathbf{B} – магнитная индукция.

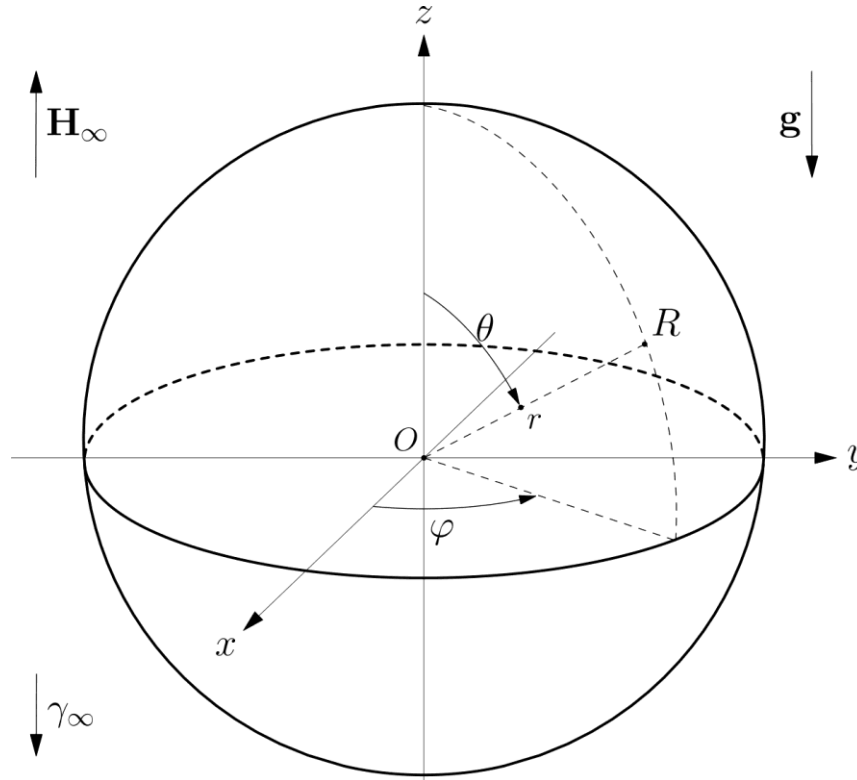


Рис. 1. Геометрия задачи

Замыкают систему (1) уравнения состояния:

$$\rho = \rho(T, p), \quad \mathbf{M} = M(H, T) \mathbf{H} / H.$$

На границах полости должны выполняться следующие условия для температуры и магнитного поля:

$$\begin{aligned} T_f &= T_m, & \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial n} &= \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial n}, \\ (\mathbf{B}_f - \mathbf{B}_m) \cdot \mathbf{n} &= 0, & (\mathbf{H}_f - \mathbf{H}_m) \cdot \boldsymbol{\tau} &= 0, \end{aligned}$$

где \mathbf{n} и $\boldsymbol{\tau}$ – векторы нормали и касательной к поверхности сферической полости. Для скорости ставится условие прилипания: $\mathbf{v} = 0$.

Пусть жидкость в рассматриваемом объеме неподвижна. Тогда распределения температуры внутри полости определяется выражением [2]:

$$T_0(r, \theta) = T_* + \gamma r \cos \theta = T_* + \delta T, \quad \gamma = \frac{3\gamma_\infty}{2 + \lambda},$$

где $\lambda = \lambda_f/\lambda_m$, а T_* – температура жидкости в центре полости.

С учетом температурной зависимости магнитной проницаемости

$$\mu = \mu_* \left(1 - \alpha \frac{\delta T}{\gamma R} \right), \quad \alpha = \frac{K_* \gamma R}{\mu_* H_*}, \quad H_* = \frac{3H_\infty}{2 + \mu_*},$$

распределение магнитного потенциала ($\mathbf{H} = \nabla \psi$) в состоянии механического равновесия имеет вид [3]:

$$\psi_0(r, \theta) = H_* \left(r \cos \theta + \alpha \frac{2\mu_* \cos^2 \theta + 1}{2\mu_* + 3} \frac{r^2}{2R} \right),$$

где μ_* – магнитная проницаемость при постоянной температуре T_* , K_* – пиромантический коэффициент. Параметр α является малой величиной.

Представим искомые величины в виде суперпозиции равновесного значения и бесконечно малого возмущения: $X = X_0 + X'$. Тогда после ряда преобразований система уравнений термомагнитной конвекции относительно безразмерных малых возмущений примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{v}'}{\partial t} &= -\nabla p' + \Delta \mathbf{v}' + \text{Gr} T'_z \mathbf{e}_z + \text{Gr}_m \left[\frac{2\mu_* + 1}{2\mu_* + 3} T' - \mathbf{e}_z \cdot \nabla \psi' + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\alpha}{2\mu_* + 3} (\mathbf{r} + (4\mu_* + 1)\mathbf{z}) \cdot \nabla \psi' \right] \mathbf{e}_z, \quad \nabla \cdot \mathbf{v}' = 0, \\ \frac{\partial T'}{\partial t} - \mathbf{e}_z \cdot \mathbf{v}' &= \text{Pr}^{-1} \Delta T', \quad \frac{\partial T'_m}{\partial t} = \text{Pr}^{-1} \kappa^{-1} \Delta T'_m, \\ \Delta \psi' &= \mathbf{e}_z \cdot \nabla T' - \alpha \left[\frac{2}{2\mu_* + 3} T' + \frac{1}{2\mu_* + 3} (\mathbf{r} - \mathbf{z}) \cdot \nabla T' \right], \quad \Delta \psi'_m = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\kappa}, \quad \text{Gr} = \frac{\beta_* g \gamma R^4}{\nu^2}, \quad \text{Gr}_m = \frac{\mu_0 K_*^2 \gamma^2 R^4}{\rho_* \nu^2 \mu_*}, \quad \kappa = \frac{\kappa_f}{\kappa_m}.$$

В качестве масштабов величин были выбраны: расстояние – радиус полости R , времени – R^2/ν , массы – $\rho_* R^3$, температуры – γR , напряженности магнитного поля – $K_* \gamma R/\mu_*$.

На границе полости ($r = 1$) должны выполняться условия:

$$\begin{aligned} T &= T_m, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial T_m}{\partial r}, \quad \mathbf{v} = 0, \\ \psi &= \psi_m, \quad \mu_* (1 + \alpha \cos \theta) \frac{\partial \psi}{\partial r} = \frac{\partial \psi_m}{\partial r}, \end{aligned}$$

а на большом удалении от нее ($r \rightarrow \infty$):

$$T_m = 0, \quad \psi_m = 0.$$

Отметим, что в данной системе, наряду с λ , μ_* , Gr , Gr_m , появляется еще один управляющий параметр α , а также дополнительные слагаемые в уравнении Навье-Стокса, уравнении для магнитного потенциала и его граничных условиях. При этом если $\mu_* \rightarrow \infty$, то $\alpha \rightarrow 0$, и в данной системе происходит предельный переход к задаче, в которой температурная зависимость магнитной проницаемости явно не учитывалась [2]. В том случае магнитная проницаемость считалась постоянной в равновесной задаче с внешним температурным градиентом, а также в граничных условиях для магнитного потенциала, но при выводе уравнений Максвелла относительно малых возмущений косвенно считалась функцией температуры за счет зависимости намагниченности от напряженности и температуры.

Система (2) имеет решения, зависящие по времени по закону $\propto e^{-\Lambda t}$, где Λ – декремент возмущения. При $\Lambda = 0$ возмущения не затухают и не возрастают – их называют критическими. Для получения критических чисел воспользуемся методом Галеркина-Канторовича с использованием векторных сферических функций в качестве базисных. Данная процедура последовательно описана в работе [2].

Базис векторных сферических функций позволяет выделить два линейно-независимых класса решений: течения без радиальной компоненты и течения без псевдовекторной компоненты. Уровни устойчивости первого из них лежат ниже [4], поэтому остановимся на их рассмотрении. Также перейдем от магнитного числа Грасгофа к магнитному числу Рэлея: $Ra_m = Pr Gr_m$.

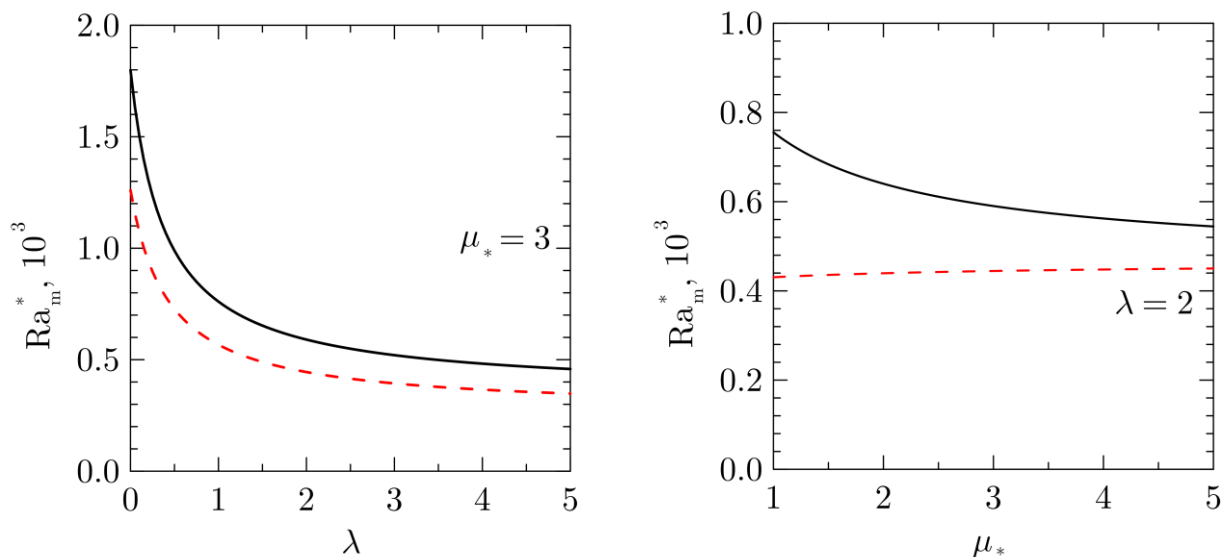


Рис. 2. Графики зависимостей первых двух критических чисел Рэлея без гравитационного поля от параметров λ и μ_* , полученных с учетом температурной зависимости магнитной проницаемости (черная линия) и без (красная штриховая линия)

На рис. 2 представлены зависимости первых критических магнитных чисел Рэлея в отсутствие гравитации Ra_m^* от магнитной проницаемости жидкости μ_* и относительной теплопроводности λ , полученных с учетом температурной зависимости магнитной проницаемости на всех этапах расчетов (черная сплошная линия) и при допущении, что магнитная проницаемость постоянна (красная штриховая линия), для течений без радиальной компоненты скорости. Полученные выражения для Ra_m^* не приводятся в силу их громоздкости.

Нетрудно заметить, что в рассматриваемом диапазоне параметров критические числа, полученные в данной работе, лежат ощутимо выше чисел из расчетов с постоянной проницаемостью [2]. Данное расхождение растет по мере уменьшения μ_* до единицы, то есть при приближении к случаю слабомагнитной жидкости. Важно отметить, что расхождение между подходами в критических числах практически не зависит от α . Более того, на рис. 2 параметр α равен нулю, то есть его влияние исключено. При этом учет даже очень слабой зависимости магнитной проницаемости от температуры ($\alpha \ll 1$) приводит к возникновению фактора $(2\mu_* + 1)/(2\mu_* + 3)$, не зависящему от α , перед Gr_m в уравнении Навье-Стокса. Отметим, что в подходе с постоянной магнитной проницаемостью множитель перед соответствующим слагаемым равен единице. Этот фактор имеет максимальную разность с единицей при $\mu_* = 1$, а минимальную – при $\mu_* \rightarrow \infty$. Этот факт отражен и в зависимостях относительной погрешности критических чисел двух подходов от μ_* (рис. 3).

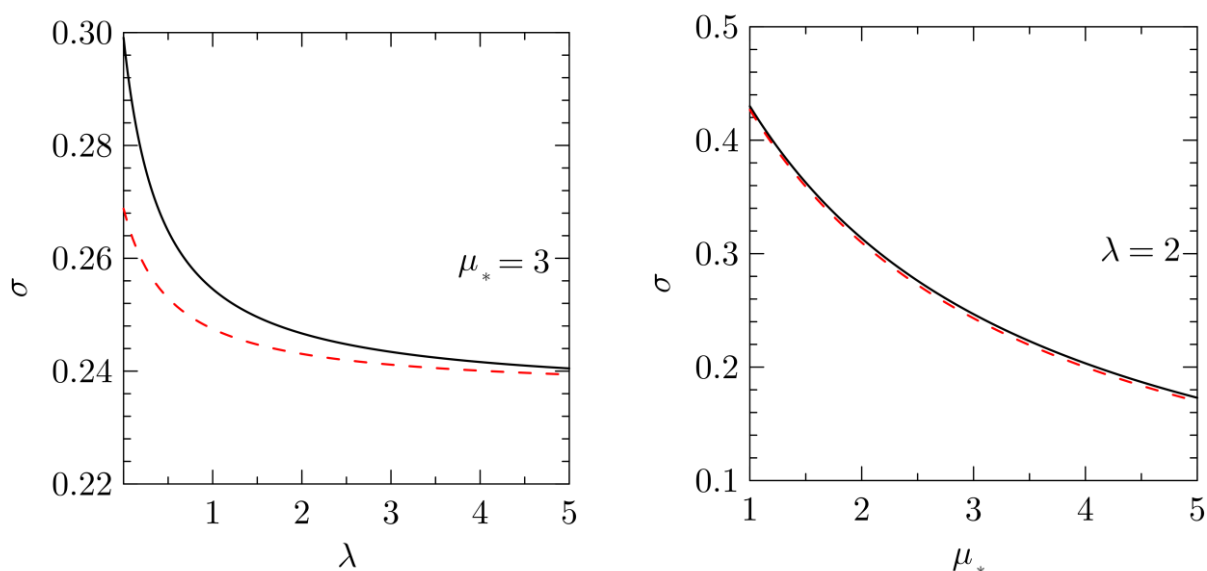


Рис. 3. Графики зависимостей относительных погрешностей σ критических чисел двух подходов от параметров λ и μ_* . Черной сплошной линией обозначена относительная погрешность, соответствующая первому критическому течению, красная штриховая – второму

Таким образом, с учетом температурной зависимости магнитной проницаемости получена система уравнений термомагнитной конвекции относительно бесконечно малых возмущений. Отмечен случай предельного перехода к задаче, в которой эта зависимость не учитывается. На основе данной системы уравнений получены зависимости критических чисел Рэлея в отсутствие гравитации от магнитной проницаемости жидкости и отношения теплопроводностей. Обнаружено, что даже при очень слабой зависимости магнитной проницаемости от температуры в уравнении движения возникает фактор, который значительно меняет вид зависимостей критических чисел от параметров системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 20-01-00491).

Список литературы

1. *Баитовой В. Г., Берковский Б. М., Вислович А. Н.* Введение в термомеханику магнитных жидкостей. М.: ИВТАН, 1985. 188 с.
2. *Казанцев П. Н., Краузин П. В.* Применение базиса векторных сферических функций для определения критических чисел Рэлея термомагнитной конвекции в шаровой полости // Физика для Пермского края: материалы региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Пермь, 2020. Вып. 13. С. 60–65.
3. *Казанцев П. Н., Краузин П. В.* Определение магнитного потенциала в неоднородно нагретой магнитной жидкости: шаровая полость и горизонтальный цилиндр // Физика для Пермского края: материалы региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Пермь, 2021. Вып. 14. С. 41–46.
4. *Циберкин К. Б.* Применение векторных сферических гармоник к анализу конвективной устойчивости жидкости в шаровой полости // Вестник Пермского университета. Серия: физика. 2014. Т. 40. № 4. С. 5–10.

МЕТОД ЭФФЕКТИВНОГО ПОЛЯ В ФИЗИКЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Е. А. Копытова, Д. А. Петров

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

В работе производится построение методом эффективного поля разложения свободной энергии жидкокристаллической суспензии углеродных нанотрубок в форме Ландау на основе термодинамического потенциала статистической теории среднего поля.

Ключевые слова: жидкий кристалл; углеродные нанотрубки; разложение Ландау

EFFECTIVE FIELD METHOD IN THE PHYSICS OF LIQUID-CRYSTAL COMPOSITES OF CARBON NANOTUBES

E. A. Kopytova, D. A. Petrov

Perm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

In this paper, the construction of the free energy expansion of a liquid-crystal suspension of carbon nanotubes in the Landau form is carried out by the effective field method on the basis of the thermodynamic potential of the statistical mean-field theory.

Keywords: liquid crystal; carbon nanotubes; Landau expansion

Будем рассматривать композитный материал – суспензию углеродных нанотрубок (УНТ) в нематическом жидком кристалле (НЖК), соответственно с объёмными долями компонентов y_p и y_n .

Согласно работе [1] выражение для свободной энергии суспензии УНТ в нематическом ЖК можно представить в виде

$$\tilde{F} = \frac{Fv_n}{\lambda V} = -\frac{1}{2}y_n^2\eta_{ik}\eta_{ik} - y_n y_p \gamma \omega \eta_{ik} S_{ik} - \frac{1}{2}y_p^2 \gamma^2 (\omega_p + \kappa \tau) S_{ik} S_{ik} + y_n \tau \langle \ln W_n \rangle + y_p \gamma \tau \langle \ln W_p \rangle. \quad (1)$$

Для описания ориентационного упорядочения молекул ЖК и УНТ здесь использованы макроскопические тензоры ориентации

$$\eta_{ik} = \eta \sqrt{\frac{3}{2}} \left(n_i n_k - \frac{1}{3} \delta_{ik} \right), \quad S_{ik} = S \sqrt{\frac{3}{2}} \left(m_i m_k - \frac{1}{3} \delta_{ik} \right), \quad (2)$$

которые содержат скалярные параметры порядка

$$\eta = \langle P_2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}) \rangle, \quad S = \langle P_2(\mathbf{m} \cdot \mathbf{e}) \rangle. \quad (3)$$

Здесь $P_2(x) = 3x^2/2 - 1/2$ – второй полином Лежандра, а \mathbf{n} и \mathbf{m} – директоры ЖК и примесной подсистемы, а \mathbf{v} и \mathbf{e} – единичные векторы, направленные соответственно вдоль длинных осей молекул и цилиндрических нанотрубок. Угловые скобки в (3) обозначают статистическое усреднение по одночастичным функциям распределения W_n и W_p соответственно молекул и УНТ по ориентациям их длинных осей. В выражении (1) также введены обозначения: V – объём суспензии, $\gamma = v_n/v_p$ – относительный размер УНТ, где v_p и v_n – соответственно объёмы УНТ и молекулы ЖК, λ – константа среднего поля Майера – Заупе, безразмерные параметры ω и ω_p характеризуют относительную роль энергии ориентационного взаимодействия между соответственно нанотрубками и молекулами ЖК и только между УНТ, $\tau = k_B T / \lambda$ – безразмерная температура (k_B – постоянная Больцмана) и $\kappa = 5L_p / (4\gamma D_p)$ – безразмерный параметр, учитывающий исключительный объём УНТ во втором вириальном приближении для цилиндрических частиц (L_p – длина и D_p – диаметр УНТ).

Вариация свободной энергии (1) по W_n и W_p позволяет определить равновесные значения одночастичных функций распределения. Используя условия нормировки

$$\int W_n d\mathbf{v} = 1, \quad \int W_p d\mathbf{e} = 1, \quad (4)$$

получим

$$W_n = Z_n^{-1} \exp\{\xi_n P_2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})\}, \quad W_p = Z_p^{-1} \exp\{\xi_p P_2(\mathbf{m} \cdot \mathbf{e})\}. \quad (5)$$

Здесь введены обозначения

$$Z_n = \int \exp\{\xi_n P_2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})\} d\mathbf{v}, \quad Z_p = \int \exp\{\xi_p P_2(\mathbf{m} \cdot \mathbf{e})\} d\mathbf{e}, \quad (6)$$

$$\xi_n = \frac{y_n \eta + y_p \gamma \omega S}{\tau}, \quad \xi_p = \frac{y_n \omega \eta + y_p \gamma (\omega_p + \kappa \tau) S}{\tau}. \quad (7)$$

Теперь будем полагать, что величины ξ_n и ξ_p не имеют равновесных значений (11), а рассматриваются как эффективные поля [2], которые находятся с помощью соотношений

$$\eta = \frac{\partial \ln Z_n}{\partial \xi_n}, \quad S = \frac{\partial \ln Z_p}{\partial \xi_p}. \quad (8)$$

Выражения (8) следуют из определения параметров порядка (3) и функции распределения (5).

Окончательно с учетом (5) – (8) выражение для свободной энергии суспензии УНТ в НЖК примет вид, пригодный для построения разложения Ландау

$$\tilde{F} = -\frac{1}{2}y_n^2\eta^2 - y_p y_n \gamma \omega \eta S - \frac{1}{2}y_p^2 \gamma^2 (\omega_p + \kappa \tau) S^2 - \\ - y_n \tau (\ln Z_n - \xi_n \eta) - y_p \gamma \tau (\ln Z_p - \xi_p S), \quad (9)$$

который, как известно, описывает ориентационную часть неравновесной свободной энергии. Таким образом наша задача сводится к получению выражения для свободной энергии, которая соответствует неравновесным значениям параметров порядка η и S .

Приступим к построению разложения Ландау на основе потенциала молекулярно-статической модели среднего поля (9). На первом этапе представим статические интегралы Z_n и Z_p в виде разложения соответственно по степеням ξ_n и ξ_p

$$Z_i = \int_0^1 \exp \left\{ \xi_i \left(\frac{3}{2} x^2 - \frac{1}{2} \right) \right\} dx = \\ = 1 + \frac{1}{2 \cdot 5} \xi_i^2 + \frac{1}{3 \cdot 5 \cdot 7} \xi_i^3 + \frac{1}{2 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 7} \xi_i^4 + \dots, \quad (10)$$

где i соответствует обозначению n или p . На втором этапе найдем разложение для $\ln Z_n(\xi_n)$ ($\ln Z_p(\xi_p)$) по степеням ξ_n (ξ_p), используя (10), получим

$$\ln Z_i(\xi_i) = \frac{1}{2 \cdot 5} \xi_i^2 + \frac{1}{3 \cdot 5 \cdot 7} \xi_i^3 - \frac{1}{4 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 7} \xi_i^4 + \dots \quad (11)$$

Связь параметров порядка системы η и S с эффективными полями ξ_n и ξ_p задается выражениями (8), которые с помощью разложений (11) позволяют определить

$$\eta = \frac{\partial \ln Z_n}{\partial \xi_n} = A_1 \xi_n + A_2 \xi_n^2 + A_3 \xi_n^3 + \dots, \\ S = \frac{\partial \ln Z_p}{\partial \xi_p} = A_1 \xi_p + A_2 \xi_p^2 + A_2 \xi_p^3 + \dots, \quad (12)$$

где

$$A_1 = \frac{1}{5}, \quad A_2 = \frac{1}{7} A_1, \quad A_3 = -A_1 A_2. \quad (13)$$

С помощью метода неопределенных коэффициентов обратим ряды (12), в результате получим

$$\xi_n = B_1 \eta + B_2 \eta^2 + B_3 \eta^3 + \dots, \\ \xi_p = B_1 S + B_2 S^2 + B_3 S^3 + \dots, \quad (14)$$

где

$$B_1 = 5, \quad B_2 = -\frac{1}{7}B_1^2, \quad B_3 = -\frac{17}{7}B_2. \quad (15)$$

Подставляя (11) и (14) в (9), окончательно получим выражение для свободной энергии суспензии УНТ в нематическом ЖК в форме разложения Ландау

$$\begin{aligned} \tilde{F} = & \frac{5}{2}y_n \left(\tau - \frac{y_n}{5} \right) \eta^2 - y_n \tau \left(\frac{5 \cdot 5}{3 \cdot 7} \eta^3 - \frac{5 \cdot 5 \cdot 17}{2 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 7} \eta^4 \right) - \\ & - y_n y_p \gamma \omega \eta S + \frac{1}{2} y_p \gamma^2 (\omega_p + \kappa \tau) \left(\frac{5\tau}{\gamma(\omega_p + \kappa \tau)} - y_p \right) S^2 - \\ & - y_p \gamma \tau \left(\frac{5 \cdot 5}{3 \cdot 7} S^3 - \frac{5 \cdot 5 \cdot 17}{2 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 7} S^4 \right) + \dots \end{aligned} \quad (16)$$

Коэффициенты этого разложения выражены через параметры молекулярно-статистической модели среднего поля, а именно энергию сцепления частиц с ЖК-матрицей ω , параметры ω_p и κ , соответственно учитывающие дисперсионное притяжение и интенсивность стерического отталкивания УНТ (эффекты исключенного объема), параметр γ , отвечающий за относительные размеры молекул и УНТ, а также объемные доли компонентов суспензии y_n и y_p .

Список литературы

1. Петров Д. А., Захлевных А. Н., Манищуров А. В. Ориентационное упорядочение жидкокристаллической суспензии углеродных нанотрубок в магнитном поле // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2018. Т. 154. Вып. 2 (8). С. 415–428.
2. Rusakov V. V., Shliomis M. I. Landau-de Gennes free energy expansion for nematic polymers // Journal de Physique Lettres. 1985. Vol. 46. P. 935–943.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ

Е. А. Копытова, А. М. Мезенцева, М. И. Вожаков
Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

Описан метод измерения толщины рабочего зазора, толщины и диэлектрической проницаемости полимерного ориетанта стандартной ЖК-ячейки типа «сэндвич». Диэлектрические измерения выполнены с помощью измерителя иммитанса LCR-821 на частоте 1 кГц. Геометрические параметры ячейки контролировались цифровым микрометром с ценой деления 1 мкм. Выполнена оценка падения напряжения на слое полимерного ориетанта.

Ключевые слова: жидкокристаллическая ячейка; диэлектрическая проницаемость; напряженность поля

METHOD OF CALCULATION OF LIQUID-CRYSTAL CELL PARAMETERS

E. A. Kopytova, A. M. Mezentseva, M. I. Vozhakov,
Perm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

A method is described for measuring the thickness of the air gap and the thickness and permittivity of the polymer orientant of a standard LC sandwich cell. Dielectric measurements were performed using an LCR-821 immittance meter at a frequency of 1 kHz. The geometrical parameters of the cell were controlled by a digital micrometer with a division value of 1 μm . An estimate of the voltage drop across the layer of the polymeric orientant was made.

Keywords: liquid crystal cell; permittivity; field strength

Стандартная ЖК-ячейка представляет собой две стеклянные пластинки, образующие плоский капилляр. На внутренних поверхностях стекол нанесен прозрачный проводящий слой (индиево-оловянный оксид – ИТО), образующий обкладки конденсатора и токоподводящие электроды. Для фиксации зазора между стеклами используются изолирующие прокладки тефлона или спейсеры. Помимо этого, на обкладки такого своеобразного конденсатора тем или иным способом наносят тонкий полимерный слой, способный ориентировать молекулы ЖК [1]. Схематично структура ЖК-ячейки показана на рис. 1.

Одним из важных геометрических параметров ЖК-ячеек является толщина рабочей области толщиной d_d , которая может быть заполнена тем или иным жидким кристаллом. От этой величины зависят динамические и фазовые характеристики жидкокристаллических устройств. Знание толщины слоя ЖК необходим также при сравнении теоретических моделей и

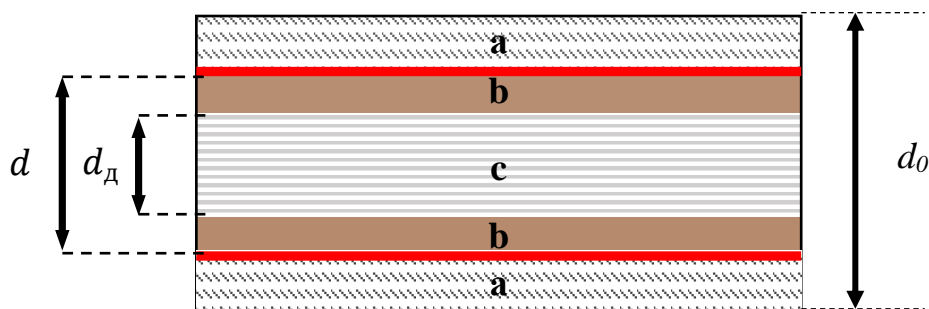


Рис. 1. Схема ЖК-ячейки: а – стеклянные подложки с нанесённым на них электропроводным слоем, b – полимер-ориентант, с – рабочая область ячейки

экспериментальных исследований.

Обычно среднюю толщину рабочей зоны незаполненной ячейки контролируют оптическими и/или импедансным методами. Оптический метод измерения толщины пустой ЖК-ячейки заключается в использовании многолучевой интерференции света в плоскопараллельном капилляре. Такая методика подробно описана в работах [2, 3]. Интерференционные методы требуют дорогостоящей аппаратуры и не всегда доступны в учебных лабораториях.

Другой возможный способ оценки толщины рабочего зазора ячейки заключается в измерении емкости. Так как ЖК-ячейка представляет собой плоский конденсатор, то согласно формуле расчета емкости C конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}, \quad (1)$$

где ε_0 – электрическая постоянная, ε – диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего рабочую область ячейки, d – толщина рабочего зазора, S – площадь обкладок конденсатора. Это самый простой и доступный метод оценки толщины ЖК-ячейки. Метод не требует дорогостоящей аппаратуры и может быть легко реализован в учебной лаборатории. Сравнение результатов измерений толщины воздушного зазора интерференционным и импедансным методам выполнено в работе [4]. Показано, что для ЖК-ячейки без слоя-ориентанта оба метода дают совпадающие оценки толщины воздушного слоя.

К сожалению, такой метод тоже не лишен недостатков, т.к. для корректного определения толщины рабочего зазора требуется учет наличия слоев полимерного ориентанта и его диэлектрическая проницаемость.

Целью настоящей работы является описание и уточнение импедансного метода определения толщины рабочего зазора реальной ЖК-ячейки, толщины и диэлектрической проницаемости слоя полимера.

Приступая к расчетам, следует заметить, что эквивалентную электрическую схему ЖК-ячейки можно представить, как три последовательно соединенных конденсатора (рис. 2).

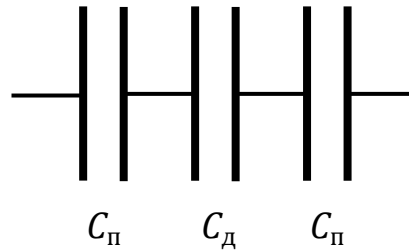


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема ЖК-ячейки:
 $C_п$ и $C_д$ – ёмкости полимера и рабочего зазора соответственно

Учтя это и формулу (1),

$$C_п = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_п S}{d_п}, \quad C_д = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_д S}{d_д}, \quad d = 2d_п + d_д,$$

составим систему уравнений:

$$\begin{aligned} d &= 2d_п + d_д; \\ C_{обв} &= \frac{\varepsilon_п}{2d_п + d_д \varepsilon_п}; \\ C_{обэ} &= \frac{\varepsilon_э \varepsilon_п}{2d_п \varepsilon_э + d_д \varepsilon_п}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь второе уравнение записано для воздушного промежутка рабочего пространства: $\varepsilon_д = 1$. Третье – для рабочего пространства, заполненного эталонным диэлектриком: тетрахлорметаном (CCl_4), диэлектрическая проницаемость которого $\varepsilon_э$ известна и равна 2.2236 [5].

В опытах анализировались две ячейки со слоем полимера JALS-204 (JSR Corporation). Толщину между обкладками конденсатора d можно определить измерив толщину стекол и общую толщину ячейки. Такие измерения были выполнены с помощью цифрового микрометра ценой деления 1 мкм.

Измерения эффективной ёмкости были выполнены с помощью измерителя LCR-821 на частоте 1 кГц при параллельной схеме замещения. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Табл. 1. Результаты измерений расстояния между обкладками конденсатора d и ёмкости ячеек

Ячейка №1		
d , мм	$C_{обв}$, пФ	$C_{обэ}$, пФ
(0.061 ± 0.001)	(15.503 ± 0.002)	32.180 ± 0.002
Ячейка №2		
(0.044 ± 0.001)	(21.355 ± 0.002)	45.145 ± 0.002

Система уравнений (2) решалась в Maple. Результаты расчета представлены ниже:

Ячейка №1: $\varepsilon_{\text{п}} = 2.18$, $d_{\text{п}} = 3.62$ мкм;

Ячейка №2: $\varepsilon_{\text{п}} = 2.46$, $d_{\text{п}} = 2.16$ мкм;

$$\varepsilon_{\text{пср}} = 2.32 \pm 0.15.$$

Различия в значениях толщин полимерного слоя связаны с разными режимами нанесения ориентанта на подложки ячеек. Относительная погрешность $\varepsilon_{\text{пср}} \approx 12\%$ обусловлена недостаточной степенью точности при измерении геометрических характеристик ячейки.

При известных значениях толщины и диэлектрической проницаемости полимера можно оценить такую немаловажную характеристику ячеек, как падение напряжения на слое полимера.

Как известно, смещение вектора напряженности электрического поля \mathbf{D} в плоском конденсаторе во всём объёме диэлектрика одинаково. Следовательно, $\mathbf{D}_{\text{п}} = \mathbf{D}_{\text{д}}$. Воспользовавшись формулой для напряженности электрического поля $\mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}$, получаем взаимосвязь между напряженностью поля в веществе рабочего пространства и напряженностью полимера

$$\mathbf{E}_{\text{д}} = \frac{\varepsilon_{\text{п}}}{\varepsilon_{\text{д}}} \mathbf{E}_{\text{п}}.$$

Так как ячейка представляет собой три последовательно соединенных конденсатора (рис. 2), то $U_0 = 2U_{\text{п}} + U_{\text{д}}$. Для падения напряжения на полимере с учетом $U = Ed$, получаем

$$U_{\text{п}} = \frac{d_{\text{п}}}{2d_{\text{п}} + \frac{\varepsilon_{\text{п}}}{\varepsilon_{\text{д}}} d_{\text{д}}} U_0.$$

По измеренным ранее значениям $\varepsilon_{\text{п}}$ и $d_{\text{п}}$ падение напряжения на полимере при напряжении $U_0 = 1$ В составило для соответствующих ячеек $U_{\text{п1}} = 0.06$ В и $U_{\text{п2}} = 0.04$ В.

Список литературы

1. Коньяр Ж. Ориентация нематических жидких кристаллов и их смесей. Минск: Из-во: Университетское, 1986. 101 с.
2. Bruyneel F., De Smet H., Vanfleteren J., Van Calster A. Method for measuring the cell gap in liquid-crystal displays // Optical Engineering. 2001. Vol. 40 (2). P. 259–267.
3. Yang K. H. Measurements of empty cell gap for liquid-crystal displays using interferometric methods // Journal of Applied Physics. 1988. Vol. 64 (9). P. 4780–4781.
4. Жужин И. В. Сравнение методов измерения толщины жидкокристаллической ячейки // Физика для Пермского края: материалы региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Пермь, 2020. Вып. 13. С. 50–53.

5. Барон Н. М., Квят Э. И., Подгорная Е. А., Пономарева А. М., Равдель А. А., Тимофеева З. Н. Краткий справочник физико-химических величин. Под ред. К. П. Мищенко и А. А. Завделя. Л.: Гос. науч.-техн. из-во хим. литературы, 1957. 112 с.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

О. С. Крыласова, Е. И. Макарихина, Т. А. Овчинников, И. Ю. Худяков
Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

Проведен диэлектрический анализ магнитной жидкости. Измерения выполнены с помощью измерителя иммитанса LCR-821 на частотах. Исследована зависимость емкости и тангенса угла потерь для ячейки с магнитной жидкостью в диапазоне частот от 0.2 кГц до 15 кГц. Получена зависимость действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости от циклической частоты. Динамическая вязкость измерена на реометре Physica MCR501. Построена диаграмма Коул – Коула и график распределения частиц по размерам.

Ключевые слова: магнитная жидкость; диэлектрическая проницаемость; диаграмма Коул – Коула

DIELECTRIC ANALYSIS OF MAGNETIC FLUID

O. S. Krylasova, E. I. Makarikhina, T. A. Ovchinnikov, I. Yu. Khudyakov
Perm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

A dielectric analysis of the magnetic fluid has been carried out. Measurements were made using an LCR-821 immittance meter at frequencies. The dependence of capacitance and loss tangent for a cell with ferrofluid in the frequency range from 0.2 kHz to 15 kHz is studied. The dependence of the real and imaginary parts of the permittivity on the cyclic frequency is obtained. Dynamic viscosity was measured on a Physica MCR501 rheometer. A Cole-Cole diagram and a particle size distribution plot were plotted.

Keywords: magnetic fluid; dielectric constant; Cole – Cole diagram

Магнитная жидкость – это коллоидный раствор высокодисперсных ферромагнетиков в жидкости-носителе [1, 2]. В некоторых прикладных задачах, связанных с диффузией или вязкостью магнитной жидкости важно знать, так называемый, гидродинамический размер частиц. Если ограничиться некоторыми допущениями, то с этой задачей могут справиться методы магнитогранулометрического анализа. Однако, в действительности они позволяют найти лишь размер «магнитного ядра» частицы, который в несколько раз меньше, чем её гидродинамический размер [3]. Здесь же приведены уточнение модели с учетом диполь-дипольного межчастичного взаимодействия, а также использование двухпараметрической функции для аппроксимации распределения частиц по размерам. В работе [4] рассмотрена статика и динамика ориентационной поляризации магнитной жидкости при совместном действии магнитного и электрического полей. Примечательным выводом в данной работе является то, что в переменном электрическом поле

диэлектрическая проницаемость становится явной функцией времени. Этот вывод применим к нашей работе.

В свою очередь существует ещё один способ, позволяющий определить гидродинамический размер частиц магнитной жидкости, полностью улучшая согласие между теорией и экспериментом. Таким методом является диэлектрический анализ.

Диэлектрический анализ основывается на измерении частотных зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости. Согласно теории Дебая, комплексная диэлектрическая проницаемость представима в виде:

$$\varepsilon = \varepsilon' + i \cdot \varepsilon''.$$

Здесь ε' – действительная часть, а ε'' – мнимая часть диэлектрической проницаемости. Мнимая часть диэлектрической проницаемости ε'' отражает потери энергии электрического поля в диэлектрике, из-за чего её называют коэффициентом диэлектрических потерь.

Путем некоторых преобразований можно построить зависимость между ε' и ε'' , т.е. так называемую диаграмму Коул – Коула. Из её вида можно сделать вывод о наличии времени релаксации или даже целого спектра этих времен. При наличии единственного времени релаксации диаграмма будет представлять собой полуокружность с радиусом $r = (\varepsilon - \varepsilon_\infty)/2$, где ε_∞ – диэлектрическая проницаемость при частоте, которая стремится к бесконечности. Если же диаграмма имеет искажения от формы правильной полуокружности, то это свидетельствует о наличии непрерывного набора времен релаксации, которые распределены около некоторого среднего значения.

Помимо переменного электрического поля стоит также учесть тепловое движение молекул, которое вносит некую дезориентацию. Процесс дезориентации диполей происходит благодаря вращательной диффузии. Учитывая это можно получить формулу Дебая для характерного времени релаксации, из которой нетрудно оценить гидродинамический размер частиц:

$$\tau = \frac{3\eta}{kT} \frac{\pi d^3}{6}.$$

Здесь k – постоянная Больцмана, T – температура образца, d – гидродинамический диаметр частиц, η – вязкость образца.

Целью нашей работы является оценить средний размер частиц магнитной жидкости и получить распределение её частиц по размерам с помощью диэлектрического анализа.

Получение частотных зависимостей выполнялось с помощью высокочастотного анализатора LCR-821. При всех измерениях

использовалась параллельная схема замещения с управляющим напряжением 0.8 В. Замеры проводились в диапазоне частот от 0.2 кГц до 15 кГц. В качестве объекта исследования использовалась коллоидная дисперсия магнетита в керосине, частицы которой стабилизированы олеиновой кислотой. Для определения динамической вязкости были проведены измерения на реометре Physica MCR501 при температуре воздуха: 21.5°C. При той же температуре проводились измерения диэлектрических свойств.

На рис. 1 приведены результаты измерения емкости и тангенса угла потерь от частоты для ячейки с магнитной жидкостью в виде зависимостей $C(\omega)$ и $D(\omega)$.

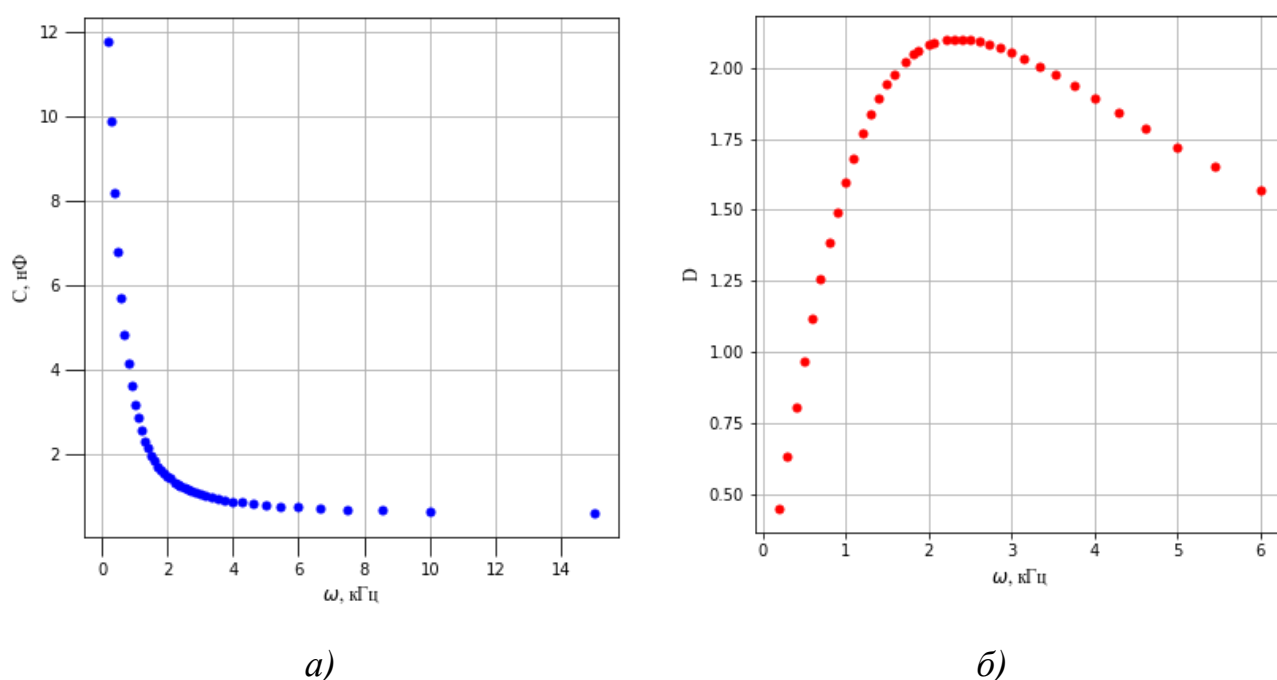


Рис. 1. Зависимость от частоты ω :
а) емкости C ; б) тангенса угла потерь D

С помощью реометра Physica MCR501 была определена динамическая вязкость $\eta = 0.017$ Па·с.

На основе полученных данных вычислялись мнимая и действительная часть диэлектрической проницаемости по формулам:

$$\varepsilon' = C / C_0,$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot (D),$$

где: C_0 – емкость пустой ячейки. В результате измерений на частоте 0.1 кГц и 10 кГц было установлено, что $C_0 = 147$ пФ.

На рис. 2 представлена зависимость действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости от частоты.

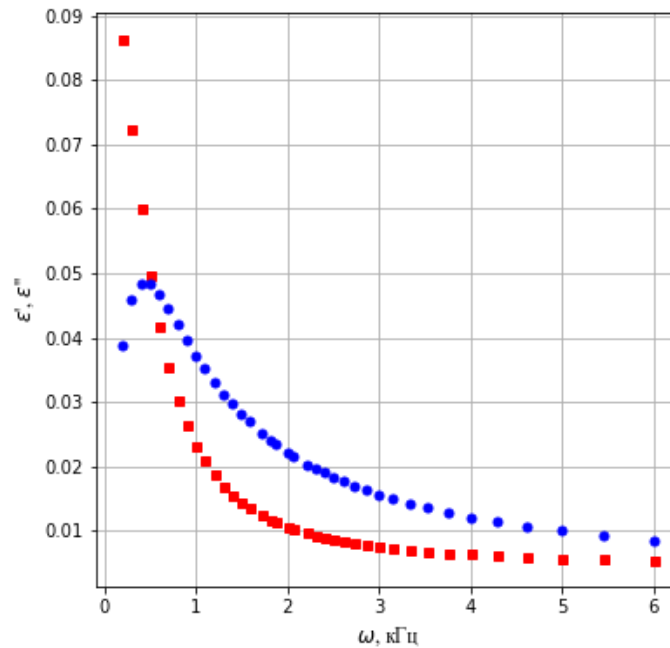


Рис. 2. Зависимость от частоты ω действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости. Красным обозначена действительная часть, синим – мнимая

По полученным значениям можно построить непосредственно диаграмму Коул – Коула, которая изображена на рис. 3.

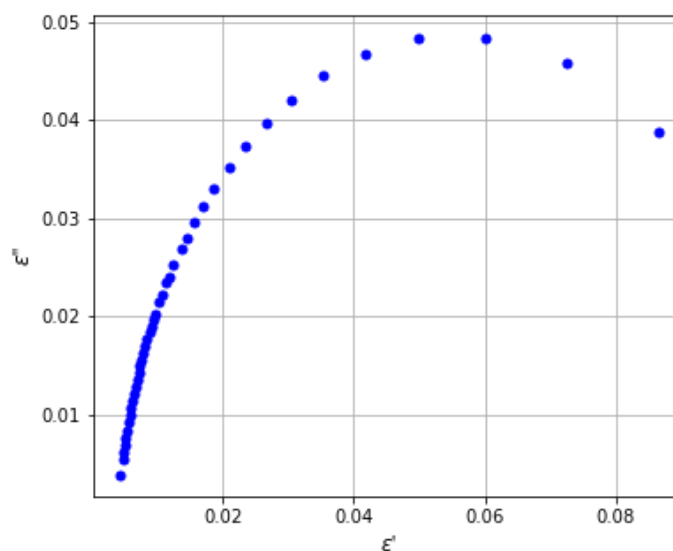


Рис. 3. Диаграмма Коул-Коула

Очевидно, что диаграмма в данном случае не представляет собой правильную полуокружность. Любые деформации и отклонения указывают на наличие непрерывного набора времен релаксации.

Пользуясь полученной диаграммой Коул – Коула, было произведено разбиение мнимой части диэлектрической проницаемости на 30 равномерно

распределенных зон. Для оценки характерного времени релаксации частиц каждого размера была использована формула:

$$\tau_i \cdot \omega = 1.$$

Здесь ω – циклическая частота, соответствующая выбранным точкам на диаграмме, τ_i – характерное время релаксации, i – сорта частиц магнитной жидкости.

На рис. 4. приведена гистограмма распределения частиц по размерам.

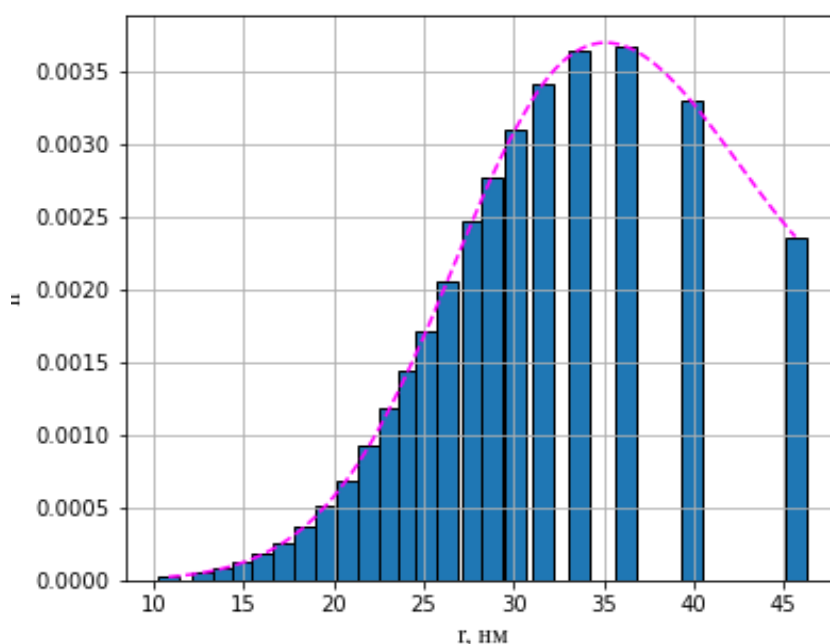


Рис.4. Распределение частиц по размерам

Согласно результатам гранулометрического анализа средний радиус частиц составил 25 ± 5 нм.

Список литературы

1. Шлиomis М. И. Магнитные жидкости // Успехи физических наук. 1974. Т.112. № 3. С. 427–458.
2. Блум Э. Я., Цеберс А. О. Магнитные жидкости. М.: Наука, 1989. 64 с.
3. Pschenichnikov A. F., Mekhonoshin V. V., Lebedev A. V. Magneto-granulometric analysis of concentrated ferrocolloids // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1996. Vol. 161. P. 94–102.
4. Райхер Ю. Л., Петрикевич А. В. Динамическая проницаемость магнитной жидкости // Магнитная гидродинамика. 1987. №2. С. 50–58.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА КОНВЕКЦИЮ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КОЛЬЦЕВОМ ЗАЗОРЕ

А. Т. Кучукова, М. Т. Краузина, П. В. Краузин

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

Изучалась конвекция магнитной жидкости между двумя горизонтальными концентрическими и эксцентрическими цилиндрами в отсутствии и при наличии гравитации. Уравнения тепловой конвекции решались численно с использованием метода конечных элементов. Выяснилось, что перепад температуры слабо влияет на теплоперенос по сравнению с магнитным полем. Также обнаружен слабая зависимость числа Нуссельта от относительного положения цилиндров в сильном магнитном поле.

Ключевые слова: тепловая конвекция; число Нуссельта; кольцевой зазор

INFLUENCE OF A MAGNETIC FIELD ON THE CONVECTION OF A FERROFLUID IN A HORIZONTAL ANNULAR GAP

A. T. Kuchukova, M. T. Krauzina, P. V. Krauzin

Perm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

The convection of a magnetic fluid between two horizontal concentric and eccentric cylinders in the absence and presence of gravity is studied. The thermal convection equations were solved numerically using the finite element method. It turned out that the temperature drop has little effect on heat transfer compared to the magnetic field. A weak dependence of the Nusselt number on the relative position of the cylinders in a strong magnetic field was also found.

Keywords: heat convection; Nusselt number; annular gap

Свободной конвекции в слое жидкости, ограниченном двумя горизонтальными цилиндрами, было посвящено множество работ, начиная с 30-х годов прошлого столетия [1]. Интерес к данной задаче обусловлен возможностью широкого применения в технике, например, в системах охлаждения ядерных реакторов и электронных компонентов. В классической работе Куэна [2] было проведено экспериментальное и теоретико-численное исследование естественной конвекции в пространстве между горизонтальными концентрическими цилиндрами. Был установлен закон теплопереноса $Nu \propto Ra^m$. Для воды $m = 0.238$ в интервале чисел Рэлея от $2 \cdot 10^4$ до $9 \cdot 10^4$.

Одним из способов интенсификации теплообмена является использование термомагнитной конвекции, которая реализуется в магнитной жидкости (МЖ). Движущей силой в случае термомагнитной конвекции является величина, определяемая намагниченностью МЖ и градиентом

магнитного поля: $\mu_0 M \nabla H$. При увеличении температуры жидкости объемная намагниченность жидкости уменьшается из-за теплового расширения жидкости-носителя. В результате области с меньшей температурой жидкости будут сильнее намагничиваться. Такая температурная неоднородность намагниченности порождает градиент напряженности магнитного поля внутри жидкости, направленный к горячей стенке, и холодный элемент жидкости будет втягиваться в область большего магнитного поля. Таким образом, в отличие от естественной гравитационной конвекции, конвекция МЖ может контролироваться напряженностью магнитного поля.

Одним из управляющих параметров термомагнитной конвекции является магнитное число Рэлея:

$$Ra_m = \frac{\mu_0 M_s^2 \beta \Delta T h^2}{\rho \nu a},$$

где μ_0 – магнитная постоянная, M_s – намагниченность насыщения, ρ – плотность МЖ, ΔT – характерная разность температур, h – размер полости, β – коэффициент теплового расширения, ν – коэффициент кинематической вязкости, a – коэффициент температуропроводности жидкости.

Исследуем конвекцию МЖ, находящейся между двумя горизонтальными коаксиальными цилиндрами во внешнем однородном магнитном поле при наличии и в отсутствие гравитации. Будем считать, что внутренний цилиндр изготовлен из магнитомягкого материала. Такой цилиндр при намагничивании внешним магнитным полем будет сам является источником сильного неоднородного магнитного поля, что позволяет получить интенсивную конвекцию [3].

Использовалось приближение Буссинеска, в рамках которого зависимость плотности от температуры учитывается только при записи подъемной силы [4].

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} &= -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{v} + \frac{\mu_0}{\rho_0} M \nabla H - \mathbf{g} \beta_\rho (T - T_{cp}), \quad \text{div } \mathbf{v} = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T &= a \Delta T, \quad \frac{\partial T_\phi}{\partial t} = a_\phi \Delta T_\phi, \quad \frac{\partial T_{PLA}}{\partial t} = a_{PLA} \Delta T_{PLA}, \\ \text{rot } \mathbf{H} &= 0, \quad \text{div } \mathbf{B} = 0, \quad \mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}(\mathbf{H}, T)). \end{aligned}$$

Здесь \mathbf{v} – скорость, p – давление, T – абсолютная температура, $T_{cp} = (T_{гор} + T_{хол})/2$, $T_{гор}$ и $T_{хол}$ – температуры внутренней и внешней стенки цилиндров соответственно, g – ускорение силы тяжести, \mathbf{H} – напряженность магнитного поля, \mathbf{B} – индукция магнитного поля, \mathbf{M} – намагниченность МЖ. В начальный момент времени жидкость полагалась неподвижной, имеющая теплопроводное распределение температуры. Материал внутреннего цилиндра – феррит, внешнего – полилактид (PLA). На границах слоев выполняется равенство температур и тепловых потоков. Внешнее постоянное магнитное поле задано однородным на удалении от цилиндров.

Закон намагничивания МЖ задавался выражением для магнитной восприимчивости:

$$\mathbf{M}(\mathbf{H}, T) = \chi(H, T)\mathbf{H},$$

$$\chi = \frac{\chi_0 (1 - \beta(T - T_{\text{ср}}))}{1 + \chi_0 H / M_s}.$$

Перейдем от напряженности магнитного поля к магнитному потенциалу: $\mathbf{H} = -\nabla V$. Тогда теорема о циркуляции магнитного поля будет выполняться автоматически, а теорема Гаусса примет вид:

$$\Delta V + \frac{\nabla \chi \cdot \nabla V}{1 + \chi} = 0.$$

Сила Кельвина, также выраженная через потенциал напряженности магнитного поля, определяется выражением:

$$\mu_0 M \nabla H = \mu_0 \chi ([V_x V_{xx} + V_y V_{yx}] \mathbf{e}_x + [V_x V_{xy} + V_y V_{yy}] \mathbf{e}_y).$$

Система уравнений тепловой конвекции решалась численно, методом конечных элементов с помощью решателя, интегрированного в вычислительный пакет Comsol Multiphysics 5.6.

Число Нуссельта представляет собой отношение полного теплового потока к его теплопроводной составляющей. Для вычисления среднего числа Нуссельта Nu использовался полный тепловой поток, усредненный по внешней границе жидкости

$$Nu = \frac{\langle q_{\text{конв}} \rangle}{q_{\text{теплопр}}}.$$

При термомагнитной конвекции течение состоит из четырех ячеек. При изменении перепада температуры и внешнего магнитного поля вид течения остается неизменным (рис. 1).

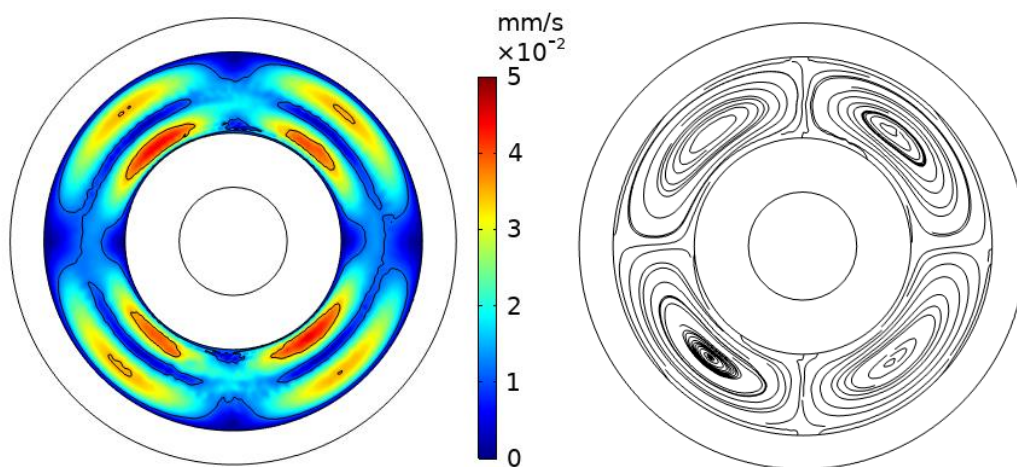


Рис. 1. Поле модуля скорости и линии тока ($\Delta T = 15 \text{ K}$, $B/(\mu_0 M_s) = 0.1$)

Для термомагнитной конвекции в случае невесомости были построены изотермы течения при перепаде температуры $\Delta T = 30$ К и различных значениях безразмерной индукции магнитного поля (рис. 2). Конвективные структуры стремятся к симметричному распределению относительно горизонтальной плоскости, проходящей через ось цилиндров.

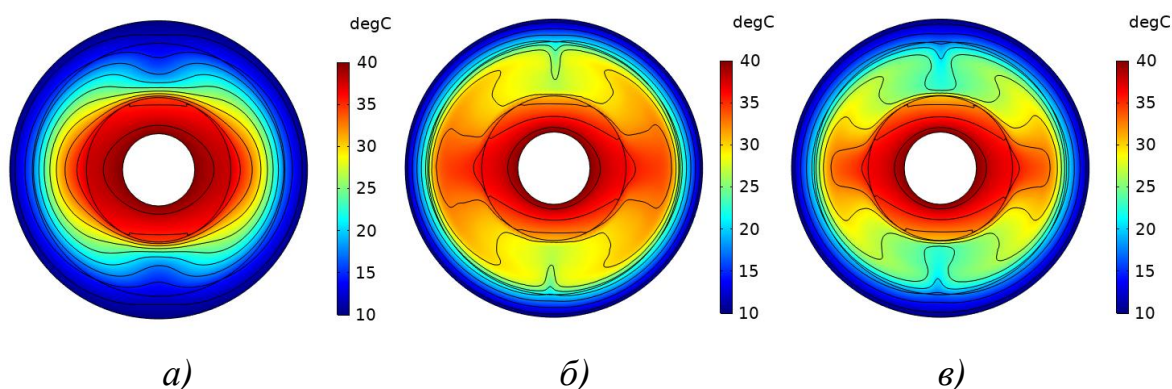


Рис. 2. Поле температуры при $\Delta T = 30$ К в случае невесомости:
а) $B/(\mu_0 M_s) = 0.1$; б) $B/(\mu_0 M_s) = 0.5$; в) $B/(\mu_0 M_s) = 1$

Далее рассмотрим конвекцию жидкости во внешнем однородном магнитном и гравитационном полях. Структура потока переходит от течения, состоящего из двух конвективных ячеек, типичного для гравитационной конвекции в кольцевом зазоре, к течению из четырех ячеек, типичному для конвекции в магнитном поле (рис. 3).

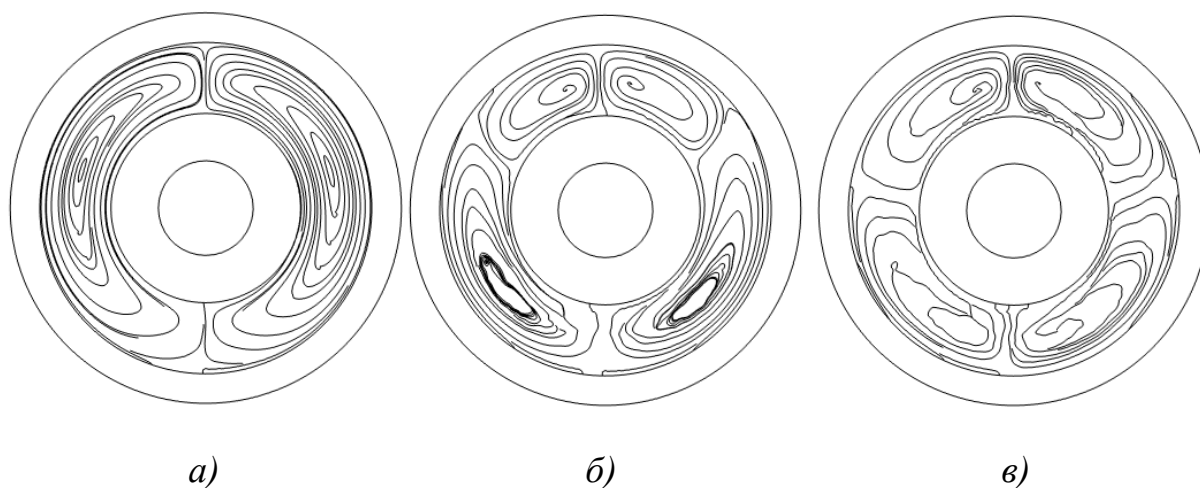


Рис. 3. Линии тока при перепаде $\Delta T = 15$ К:
а) $B/(\mu_0 M_s) = 0.1$; б) $B/(\mu_0 M_s) = 0.5$; в) $B/(\mu_0 M_s) = 1$

При малых магнитных полях наблюдается симметричное двухвихревое течение. При увеличении индукции внешнего однородного магнитного поля вместо одного теплового факела возникают четыре: два направленных от внутреннего цилиндра и два от внешнего.

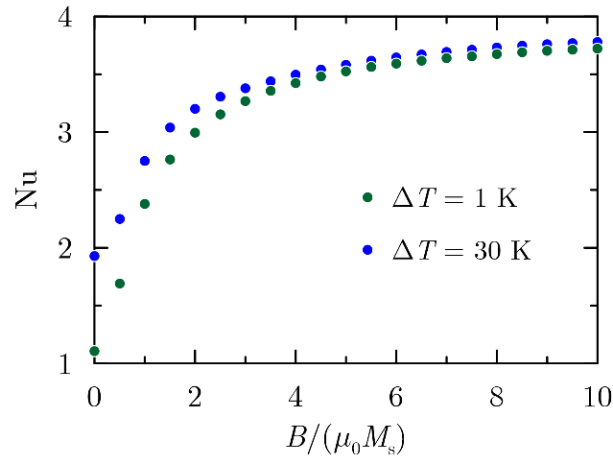


Рис. 4. Зависимость числа Нуссельта от внешнего магнитного поля

Из рис. 4 видно, что при малых магнитных полях главным механизмом конвекции является гравитационный. При больших магнитных полях неоднородность температуры становится несущественной для конвективного теплопереноса.

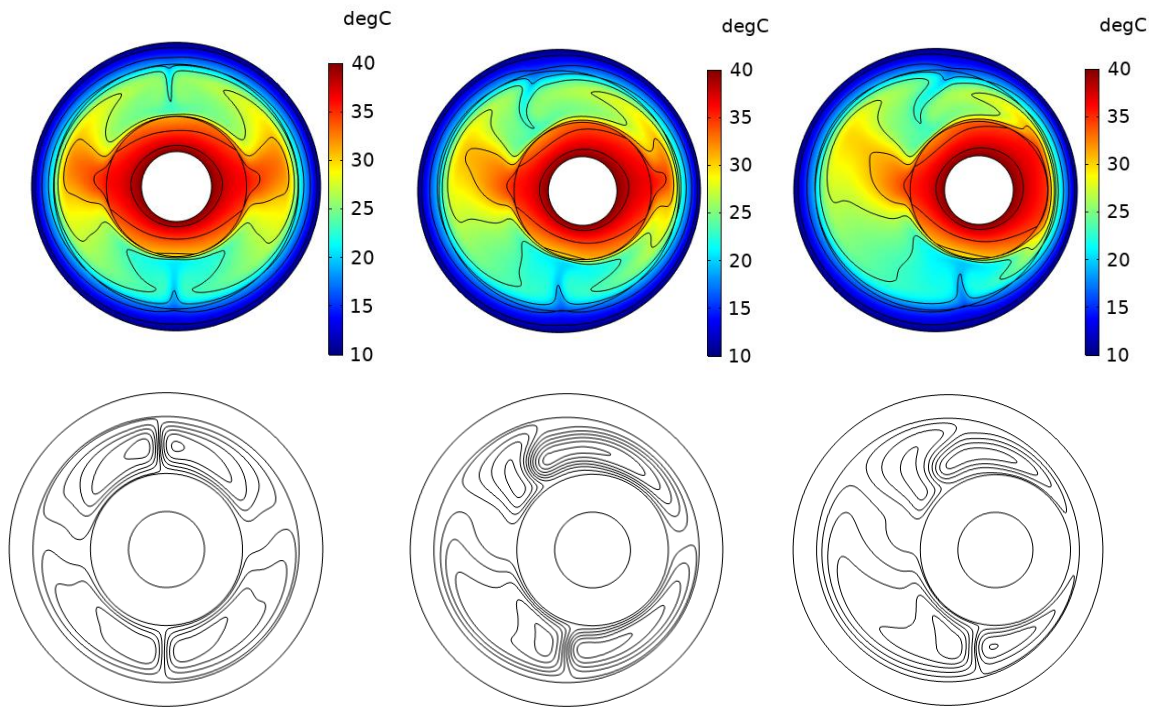


Рис. 5. Поле температуры и линии тока при $\Delta T = 30$ K $B/(\mu_0 M_s) = 1$

Перейдем к рассмотрению конвективного течения МЖ в кольцевом зазоре между двумя круговыми эксцентрическими цилиндрами. На рис. 5 показаны изотермы и линии тока конвективного течения во внешнем однородном магнитном и гравитационном полях. При любом смещении внутреннего цилиндра вид течения состоит из четырех ячеек (в случае гравитационной конвекции течение остается двухвихревым).

С увеличением безразмерной индукции внешнего однородного магнитного поля зависимость числа Нуссельта от смещения ослабевает (рис. 6).

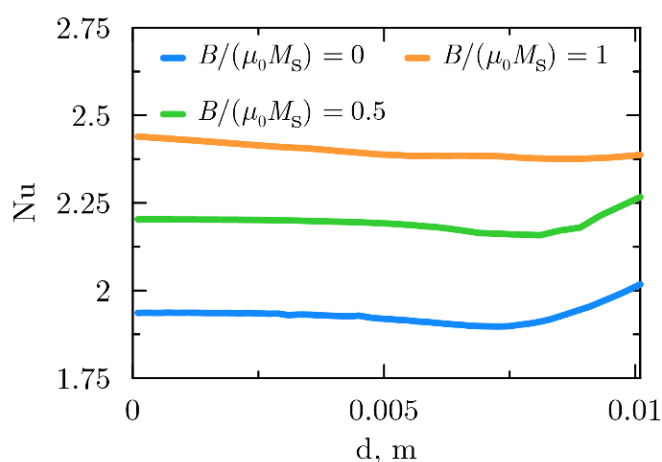


Рис. 6. Зависимость числа Нуссельта от смещения

Численно было изучено влияние магнитного поля на конвекцию МЖ в кольцевом зазоре между двумя горизонтальными коаксиальными цилиндрами в случае невесомости. Выяснилось, что перепад температуры слабо влияет на теплоперенос по сравнению с магнитным полем. Было обнаружено, что изменение относительного положения цилиндров приводит к искривлению линий тока и изотерм, но слабо изменяет число Нуссельта.

Также была рассмотрена конвекция в гравитационном и магнитном полях. Оба механизма приводят к росту теплопереноса и не являются конкурирующими.

Список литературы

1. Beckmann W. Die Wärmeübertragung in zylindrischen Gasschichten bei natürlicher Konvektion // Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A. 1931. Bd. 2. S. 165–178.
2. Kuehn T. H., Goldstein R. J. An experimental and theoretical study of natural convection in the annulus between horizontal concentric cylinders // Journal of Fluid Mechanics. 1976. Vol. 74 (4). P. 695–719.
3. Krakov M. S., Nikiforov I. V. Influence of the shape of the inner boundary on thermomagnetic convection in the annulus between horizontal cylinders: Heat transfer enhancement // International Journal of Thermal Science. 2020. Vol. 153. 106374(16).
4. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.

ХАОТИЧЕСКИЕ И ПЕРИОДИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОКОНВЕКЦИИ ИДЕАЛЬНОГО ЖИДКОГО ДИЭЛЕКТРИКА В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В. А. Ильин, М. О. Суханов

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

Рассмотрена маломодовая модель электротермической конвекции идеального диэлектрика в переменном электрическом поле горизонтального конденсатора. На основе неё проведено исследование нелинейных режимов электроконвекции в невесомости. Для анализа режимов использованы Фурье анализ, вычисление зависимостей числа Нуссельта и вычисление показателей Ляпунова. Обнаружены языкообразные области периодических режимов в области хаоса. Определены сценарии перехода к хаосу.

Ключевые слова: электроконвекция; идеальная диэлектрическая жидкость

CHAOTIC AND PERIODIC REGIMES OF ELECTROCONVECTION OF IDEAL LIQUID DIELECTRIC IN AN ALTERNATING ELECTRIC FIELD

V. A. Il'in, M. O. Sukhanov

Perm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

A low-mode model of electrothermal convection of an ideal dielectric in an alternating electric field of a horizontal capacitor is considered. A study of nonlinear regimes of electroconvection in weightlessness was carried out on the basis of this model. Fourier analysis, calculation of dependences of the Nusselt number and calculation of Lyapunov exponents were used to analyze the regimes. Language-like regions of periodic regimes in the chaos region have been found. Scenarios of transition to chaos are defined.

Keywords: electroconvection; ideal dielectric liquid

Введение

В случае обычной тепловой конвекции в горизонтальном плоском слое неоднородно нагретой жидкости, находящейся при определенном пороговом значении нагрева, возникает неустойчивость. Вследствие этого возникают конвективные движения в виде валов. Порог конвекции неоднородно нагретой жидкости может изменяться благодаря действию специфических электроконвективных механизмов неустойчивости, связанных с различными способами возникновения заряда в жидкости [1]. Примером такого механизма служит – диэлектрофоретический механизм неустойчивости, вызванный зависимостью диэлектрической проницаемости от температуры. Диэлектрофоретические силы, возникшие в объеме жидкости, могут

приводить жидкость в движение даже в невесомости, благодаря неоднородности диэлектрической проницаемости.

Если мы рассматриваем идеальный диэлектрик, в котором проводимость среды равна нулю, где свободные объемные заряды отсутствуют, то образование объемного заряда происходит за счет неоднородности поляризации среды. Известно, что в линейной задаче об устойчивости идеального диэлектрика колебательные возмущения отсутствуют – порог конвекции связан с монотонной модой [1, 2]. Ветвление нелинейных режимов идеального жидкого диэлектрика в постоянном электрическом поле происходит благодаря прямой бифуркации. В работах [2–4] рассмотрены маломодовые модели электротермической конвекции идеального жидкого диэлектрика в горизонтальном конденсаторе. В [5–7] рассмотрены методы анализа колебательных режимов, используемые в работе.

Постановка задачи

Рассмотрим плоский горизонтальный слой (рис. 1) вязкой несжимаемой идеальной диэлектрической жидкости, находящейся в переменном вертикальном электрическом поле \vec{E} и поле силы тяжести \vec{g} . Ось x располагается в середине слоя и направлена вдоль границ, ось z перпендикулярна границам.

Идеально тепло- и электропроводные пластины конденсатора расположены при $z = -h/2, h/2$ (h – толщина слоя) и нагреты до разных температур: $T(-h/2) = \Theta$, $T(h/2) = 0$. Здесь T – температура, отсчитываемая от температуры верхнего электрода, Θ – характерная разность температур. Случай $\Theta > 0$ соответствует нагреву снизу. Потенциал поля верхней границы равен нулю: $\varphi(h/2) = 0$, потенциал нижней границы изменяется со временем по гармоническому закону: $\varphi(-h/2) = U \cos(\Omega t)$. Здесь U – амплитуда напряжения, $\Omega = 2\pi/t_f$ – частота, t_f – период модуляции.

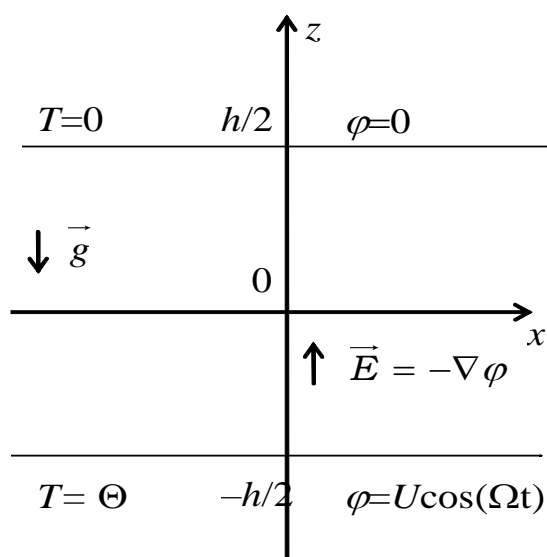


Рис. 1. Геометрия задачи

В задаче рассматриваются уравнения и свободные граничные условия такие же, как в работах [2, 3].

Маломодовая модель

В работе изучение режимов электроконвекции проведено на основе трёхмодовой модели электротермической конвекции идеального жидкого диэлектрика в переменном электрическом поле горизонтального конденсатора, полученной и описанной в работах [2, 3]:

$$\begin{aligned}\dot{X} &= -\text{Pr} X + \text{Pr}(r + e \cos^2 2\pi \nu t)Y, \\ \dot{Y} &= -Y + X - XZ, \\ \dot{Z} &= -bZ + XY.\end{aligned}\tag{1}$$

Здесь X , Y , Z – перемасштабированные амплитуды, характеризующие различные пространственные моды функции тока, температуры и плотности заряда; Pr – число Прандтля; r – нормированное тепловое число Рэлея; e – нормированное электрическое число Рэлея; b – геометрический параметр, который зависит от волнового числа k ; Ra_0 , $\text{Ra}_{\varepsilon 0}$ – критические числа, при которых начинается термогравитационная или диэлектрофоретическая конвекция соответственно. Из определения электрического числа следует, что e – всегда положительно ($e > 0$).

Здесь вместо циклической частоты использована линейная частота $\omega = 2\pi\nu$ и введены новые параметры:

$$\begin{aligned}r &= \frac{\text{Ra}}{\text{Ra}_0}, \quad e = \frac{\text{Ra}_\varepsilon}{\text{Ra}_{\varepsilon 0}}, \quad b = \frac{4}{1+k^2}, \\ \text{Ra}_0 &= \frac{\pi^4(1+k^2)^3}{k^2}, \quad \text{Ra}_{\varepsilon 0} = \frac{\pi^4(1+k^2)^4}{k^4},\end{aligned}\tag{2}$$

Динамическая система (1) является обобщением маломодовой модели Лоренца [5] на случай переменного электрического поля. При значении электрического числа $e = 0$, система (1) моделирует тепловую рэлеевскую конвекцию.

Результаты

Для большинства диссипативных систем для решения задач используются численные методы. Применение классических методов построения приближенных решений в аттракторах динамических систем даёт значительные ошибки на больших отрезках времени из-за неустойчивости исследуемых хаотических режимов. Поэтому интегрирование системы (1) производилось при помощи метода Рунге – Кутты 8-го порядка точности. В качестве начальных условий для амплитуд использовались одни и те же значения: $X = 0$, $Y = 0.5$, $Z = 0$. Расчеты проводились для числа Прандтля $\text{Pr} = 10$. В невесомости при $\text{Ra} = 0$ ($r = 0$) волновое число и электрическое число Рэлея в минимуме нейтральной

кривой: $k = 1$, $Ra_{\varepsilon_0} = 16\pi^4 = 1558.6$ [3–4]. Тогда геометрический параметр $b = 2$.

В ходе исследования были обнаружены различные периодические и хаотические электроконвективные режимы движения жидкости. Помимо стандартных методов исследования (Фурье анализ, вычисление зависимостей числа Нуссельта) для анализа режимов рассмотрен и реализован метод Бенеттина для вычисления старшего показателя Ляпунова. После систематизации результатов построена карта режимов электроконвекции на плоскости период $t_f = 1/\nu$ – амплитуда модуляции e (рис. 2).

На рис. 2 слева можно увидеть 3 «языка» хаотических режимов (1–3), разделенных областями периодических режимов, а справа – 3 «языка» периодических режимов в области хаоса (4–6). Если двигаться в пространстве параметров вверх по амплитуде при фиксированной частоте через область хаоса, мы будем последовательно проходить области хаотических режимов с 3 «языками» (окнами) периодичности.

Область квазиравновесия, в которой все возмущения затухают, располагается ниже линии $e = 2$. Для точки a на рис. 2 возмущения затухают колебательным образом с удвоенное внешней частотой $\nu = 1.25$.

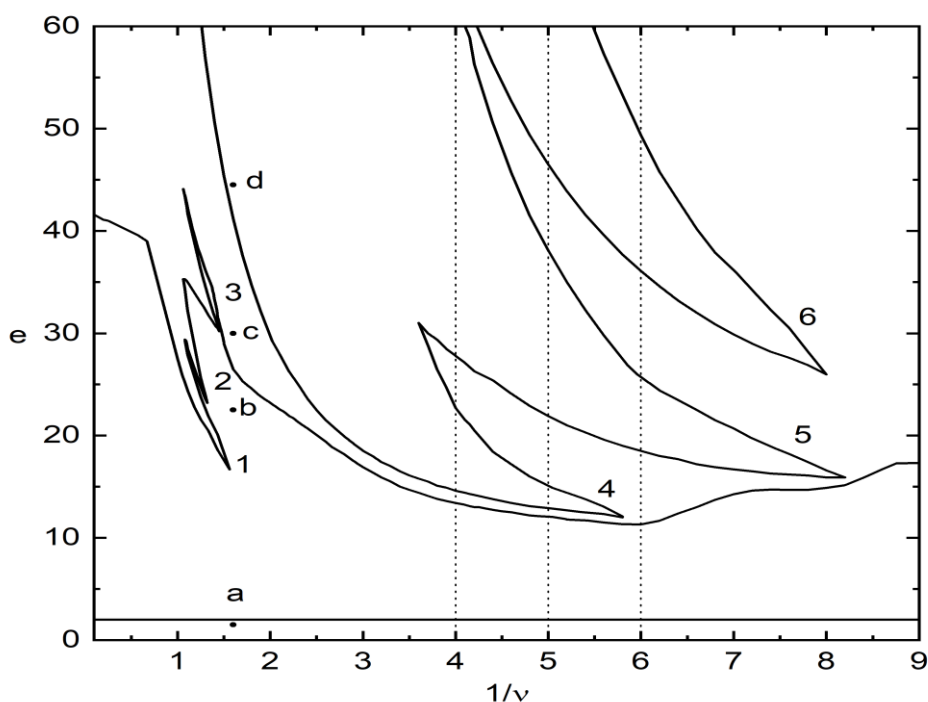


Рис. 2. Карта режимов на плоскости период модуляции – электрическое число Рэлея

В точках b и d возникает параметрическая неустойчивость – рождаются периодические колебания. В спектрах Фурье наблюдаются кратные частоты $\nu_n = n\nu$, где n – целое число, что свидетельствует о синхронном отклике системы на внешние воздействия. В первом случае (точка b на рис. 2)

амплитуда X колеблется с удвоенной частотой внешнего воздействия. В спектре Фурье наблюдаются кратные частоты $n\nu$, где $n = 2, 4, \dots$. Во втором случае (точка d на рис. 2) в спектре Фурье присутствует колебания с частотой внешнего воздействия $n = 1, 3, \dots$

В точке c на рис. 2 наблюдается хаотический режим. В этом случае колебания ведут себя нерегулярным образом, спектр Фурье – сплошной.

Наличие в спектре хотя бы одного положительного показателя Ляпунова означает неустойчивость рассматриваемой фазовой траектории. Если все показатели отрицательные, то это говорит об асимптотической устойчивости траекторий.

В пространстве параметров t_f и e (рис. 2) при периодах $t_f = 4; 5; 6$ были исследованы сценарии перехода к хаосу. Переход к хаотическим колебаниям происходит через субгармонический каскад удвоений периода колебаний. При выходе из 1 окна периодичности («язык» 4 на рис. 2) в область хаотических колебаний первое бифуркационное удвоение периода происходит при $e_1 = 13.4062$: в системе появляется частота, равная половине внешней ($\nu = 0.125$). Второе удвоение – $e_2 = 13.4621$ ($\nu = 0.0625$), третье – $e_3 = 13.4739$ ($\nu = 0.03125$). Проведем оценку константы Фейгенбаума по первым трем e_k , она дает значение: $\delta = 4.706$. Её точное значение определяется соотношением [6]:

$$\delta = \lim_{\delta \rightarrow \infty} \frac{e_n - e_{n-1}}{e_{n+1} - e_n} = 4.669\dots$$

Полученные значения e_1, e_2, e_3 вычислялись до четвертого знака после запятой, чтобы уменьшить погрешность оценки. Полученный результат совпадает с табличным значением с точностью 0.79%. Для частоты $\nu = 0.2$ ($t_f = 5$) первые три удвоения периода происходят при $e_1 = 35.985$, $e_2 = 36.477$, $e_3 = 36.569$. В этом случае $\delta = 5.348$. Для частоты $\nu = 0.16$ ($t_f = 6$) три удвоения периода происходят при $e_1 = 47.509$, $e_2 = 47.890$, $e_3 = 47.953$. Тогда $\delta = 6.047$.

Заключение

В настоящей работе исследована маломодовая модель электроконвекции идеального жидкого диэлектрика в переменном электрическом поле горизонтального конденсатора. В рамках этой модели были исследованы режимы электрической конвекции идеального диэлектрика. Рассмотрен случай, когда диэлектрофоретический механизм зарядообразования играет основную роль. Были изучены различные периодические и хаотические режимы колебаний жидкости в переменном электрическом поле, исследована модель электроконвекции при умеренных и низких частотах. В рамках модели для произвольных частот на плоскости обратная частота – амплитуда модуляции определены области

существования этих режимов для случая невесомости. Рассмотрен и реализован метод Бенеттина для вычисления старшего показателя Ляпунова. Рассчитана область старших показателей Ляпунова для множества параметров модели. Определены сценарии перехода к хаосу в окнах периодичности.

Список литературы

1. *Болога М. К., Гросу Ф. П., Кожухарь И. А.* Электроконвекция и теплообмен. Кишинев: Штиинца, 1977. 320 с.
2. *Ильин В. А., Смородин Б. Л.* Конвекция идеального диэлектрика в переменном электрическом поле // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2005. Вып. 1. С. 94–100.
3. *Ильин В. А.* Маломодовая модель электроконвекции идеального диэлектрика // Журнал технической физики. 2010. Т.80. Вып. 8. С. 38–48.
4. *Ильин В. А.* Модель электротермической конвекции идеального диэлектрика в горизонтальном конденсаторе // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2016. № 5. С. 10–16.
5. *Фрик П. Г.* Турбулентность: модели и подходы. Курс лекций. Часть I. Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 1998. 108 с.
6. *Берже П., Помо И., Видаль К.* Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности. М.: Мир, 1991. 368 с.
7. *Benettin G., Galgani L., Giorgilli A., Strelcyn J.-M.* Lyapunov characteristic exponents for smooth dynamical systems and for Hamiltonian systems; a method for computing all of them. P. II: Numerical application // *Meccanica*. 1980. Vol. 15. P. 21–30.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ТОНКОМ СЛОЕ ФЕРРОЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВИБРАЦИЙ

И. В. Володин^{a,b}, А. А. Алабужев^{a,b}

^aПермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

^bИнститут механики сплошных сред УрО РАН,
614013, Пермь, Академика Королева, 1

Рассматривается неограниченная тонкая пленка феррожидкости в постоянном однородном магнитном поле. На систему действуют вертикальные вибрации заданной частоты и амплитуды. Отклонения свободной поверхности от равновесного состояния считаются малыми. Изучается вклад, который вносит вектор намагниченности феррожидкости в распределение магнитного поля.

Ключевые слова: магнитное поле; феррожидкость; тонкая пленка; свободная поверхность

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION IN A THIN FERROFLUID FILM UNDER VERTICAL VIBRATIONS

I. V. Volodin^{a,b}, A. A. Alabuzhev^{a,b}

^aPerm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

^bInstitute of Continuous Media Mechanics UB RAS,
1 Academician Korolev St., 614013, Perm

A thin unbounded ferrofluid film in a static magnetic field is considered. The system is subjected to vertical vibrations of a given frequency and amplitude. Surface deflection from the ground state is considered small. The contribution of the ferrofluid magnetization vector to the distribution of the magnetic field is studied.

Keywords: magnetic field; ferrofluid; thin film; free surface

Магнитные жидкости или феррожидкости представляют собой коллоидную дисперсию однодоменных частиц в непроводящей жидкости. Амплитуду и направления магнитных полей можно легко варьировать, что открывает большие возможности для фундаментальных исследований в области гидродинамики, а также для разработки приложений с использованием феррожидкостей. Большинство ее применений основано на поведении границы раздела пленок в присутствии магнитного поля [1, 2].

В данной работе рассматривается двумерная неограниченная в продольном направлении пленка. Снизу феррожидкость ограничена твердой немагнитной непроводящей подложкой, сверху – невесомым газом, влияние которого пренебрежимо мало. Система находится в поле тяжести, на нее воздействуют вертикальные вибрации постоянной амплитуды и частоты и постоянное вертикальное магнитное поле $\mathbf{H}_0(0, H_0)$. Введем декартову систему координат с базисом $(\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y)$, как показано на рис. 1.

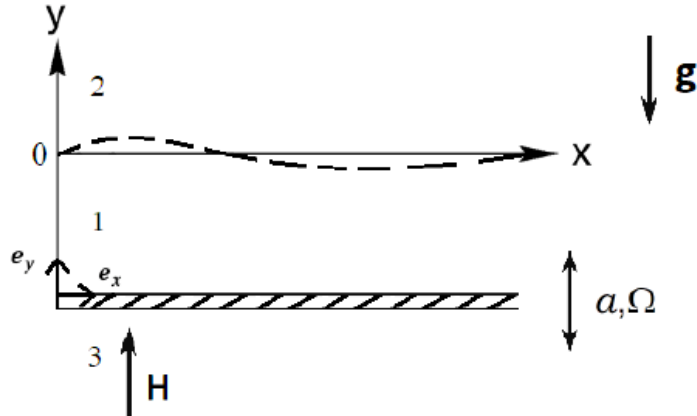


Рис. 1. Геометрия задачи

Пространство 1 занимает магнитная жидкость, пространства 2 и 3 занимают немагнитные среды над и под феррожидкостью, соответственно. Предполагается, что среда 1 является вязкой и несжимаемой, в ней отсутствуют свободные электрические заряды. Время релаксации магнитного поля считается бесконечно малым, так, что поле успевает мгновенно перестроиться после периода колебаний внешних вибраций. Пленка магнитной жидкости в среде 1 считается тонкой, поэтому задача характеризуется наличием малого параметра $\varepsilon = c_0/L \ll 1$, где c_0 – характерная толщина пленки, L – продольный характерный размер задачи. Изучается вклад, который вносит вектор намагниченности феррожидкости при малых отклонениях поверхности от равновесного состояния, в распределение магнитного поля.

Стационарное магнитное поле описывается следующей системой уравнений [3]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \mathbf{B} = 0, \quad (2)$$

$$[\mathbf{H}\boldsymbol{\tau}] = 0, \quad (3)$$

$$[\mathbf{B}\mathbf{n}] = 0, \quad (4)$$

где \mathbf{H} – напряженность магнитного поля, \mathbf{B} – вектор магнитной индукции, \mathbf{n} – вектор нормали к поверхности, $\boldsymbol{\tau}$ – вектор касательный к поверхности, ∇ – векторный дифференциальный оператор первого порядка. Материальные уравнения выражаются соотношениями: $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$, $\mathbf{M} = \chi\mathbf{H}$, где μ_0 – магнитная постоянная, \mathbf{M} – вектор намагниченности, χ – магнитная проницаемость, которая в общем случае является функцией от значения магнитного поля внутри феррожидкости.

В случае рассматриваемого нами малого отклонения поверхности от положения равновесия необходимо представить магнитное поле в виде:

$$\mathbf{H} \rightarrow \mathbf{H} + \varepsilon \mathbf{q}. \quad (5)$$

Теперь слагаемое \mathbf{H} в главном порядке разложения отвечает за распределение магнитного поля при отсутствии отклонения поверхности $y = \xi(x, t) = 0$. Слагаемое \mathbf{q} при первом порядке ε является вкладом при малом отклонении поверхности от положения равновесия $y = \xi(x, t) = \varepsilon \zeta(x, t)$. В дальнейшем, в силу малости амплитуды отклонения поверхности раздела $\xi(x, t) = \varepsilon \zeta(x, t)$, мы будем записывать граничные условия на невозмущенной поверхности $y = 0$.

Наличие разного пространственного масштаба диктует необходимость перемасштабирования переменных внутри тонкого слоя: $x = \varepsilon X$, $y = Y$, где новые переменные обозначены маленькими буквами. Новые пространственные переменные внутри феррожидкости приводят к перемасштабированию продольной производной и единичных векторов, нормального и касательного к поверхности жидкости:

$$\frac{\partial}{\partial x} = \varepsilon \frac{\partial}{\partial X}, \mathbf{n}(-\varepsilon \frac{\partial \xi}{\partial x} \mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y), \boldsymbol{\tau}(\mathbf{e}_x, \varepsilon \frac{\partial \xi}{\partial x} \mathbf{e}_y).$$

Решение поставленной задачи тривиально в нулевом порядке и аналогично случаю недеформируемой поверхности:

$$\mathbf{B}_1 = \mu H_0^{(1)} \mathbf{e}_y,$$

$$\mathbf{B}_{2,3} = \mu_0 H_0 \mathbf{e}_y,$$

где нижние индексы вектора индукции \mathbf{B} обозначают решение в соответствующей среде, $\mu = \mu_0(1 + \chi)$, величину $H_0^{(1)}$ можно найти из уравнения $H_0^{(1)} + \chi H_0^{(1)} = H_0$, при заданной функции $\chi(H_0^{(1)})$.

Для решения задачи в следующем порядке по ε необходимо учесть изменение положения поверхности от состояния равновесия $y = 0$:

$$(\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1)\mathbf{n} + \varepsilon \zeta \left(\frac{\partial \mathbf{B}_2}{\partial y} - \frac{\partial \mathbf{B}_1}{\partial y} \right) \mathbf{n} = 0,$$

$$(\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1)\boldsymbol{\tau} + \varepsilon \zeta \left(\frac{\partial \mathbf{H}_2}{\partial y} - \frac{\partial \mathbf{H}_1}{\partial y} \right) \boldsymbol{\tau} = 0.$$

На недеформируемой твердой поверхности условия имеют стандартный вид, то есть при $y = -c_0$:

$$(\mathbf{B}_3 - \mathbf{B}_1)\mathbf{e}_y = 0,$$

$$(\mathbf{H}_3 - \mathbf{H}_1)\mathbf{e}_x = 0.$$

Помимо вышеупомянутых условий, необходимо также учесть, исходя из физической постановки задачи $\mathbf{q}(y \rightarrow \pm\infty) \rightarrow 0$ и $\mathbf{q}(\varepsilon q_x, q_y)$, так как отклонения поверхности малы и величина x -компоненты поля вследствие этого значительно меньше y -компоненты.

Поскольку рассматривается неограниченная в продольном направлении пленка, пространственное распределение вдоль x -компоненты допустимо искать в виде $\zeta \sim \zeta_0 e^{ikx}$, где i – мнимая единица, k – волновое число.

Полное решение задачи (1) – (5), включающее главный и следующий порядки, будет иметь вид:

$$\mathbf{H}_1 = i\varepsilon Q \frac{k(y+c_0)+1+\chi}{1+\chi} e^{ikx} \mathbf{e}_x + \frac{1}{(1+\chi)} (H_0 + \varepsilon Q e^{ikx}) \mathbf{e}_y,$$

$$\mathbf{H}_2 = -i\varepsilon Q e^{ikx} e^{-ky} \mathbf{e}_x + (H_0 + \varepsilon Q e^{ikx} e^{-ky}) \mathbf{e}_y,$$

$$\mathbf{H}_3 = i\varepsilon Q e^{ikx} e^{k(y+c_0)} \mathbf{e}_x + (H_0 + \varepsilon Q e^{ikx} e^{k(y+c_0)}) \mathbf{e}_y,$$

$$Q = \frac{\chi \zeta_0 H_0 k}{2(1+\chi)+k}.$$

Полученное решение в случае недеформируемой поверхности ($\zeta_0 = 0$) сводится к решению для поля в нулевом порядке, в случае отсутствия магнетика ($\chi = 0$) сводится к тривиальному случаю однородного распределения. Полученное решение качественно совпадают с решениями полученными в [4, 5].

Работа И.В. поддержана бюджетной темой № 121112200078-7.

Список литературы

1. *Rosensweig R. E.* Magnetic fluids // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1987. Vol. 19. P. 473–463.
2. *Puri I. K., Ganguly R.* Particle transport in therapeutic magnetic fields // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2014. Vol. 46. P. 407–440.
3. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика. Т. 2. Теория поля. М.: Наука, 1988. 512 с.
4. *Müller H. M.* Parametrically driven surface waves on viscous ferrofluids // *Physical Review*. 1998. Vol. 58(5). P. 6199–6205.
5. *Коровин В. М.* Неустойчивость Розенцвейга в тонком слое магнитной жидкости // *Журнал технической физики*. 2013. Т. 83. С. 17–25.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАПЛИ ВОДЫ С ЖИДКОСТЬЮ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕЁ ВЯЗКОСТИ

Ю. В. Гаричева^а, И. А. Заякина^а, Т. П. Любимова^{а,б}, А. О. Иванцов^б

^аПермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

^бИнститут механики сплошных сред УрО РАН,
614013, Пермь, Академика Королева, 1

Проведено численное моделирование падения дождевых капель на свободную поверхность жидкости. Исследование связано с разработкой методик предотвращения распространения загрязняющих веществ из открытых шламонакопителей – котлованов для хранения жидких отходов. Изучено влияние вязкости на динамику капли, образование вторичных капель и брызг. Расчёты показали, что отскок капли от принимающей жидкости наблюдается только при падении в жидкости достаточно малой вязкости, таких как вода. С повышением вязкости деформация поверхности принимающей жидкости при падении капли уменьшается.

Ключевые слова: капля; вода; брызги; шламонакопитель

NUMERICAL SIMULATION OF THE INTERACTION OF A WATER DROP WITH A LIQUID DEPENDING ON ITS VISCOSITY

Y. V. Garicheva^а, I. A. Zayakina^а, T. P. Lyubimova^{а,б}, A. O. Ivantsov^б

^аPerm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

^бInstitute of Continuous Media Mechanics UB RAS,
1 Academician Korolev St., 614013, Perm

The numerical simulation of a raindrop impact on a liquid surface is carried out. The study is related to the development of methods for preventing of pollutants spread from open sludge reservoirs - pits for storage of liquid waste. The effect of viscosity on the dynamics of the drop, secondary drops and splashes is studied. Calculations are shown that the rebound of the drop from the receiving liquid is observed only for liquids of sufficiently low viscosity close to water. With the increase of the viscosity, deformations of the liquid surface substantially decrease.

Keywords: drop; water; splashes; sludge accumulator

Введение

Существуют два вида падения капель в жидкость в зависимости от их диаметра и скорости: падение с брызгами и без (рис. 1). Брызги жидкости играют важную роль как в технике – струйная печать, напыление покрытия, так и в природе – перенос микробов и вирусов из гидросферы в атмосферу [1], изменение погоды [2]. Последнее возможно при захвате брызг током воздуха в верхние слои атмосферы, где при испарении они превращаются в кристаллы,

являющиеся центрами конденсации водяного пара. Особенную опасность представляют брызги и испарения от шламонакопителей – котлованов для хранения жидких отходов (рис. 2). В нефтяных шламонакопителях хранятся такие вещества, как: ртуть, свинец, серная кислота, машинное масло. Через дожди эти вещества могут попасть в реки и почву, а затем и в организмы живых существ. Ртуть и свинец занимают первые места в группе металлов токсикантов, а также имеют свойство накапливаться в тканях организма [3]. Изучение брызг от капель дождя особенно актуально для среднего Урала, так как исследование [4] выявило рост годового количества осадков на протяжении 20-ого века. Теоретически представляется возможным сокращение обмена каплями между шламонакопителями и верхними слоями атмосферы с помощью повышения вязкости жидких отходов: либо путём добавления загущающих веществ, либо посредством вливания более лёгкой и вязкой жидкости, оседающей в верхних слоях. Цель исследования численно определить необходимое значение вязкости принимающей жидкости, при котором отсутствуют брызги при падении дождевых капель. В большинстве работ капля и бассейн представляют собой одно и то же вещество [5–7], лишь в немногих статьях капля падает в более вязкую среду [8].

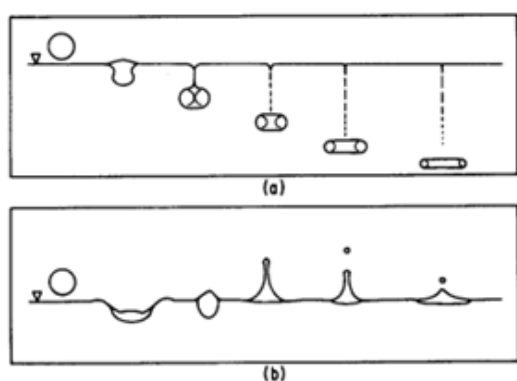


Рис. 1. Виды падения капель в жидкость



Рис. 2. Шламонакопитель "Белое море" в г. Березники

Постановка задачи и метод решения

Рассмотрим падение дождевой капли на поверхность жидкости в поле тяжести. Будем считать, что капля падает вертикально вниз, в этом случае моделирование можно проводить в осесимметричной постановке. В начальный момент времени капля диаметром 4 мм (дождевые капли имеют диаметр от 0.5 до 6–7 мм, капли большего размера разбиваются при падении на части [9]) находится в воздухе на расстоянии 3 мм от ровной поверхности бассейна с жидкостью глубиной 50 мм. Скорость капли в начальный момент времени 5 м/с (скорость падения дождевых капель не превышает 10 м/с [10]), капля имеет сферическую форму. Вязкость жидкости капли принималась равной вязкости воды $0.001003 \text{ кг/м}^*\text{с}$, плотность 998.2 кг/м^3 , плотность воздуха 1.225 кг/м^3 , вязкость – $1.7894\text{e-}05 \text{ кг/м}^*\text{с}$, вязкость принимающей жидкости варьировалась

в интервале от вязкости воды ν_w до $200\nu_w$. На неподвижных твёрдых границах бассейна ставилось условие прилипания.

Для расчётов использовался метод объема жидкости, Volume of Fluid (VOF). С помощью этого метода можно моделировать поведение двух или более несмешивающихся жидкостей, решая один набор уравнений импульса и отслеживая объемную долю каждой из жидкостей во всей области. Типичные области применения метода VOF включают прогнозирование разрушения струи, движение больших пузырьков в жидкости, движение жидкости после прорыва плотины, а также устойчивое или переходное отслеживание любой границы раздела жидкость-газ. Распределение фаз определяется значением функции объема жидкости α_q . В случае, если некоторый контрольный объем полностью заполнен одной фазой, то $\alpha_q = 0$, если другой фазой, $\alpha_q = 1$, если он содержит границу раздела, то $0 < \alpha_q < 1$.

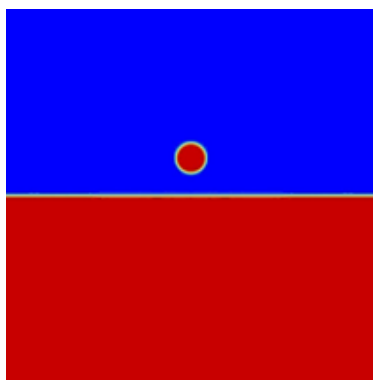


Рис. 3. Расчётная область

Метод объема жидкости позволяет рассматривать многокомпонентную среду как одну жидкость с переменной плотностью и вязкостью. В этом случае уравнение баланса импульса имеет вид:

$$\frac{d}{dt}(p\vec{v}) + \nabla \cdot (p\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla\vec{v} + \nabla(\vec{v}^T))] + p\vec{g} + \vec{F}, \quad (1)$$

где $p = \sum \alpha_q p_q$ – усреднённая объёмная плотность, \vec{v} – скорость, \vec{F} – объёмная сила, описывающая влияние поверхностного натяжения, μ – кинематическая вязкость. Уравнение неразрывности запишется в виде:

$$\frac{1}{p_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q p_q) + \nabla \cdot (\alpha_q p_q \vec{v}_q) \right] = 0. \quad (2)$$

Для численного решения задачи применялся пакет прикладных программ Ansys Fluent. В этом пакете дискретизация уравнений осуществляется с помощью метода конечных объёмов. На рисунке 3 показано распределение фаз в начальный момент времени: верхняя прямоугольная область, занятая воздухом (синяя область), нижняя прямоугольная область, занятая принимающей жидкостью (красная область), и область занятая каплей (красный круг). Использовалась равномерная прямоугольная сетка размером 100x50.

Результаты и обсуждение

На рисунке 4 показано падение капли на поверхность принимающей жидкости для жидкостей разной вязкости (1 – ν_w ; 2 – $50\nu_w$; 3 – $100\nu_w$; 4 – $150\nu_w$; 5 – $200\nu_w$). Максимальная высота всплеска наблюдается для принимающей жидкости вязкостью ν_w (вода), к 74-ой миллисекунде горизонтальная форма поверхности принимающей жидкости в этом случае восстанавливается.

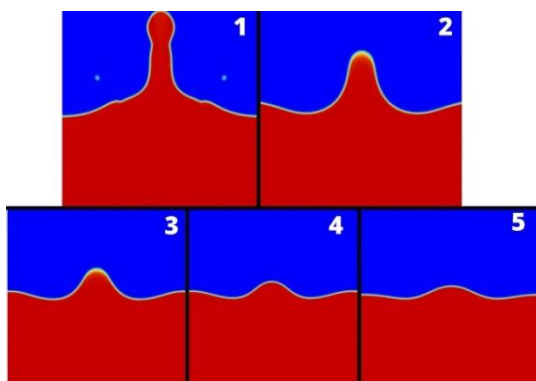


Рис. 4. Падение капли на поверхности принимающих жидкостей разной вязкости: 1 – ν_w ($t = 23$ мс), 2 – $50\nu_w$ ($t = 13$ мс), 3 – $100\nu_w$ ($t = 11$ мс), 4 – $150\nu_w$ ($t = 8$ мс), 5 – $200\nu_w$ ($t = 7$ мс)

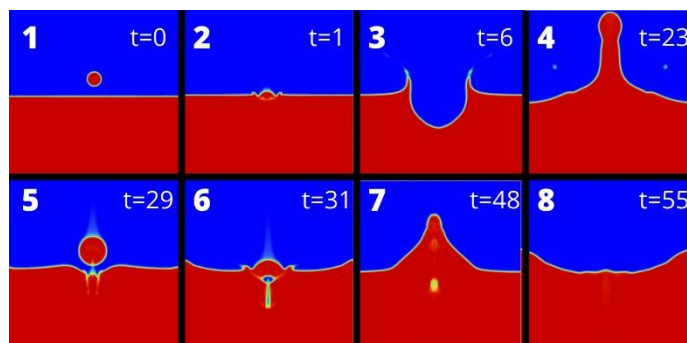
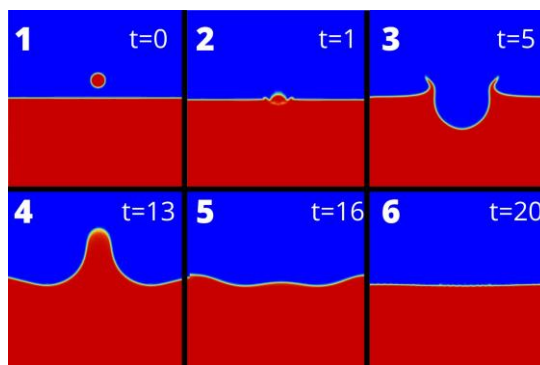


Рис. 5. Падение капли на поверхность жидкости вязкостью ν_w .
На слайдах показано время в миллисекундах

С увеличением вязкости высота всплеска жидкости и время, за которое система возвращается в равновесие, уменьшаются. Для воды максимальная высота всплеска составляет 50 мм, для жидкости с вязкостью $200\nu_w$ максимальная высота всплеска уменьшается до 5 мм, при этом уже к 9-ой миллисекунде система возвращается в равновесие.

На рисунке 6 изображено падение капли на поверхность жидкости вязкостью $50\nu_w$. Как видно отскока капель не происходит, система возвращается в равновесие через 20 миллисекунд. Для жидкостей большей вязкости также соблюдается общая тенденция к уменьшению времени восстановления и отсутствию брызг.



*Рис. 6. Падение капли на поверхность жидкости вязкостью $50\nu_w$.
На слайдах показано время в миллисекундах*

Заключение

Численно исследовано падение дождевых капель на поверхности жидкостей разной вязкости. Найдено, что при достаточно больших вязкостях образование брызг (отскок капли от поверхности принимающей жидкости) не происходит. При рассматриваемых параметрах (диаметр капли – 4 мм; расстояние до поверхности бассейна – 3 мм; начальная скорость – 5 м/с; вязкость жидкости в капле – $0.001003 \text{ кг/м}^3\cdot\text{с}$, плотность – 998.2 кг/м^3 ; плотность воздуха – 1.225 кг/м^3) отрыва капли не происходит при вязкости, в 50 раз превосходящей вязкость воды. Такой и более высокими вязкостями обладают водоглицериновые смеси. Таким образом, при добавлении водоглицериновых смесей в жидкие отходы меньшей вязкости, хранящиеся в шламонакопителях, можно предотвратить образование брызг и уменьшить обмен каплями с атмосферой.

Список литературы

1. *Fitt B. D. L., McCartney H. A., Walkalate P.* The Role of Rain in Dispersal of Pathogen Inoculum. // *Annual Review of Phytopathology*. 1989. Vol. 27. P. 241–270.
2. *Павлов Г. С.* Моделирование гидротермодинамики кучевых облаков на естественных и альтернативных ядрах конденсации в атмосфере Земли // *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. 2020. Т. 6. Вып. 80. С. 48–56.
3. *Теплая Г. А.* Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды (обзор литературы) // *Астраханский вестник экологического образования*. 2013. Т. 1. Вып. 23. С. 182–192.
4. *Шкляев В. А., Шкляева Л. С.* Оценка изменений температуры воздуха и осадков Среднего и Южного Урала в XX веке // *Вестник Челябинского государственного университета*. 2011. Т. 5. Вып. 220. С. 61–69.
5. *Michon G. J., Josserand C., Seon T.* Jet dynamics post drop impact on a deep pool // *Physical Review Fluids*. 2017. Vol. 2(2). P. 21–36.

6. *Bisighini A., Cossali G. E., Tropea C., Roisman I. V.* Crater evolution after the impact of a drop onto a semi-infinite liquid target // *Physical Review E*. 2010. Vol. 82(3). P. 36–47.
7. *Zhang L. V., Toole J., Fezzaa K., Deegan R. D.* Splashing from drop impact into a deep pool: multiplicity of jets and the failure of conventional scaling // *Journal of Fluid Mechanics*. 2012. Vol. 703. P. 402–413.
8. *Marcotte F., Michon G. J., Seon T., Josserand C.* Ejecta, corolla, and splashes from drop impacts on viscous fluids // *Physical Review Letters*. 2019. Vol. 122(1). P. 14–19.
9. *Коллектив авторов.* Большая Российская Энциклопедия. Т. 9. Большая Российская Энциклопедия, 2007. 767 с.
10. *Белоцерковский М. Ю., Белый Б. В., Беркович К. М.* Эрозионные процессы. Мысль, 1984. 256 с.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЁХФАЗНОГО ПОТОКА ГАЗ-ЖИДКОСТЬ-ТВЁРДЫЕ ЧАСТИЦЫ В УСТАНОВКЕ ПОГРУЖНОГО ГОРЕНИЯ

В. А. Демин^{a,b}, А. В. Костыря^{b,c}

^aПермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

^bПермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29

^cНаучно-производственная фирма «ТеплоЭнергоПром»,
614107, г. Пермь, Хрустальная, 10/а

Рассмотрена структура трёхфазного потока в лабораторной установке с погружной горелкой. Проанализирован модельный тепловой режим работы без образования паровой фазы. Сделан вывод о доминировании ламинарного движения в большей части рабочего пространства. Сделан вывод об определяющем значении влияния газовой фазы на структуру и временное поведение гидродинамических потоков.

Ключевые слова: погружное горение; трёхфазный поток; газ-жидкость-твёрдые частицы, гидродинамика

NUMERICAL MODELING OF GAS-LIQUID-SOLID THREE PHASE FLOW IN A LABORATORY SETUP WITH SUBMERGED COMBUSTION

V. A. Demin^{a,b}, A. V. Kostyrya^{b,c}

^aPerm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

^bPerm National Research Polytechnic University,
29 Komsomolsky Pr., 614990, Perm

^cResearch and Industrial Company «TeploEnergoProm»,
10/a Khrustal'naya St., 614107, Perm

The structure of a three-phase flow in a laboratory setup with submerged combustion is considered. The model thermal regime of operation without the formation of a vapor phase is analyzed. The dominance of a laminar motion in most of the working space is found. A conclusion is made about the decisive importance of the influence of the gas phase on the structure and temporal behavior of hydrodynamic flow.

Keywords: submerged combustion; three phase flow; gas-liquid-solid; hydrodynamics

Аппараты погружного горения (далее – АПГ) представляют собой теплообменные установки с непосредственным контактом горячих дымовых газов и нагреваемой жидкости. Наиболее частым применением АПГ в промышленности является нагрев и выпаривание водных растворов. В случае выпаривания растворов в аппарате появляется твёрдая фаза. Для устойчивой

работы выпарного АПГ необходимо обеспечить вынос твёрдой фазы из зоны кипения (где эта фаза и образуется) к выпускному патрубку. В противном случае, твёрдая фаза будет накапливаться в аппарате, что, в свою очередь, потребует его остановки и освобождения емкости. Лучшим техническим решением, обеспечивающим удаление твёрдой фазы, будет вынос частиц за счёт рациональной организации потока в аппарате. Это позволяет отказаться от использования дополнительных механических устройств, снижающих надёжность конструкции. Однако, рациональная организация потока невозможна без наличия математической модели, описывающей гидродинамическую обстановку в аппарате.

Целью настоящей работы было создание математической модели потоков в АПГ и исследование с её помощью картины гидродинамических течений в аппарате.

Для создания и отладки математической модели была проведена серия численных экспериментов с геометрическими параметрами лабораторной установки погружного горения. Установка имеет сравнительно небольшие линейные размеры (2.2:1.4:1 м), что делает её более удобным объектом для моделирования методом конечных объёмов, нежели промышленный аппарат.

Построенная в ходе настоящего исследования математическая модель имитирует трёхфазный поток газ-жидкость-твёрдое тело. Была использована модель турбулентности RNG k- ϵ , так как она даёт надёжные результаты, как при высоких, так и при низких значениях критерия Рейнольдса [1]. Каждая фаза рассматривалась как взаимопроникающий континуум. Жидкая фаза была выбрана в качестве основной, поскольку это непрерывная фаза с объемной долей жидкости более 70%. Газовая и твердая фазы рассматривались в качестве вторичных фаз. Для взаимодействия газа и жидкости была применена модель «Эйлер-Эйлер» (Eulerian-Eulerian multiphase model), для взаимодействия жидкости и твёрдых частиц – модель «Эйлер-Лагранж» (Lagrangian particle tracking model). При моделировании использовались следующие среды:

- а) жидкая фаза – вода;
- б) газовая фаза – воздух (как идеальный газ);
- в) твёрдая фаза – хлорид калия (со свойствами, заданными при 80°C).

В модели были приняты следующие граничные условия:

- а) массовый расход дымовых газов с указанием температуры – на сопле горелки;
- б) открытая граница с указанием температуры, давления и объемной доли фаз – на верхнем срезе расчётной области;
- в) массовый расход – при отборе на циркуляцию;
- г) массовый расход воды с указанием температуры – на входе линии рециркуляции в расчётную область;
- д) адиабатические стенки – все остальные границы расчётной области.

Расчётная схема установки приведена на рис. 1.

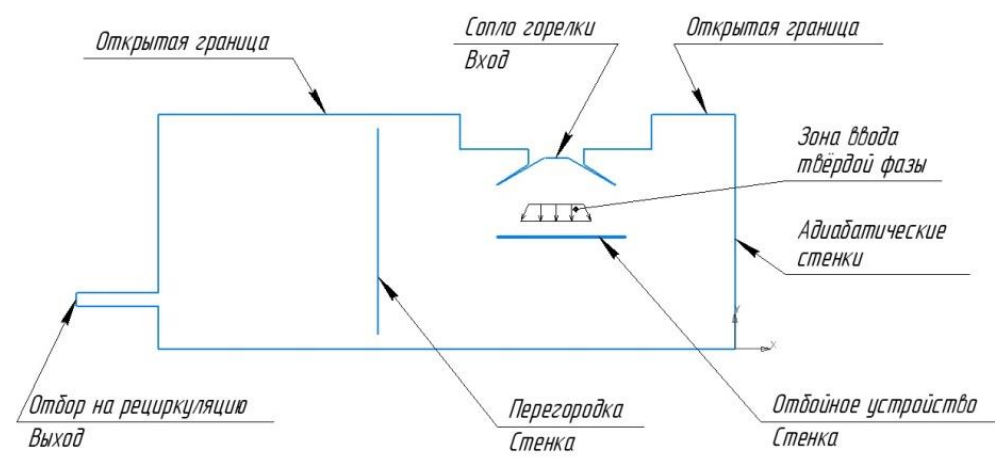


Рис. 1. Расчётная схема

Расчёты выполнялись в коммерческом пакете ANSYS CFX 2020 R2 методом конечных объёмов (FVM). Была использована физическая временная шкала с шагом 0.01 секунды.

В результате проведения численных экспериментов были получены траектории потоков фаз, поля температуры и объёмных долей.

Как видно на рис. 2, пузырьки газа на большой скорости (порядка 100 м/с) вырываются из сопла горелки, затем быстро теряют скорость, а возле отбойного устройства полностью останавливаются и начинают всплывать вверх под действием Архимедовой силы.

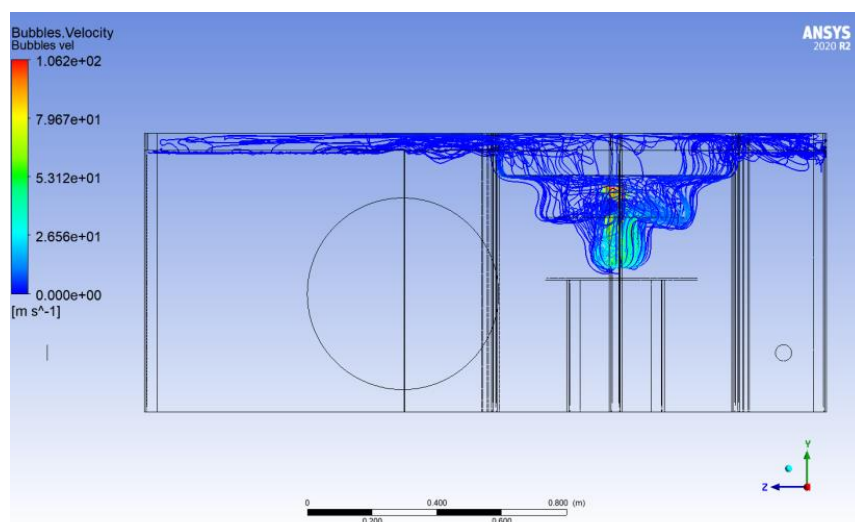


Рис. 2. Траектория пузырьков

Анализ траектории жидкости (рис. 3) показывает, что жидкость увлекается всплывающими пузырьками и движется вместе с ними вверх. При этом скорость жидкости и пузырьков сопоставимы.

На рис. 4 видно, что траектория твёрдых частиц повторяет траекторию жидкости. Можно сделать вывод о том, что движение твёрдых частиц целиком определяется движением жидкой фазы.

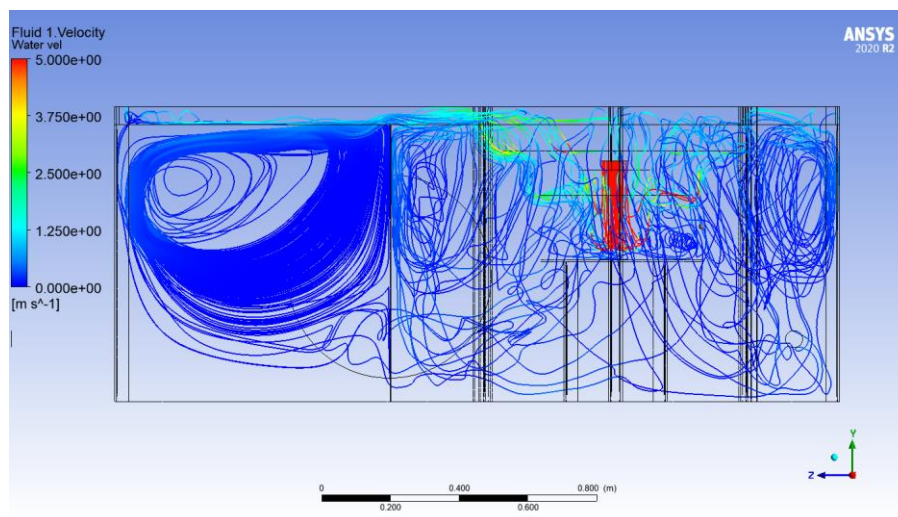


Рис. 3. Траектория жидкости

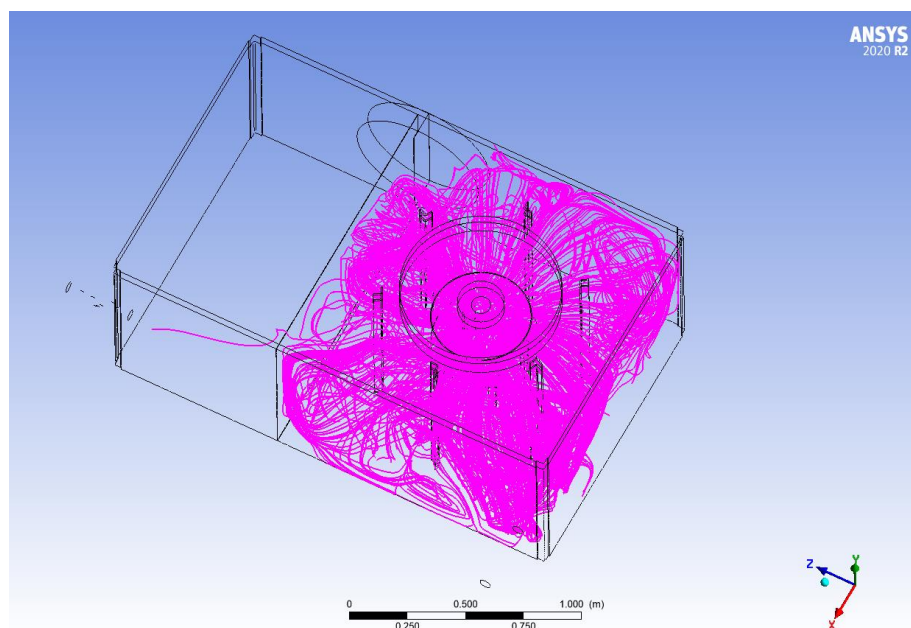


Рис. 4. Траектория твёрдых частиц

Анализ поля температуры пузырьков (рис. 5) показывает, что теплообмен между газовой и жидкой фазами происходит очень быстро. Пузырьки интенсивно отдают тепло жидкости, что соответствует известным положениям о работе АПГ [2].

Рис. 6 показывает, что энергия турбулентных пульсаций близка к нулю в большей части расчётной области. Энергия пульсаций ожидаемо высока в зоне контакта пузырьков и жидкости, однако, она быстро сходит на нет и принимает низкие значения даже в области восходящего движения жидкости. Эти данные говорят о правильности выбора модели RNG k-ε для описания движения фаз.

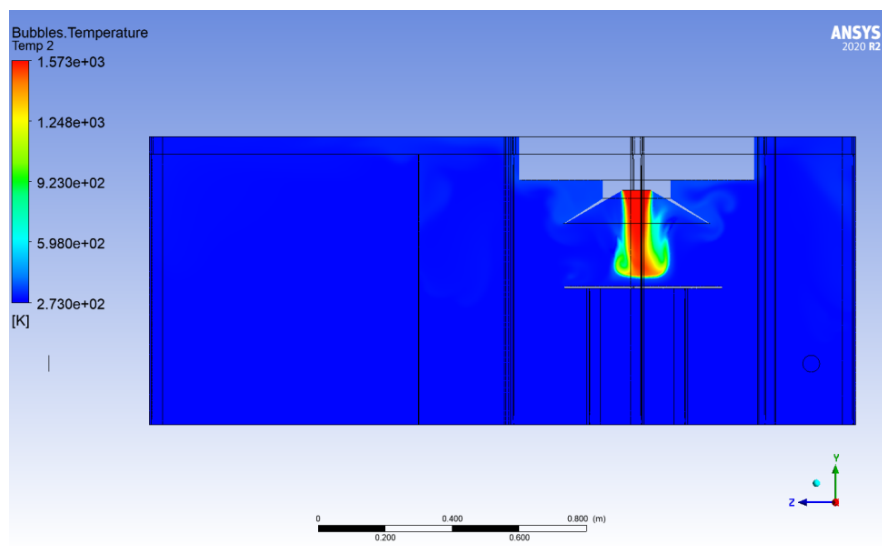


Рис. 5. Поле температуры пузырьков

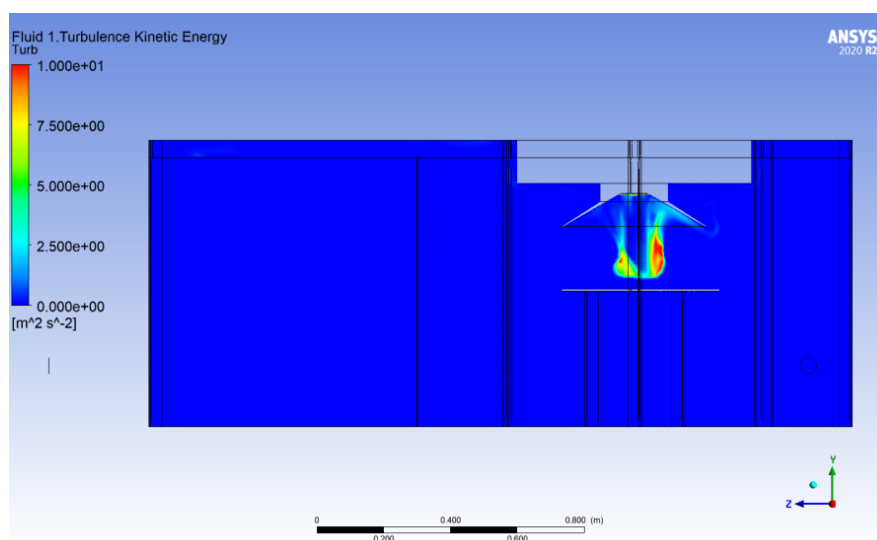


Рис. 6. Поле энергии турбулентных пульсаций

В рамках настоящей работы было проведено численное моделирование структуры потоков в лабораторной установке погружного горения. Было обнаружено доминирование ламинарного режима течения в большей части установки. Выявлено, что струя горячих дымовых газов быстро теряет свою скорость и разворачивается. При этом теплопередача от струи газов к жидкости также происходит быстро и локализуется в малом объёме между соплом горелки и отбойным устройством. Обнаружено, что движение твёрдой фазы целиком определяется течением жидкости. В то же время, сама структура потока определяется движением пузырьков. Таким образом, можно сделать вывод о главенствующей роли газовой фазы в определении гидродинамической обстановки в АПГ.

Список литературы

1. *Liu Y., Sun X., Sun Z., Zhang C., Zhu J.* Experimental and numerical studies on a bubble-induced inverse gas-liquid-solids fluidized bed // *Advanced Powder Technology*. 2021. Vol. 32 (12). P. 4496 – 4508.
2. *Алабовский А. Н., Удыма П. Г.* Аппараты погружного горения. М.: Изд-во МЭИ, 1994. 256 с.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ШАРА, ПОДВЕШЕННОГО НА СТРУНЕ С ПЕРЕМЕННЫМ НАТЯЖЕНИЕМ

К. С. Анкудинова, В. А. Семёнов

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

Методом Мейснера аналитически исследована параметрическая неустойчивость шара, подвешенного на струне с переменным натяжением. Получены границы областей неустойчивости в отсутствии и при наличии трения.

Ключевые слова: параметрическая неустойчивость; колебания

PARAMETRIC INSTABILITY OF A BALL SUSPENDED ON A STRING WITH VARIABLE TENSION

K. S. Ankudinova, V. A. Semenov

Perm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

The Meissner method was used to analytically study the parametric instability of a ball suspended on a string with variable tension. The boundaries of the regions of instability in the absence and presence of friction are obtained.

Keywords: parametric instability; oscillations

Изучение параметрического резонанса в механических колебательных системах представляет научный интерес в связи с возможной разработкой и изготовлением различных датчиков и устройств, в которых на его основе возможно измерение физических параметров при определении границ параметрической неустойчивости. В частности, в работе [1] представлены результаты экспериментального исследования параметрической неустойчивости шара, подвешенного на струне с переменным натяжением. При этом обнаружено, что традиционная область параметрической неустойчивости может быть разделена на две зоны, разделенные узкой областью устойчивого равновесия шара.

Цель настоящей работы – разработка теоретической модели и аналитическое исследование следующей задачи. Допустим, что посередине невесомой нерастяжимой струны длиной l закреплен шар массой m . Один конец струны закреплен, а другой присоединен к вибрационному устройству, которое преобразует переменный электрический ток в периодическую силу, изменяющую натяжение струны N по закону (рис. 1):

$$N = N_0 + B \cos(\Omega t), \quad (1)$$

где N_0 – натяжение струны в отсутствии вибрационного воздействия, Ω – частота вибрации, B – амплитуда вибрации.

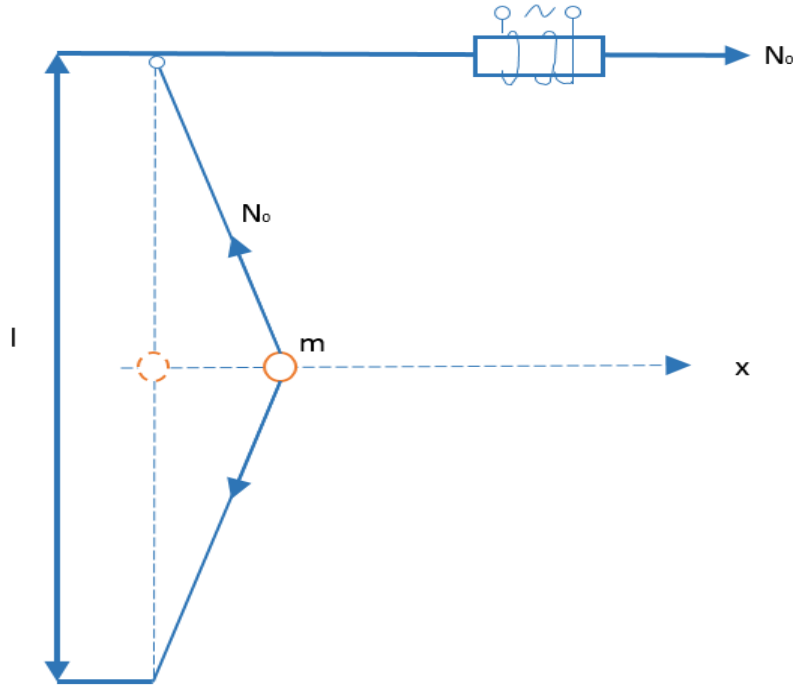


Рис. 1. Схема подвеса шара на струне

Допустим, что при движении на шар действует сила трения, пропорциональная его скорости. Запишем уравнение колебаний шара:

$$m\ddot{x} + \delta\dot{x} + \frac{x}{l}(N_0 + B \cos(\Omega t)) = 0. \quad (2)$$

где m – масса шара, δ – коэффициент трения.

Перепишем (2) в безразмерном виде:

$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + (1 + a \cos(\omega t))x = 0. \quad (3)$$

Здесь $2\beta = \delta/(m\omega_0)$, $\omega = \Omega/\omega_0$, $a = B/N_0$ – амплитуда модуляции, $\omega_0^2 = 4N_0/(ml)$ – собственная частота колебаний.

Определим области параметрической неустойчивости методом Мейснера [2, 3].

Допустим, что натяжение нити изменяется скачкообразно (рис.2). Запишем уравнения движения для областей I и II:

$$\text{I: } \ddot{x} + 2\beta\dot{x} + (1 + a)x = 0,$$

$$\text{II: } \ddot{x} + 2\beta\dot{x} + (1 - a)x = 0. \quad (4)$$

Решения уравнений (4) должны удовлетворять следующим условиям:

$$\begin{aligned} \alpha x_1(0) &= x_2(\tau), & \alpha \dot{x}_1(0) &= \dot{x}_2(\tau), \\ x_1\left(\frac{\tau}{2}\right) &= x_2\left(\frac{\tau}{2}\right), & \dot{x}_1\left(\frac{\tau}{2}\right) &= \dot{x}_2\left(\frac{\tau}{2}\right), \end{aligned} \quad (5)$$

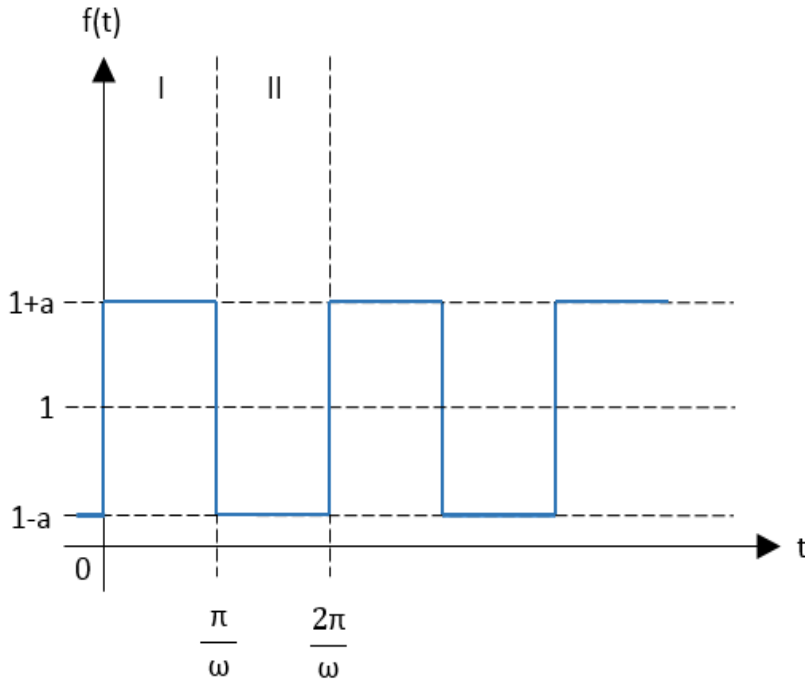


Рис. 2. Изменение натяжения нити

где $\tau = 2\pi/\omega$, параметр α – условие периодичности решений.

В случае, когда $\alpha > 1$ – колебания нарастающие, $\alpha < 1$ – колебания затухающие, а при $\alpha = 1$ имеем границу неустойчивости. Из условий (5) получена система четырех однородных уравнений, которая имеет нетривиальные решения, если ее определитель равен нулю:

$$\alpha^2 + y^2 + \alpha y \left(\left(\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{\omega_1 \omega_2} \right) \sin(\psi_1) \sin(\psi_2) - 2 \cos(\psi_1) \cos(\psi_2) \right) = 0, \quad (6)$$

где $\omega_1^2 = 1 + \alpha - \beta^2$, $\omega_2^2 = 1 - \alpha - \beta^2$, $\psi_1 = \frac{1}{2} \omega_1 \tau$, $\psi_2 = \frac{1}{2} \omega_2 \tau$, $y = e^{-\beta \tau}$.

Подставляя в (6) значения $\alpha = \pm 1$, получим:

$$\begin{aligned} \pm 2 \cos\left(\frac{1}{2} \omega_1 \tau\right) \cos\left(\frac{1}{2} \omega_2 \tau\right) - \frac{2 - 2\beta^2}{\sqrt{1 - 2\beta^2 + \beta^4 - \alpha^2}} \sin\left(\frac{1}{2} \omega_1 \tau\right) \sin\left(\frac{1}{2} \omega_2 \tau\right) = \\ = (e^{-\beta \tau} + e^{\beta \tau}). \end{aligned} \quad (7)$$

Данное выражение имеет только три безразмерных параметра: β , α , τ .

Допустим, что $\beta = 0$ (отсутствие трения). В этом случае из (7) имеем:

$$\begin{aligned} \pm 2 \cos\left(\frac{1}{2} \tau \sqrt{1 + \alpha}\right) \cos\left(\frac{1}{2} \tau \sqrt{1 - \alpha}\right) \mp \\ \mp \frac{2}{\sqrt{1 - \alpha^2}} \sin\left(\frac{1}{2} \tau \sqrt{1 + \alpha}\right) \sin\left(\frac{1}{2} \tau \sqrt{1 - \alpha}\right) = 2. \end{aligned} \quad (8)$$

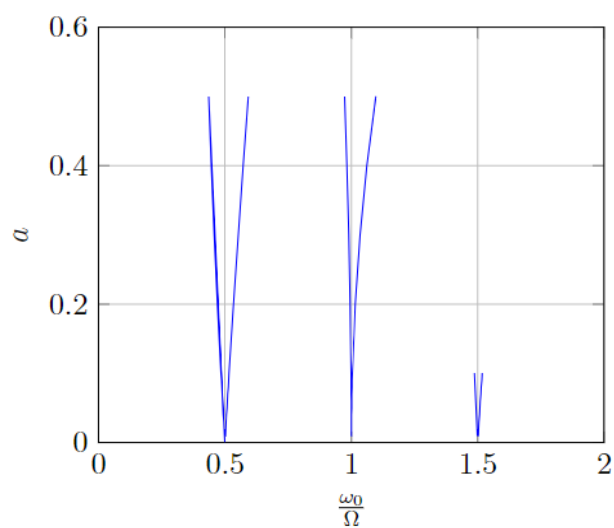
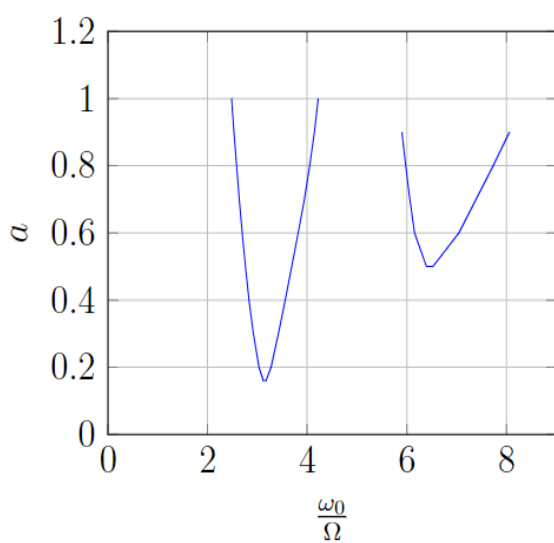
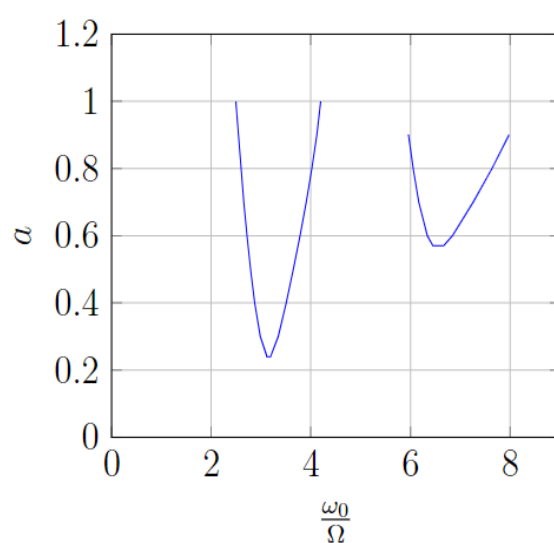


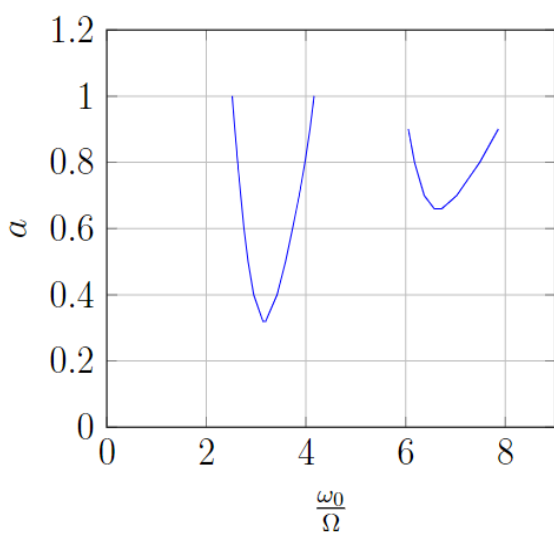
Рис. 3. Границы областей параметрической неустойчивости при $\beta = 0$



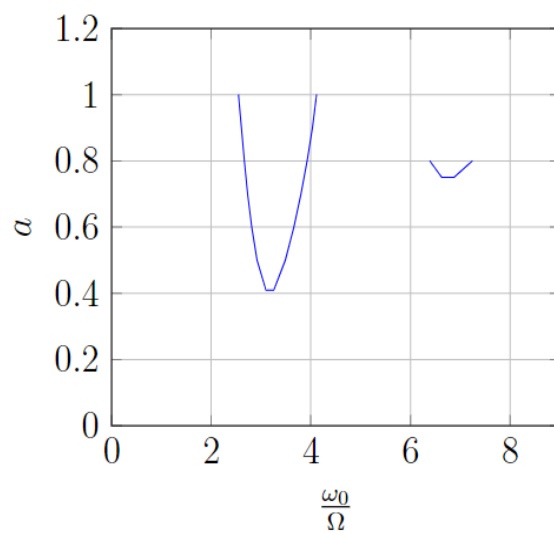
$\beta = 0.05$



$\beta = 0.075$



$\beta = 0.1$



$\beta = 0.125$

Рис. 4. Границы областей параметрической неустойчивости при $\beta \neq 0$

Из соотношения (8), с помощью программного пакета Maple, найдены границы неустойчивости (рис. 3).

В случае, когда $\beta \neq 0$ из (7) получим границы параметрической неустойчивости, при наличии трения, которые при разных значениях β представлены на рис. 4.

При наличии трения β происходит уменьшение области устойчивости, а при достаточно большом трении границы пропадают совсем. Трение приводит к тому, что возникновение параметрического резонанса происходит при пороговом значении a , которое растет с увеличением трения. На рис. 5 приведена зависимость минимальной амплитуды модуляции, при которой возникает неустойчивость, от коэффициента трения.

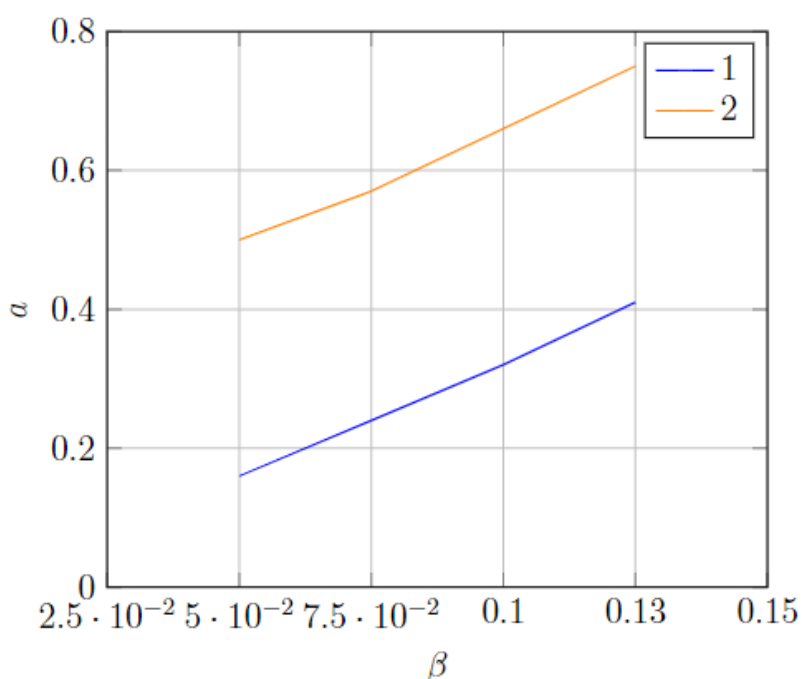


Рис. 5. Зависимость минимальной амплитуды модуляции a , при которой возникает неустойчивость, от значения коэффициента β

Полученные результаты не в полной мере описывают результаты эксперимента [1], поэтому необходимо уточнение теоретической модели.

Список литературы

1. Семёнов В. А. Параметрическая неустойчивость погруженного в жидкость шара, подвешенного на струне с переменным натяжением // Прикладная механика и техническая физика. 2002. Т.43. №3. С.85–87.
2. Стрелков С. П. Введение в теорию колебаний: учебник. СПб.: Издательство «Лань», 2005. 440 с.
3. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М: Наука, 1972. 392 с.

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ МИКРОПУЗЫРЬКОВ В РАСТВОРАХ SDS ВБЛИЗИ ТОЧКИ МИЦЕЛЛООБРАЗОВАНИЯ

И. А. Фаттахова^a, К. А. Рыбкин^{a,b}, Т. П. Любимова^{a,b}, М. О. Кучинский^{a,b}

^aПермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

^bИнститут механики сплошных сред УрО РАН,
614013, Пермь, Академика Королева, 1

В работе описаны причины помутнения водных растворов додецилсульфата натрия (sodium dodecyl sulfate, SDS) с концентрацией 3 ммоль/л при генерации воздушных микропузырьков с использованием мелкодисперсной, кварцевой, гидрофильной мембраны. Выделено 2 основные причины помутнения раствора: образование большого количества микропузырьков и образование мицелл SDS.

Ключевые слова: микропузырьки; SDS; мицеллы

FEATURES OF MICROBUBBLE GENERATION IN SDS SOLUTIONS NEAR THE POINT OF MICELLE FORMATION

I. A. Fattakhova^a, K. A. Rybkin^{a,b}, T. P. Lyubimova^{a,b}, M. O. Kuchinskiy^{a,b}

^aPerm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

^bInstitute of Continuous Media Mechanics UB RAS,
1 Academician Korolev St., 614013, Perm

The research work describes the causes of turbidity of aqueous solutions of SDS (sodium dodecyl sulfate) with a concentration of 3 mmol/l during the generation of air microbubbles using fine, quartz, hydrophilic membrane. There are 2 main causes of turbidity of the solution: the formation of a large number of microbubbles and the formation of SDS micelles.

Keywords: microbubbles; SDS; micelles

Введение

Генерация микропузырьков используется для решения различных задач в микробиологии, фармацевтической промышленности, горно-обогатительной промышленности (флотационное обогащение руд) [1]. Одним из популярных способов генерации микропузырьков является применение трубки Вентури, однако в связи с высокой энергозатратностью этого метода идет поиск новых способов получения микропузырьков. Например, применение ультразвука [2] или мембранный барботер [3] могут быть использованы для генерации микропузырьков.

Мембранный метод получения пузырьков по сравнению с другими методами имеет массу преимуществ как с точки зрения

энергоэффективности, так и диапазона размеров получаемых пузырьков. Размеры генерируемых мембранным методом пузырьков зависят от того насколько хорошо жидкость смачивает поверхность мембраны. Поэтому совместное использование кварцевой мембраны и водного раствора SDS дополнительно гидрофилизует поверхность мембраны, а значит и уменьшает размер генерируемых пузырьков. Увеличение концентрации ПАВ в воде при определенных условиях может приводить к помутнению раствора вследствие высаливания [4]. В этом случае затрудняется регистрация образующихся воздушных пузырьков.

Цель работы состоит в исследовании причин помутнения раствора SDS с концентрацией 3 ммоль/л в задаче генерации микропузырьков с использованием асимметрично смачиваемой мембраны.

Описание экспериментальной установки и методики обработки данных

Генерация пузырьков

В работе использовалась кювета в форме параллелепипеда с размерами $300 \times 30 \times 500 \text{ мм}^3$, которая сделана из акрила толщиной 3 мм. Для генерации пузырьков использовалась асимметрично смачиваемая мембрана, водяной насос, воздушный компрессор (рис. 1). Насос создавал сдвиговый поток жидкости, срывающий с поверхности мембраны воздушные пузырьки, таким образом происходила генерация пузырьков.

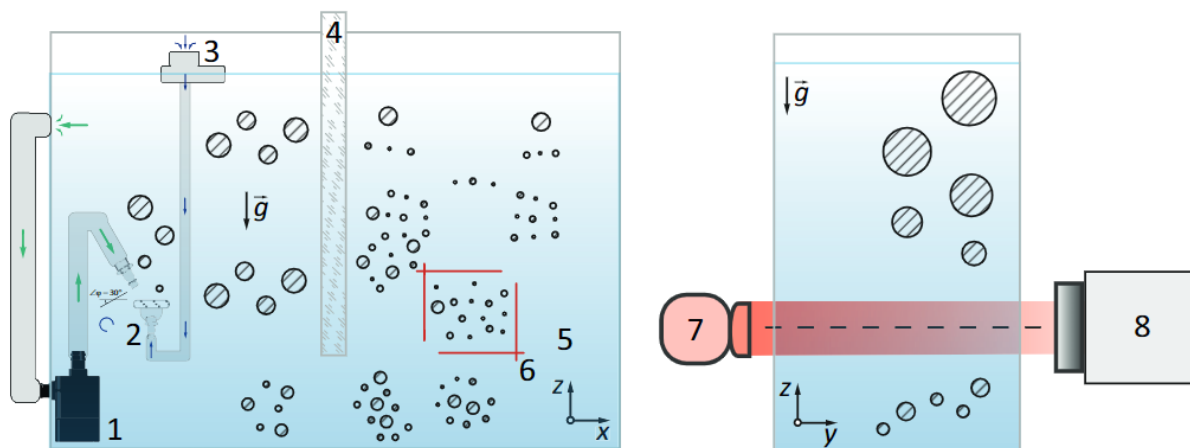


Рис. 1. Схема установки: 1) водяной погружной насос; 2) мелкодисперсная мембрана; 3) воздушный компрессор; 4) оргстеклянный ограничитель; 5) кювета размерами $300 \times 30 \times 500 \text{ мм}^3$; 6) область съёмки; 7) коллимированный источник света; 8) высокоскоростная камера с телецентрической оптикой

Регистрация пузырьков

Для регистрации пузырьков использовалась высокоскоростная камера Basler A504kc, оснащенная телецентрическим макрообъективом, с контрольным источником света. Оптическая система позволяла измерять

размер пузырьков вне зависимости от расстояния между ними и матрицей камеры. Минимальный размер видимого пузырька для камеры – 32 мкм. Пузырьки в объеме жидкости имели четкие границы, а на стенках кюветы получались размытыми, так как глубина резкости составляла 2 см.

Методика анализа состава раствора

Для экспериментов использовалась дистиллированная вода, водопроводная вода, растворы SDS с концентрацией 0.5 – 12.0 ммоль/л. Температура воды перед началом эксперимента замерялась и находилась в диапазоне 20 – 22°C. Водные растворы ПАВ приготавливались непосредственно перед проведением эксперимента. Объем воды в кювете 1750 мл, замерялся мерным стаканом.

Определение ККМ растворов SDS в дистиллированной воде

Критическая концентрация мицеллообразования растворов SDS определена по 2 методам: кондуктометрическому и висячей капли.

Кондуктометрическое определение: приготавливались растворы SDS различной концентрации 1.25 – 12.0 ммоль/л, измерялась удельная электропроводность раствора с помощью кондуктометра.

Методом висячей капли определялось поверхностное натяжение растворов SDS различной концентрации, при изучении которого обнаружили ККМ SDS.

Результаты и обсуждение экспериментов

В работе показано, что размеры генерируемых пузырьков с использованием кварцевой мембраны уменьшаются при повышении концентрации SDS (рис. 2) Так же на гистограмме распределения количества пузырьков от их диаметра (рис. 2) обнаружено, что при увеличении концентрации SDS наблюдается рост количества пузырьков. Это происходит вследствие гидрофилизации поверхности мелкодисперсной мембраны раствором SDS, поэтому мембрана становится асимметрично смачиваемой. Диаметр генерируемых пузырьков становится меньше, чем в чистой воде и их количество увеличивается. На графике (рис. 2) можно заметить, что при концентрации 2.5 ммоль/л диаметр пузырьков настолько маленький, что их регистрация затруднена, при дальнейшем увеличении концентрации SDS происходит помутнение раствора и съемка становится невозможна.

Помутнение связано с образованием большого количества микропузырьков или мицелл в растворе. Образование микропузырьков обусловлено, тем что увеличение концентрации SDS уменьшает размеры парогазовых пузырьков и растет их количество, но из-за ограниченных возможностей камеры их съемка невозможна. Однако многие ПАВ образуют мицеллы при достижении определенной концентрации, что может вызывать помутнение раствора, поэтому была определена критическая концентрация

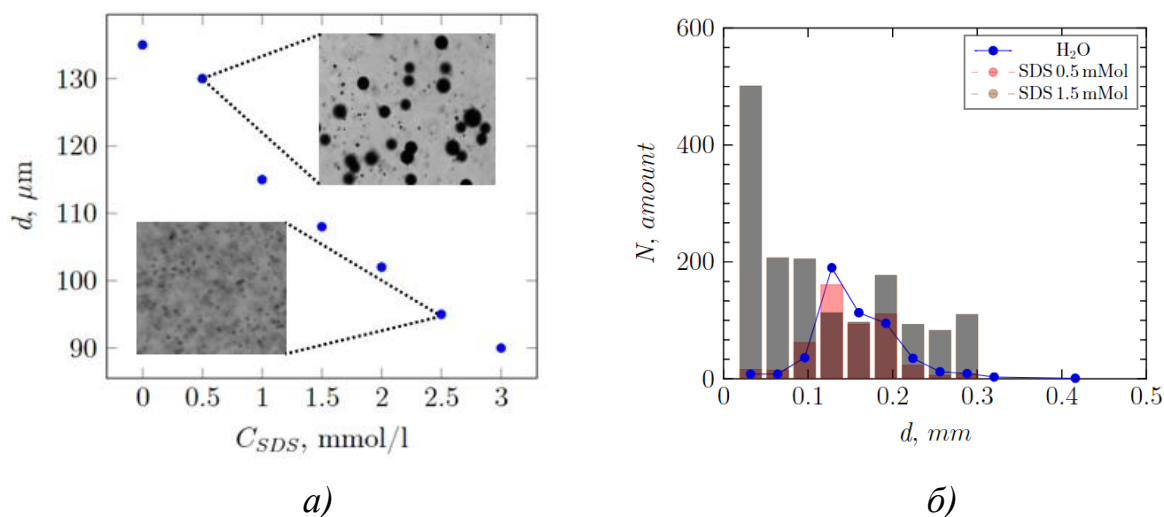


Рис. 2. а) График зависимости диаметра пузырьков в мкм от концентрации SDS в ммоль/л, пунктиром от точек приведены фотокадры соответствующих экспериментов. б) Гистограмма распределения количества пузырьков в штках от диаметра пузырька в мм для воды и растворов SDS разной концентрации

мицеллообразования растворов SDS в дистиллированной воде двумя методами: висячей капли и кондуктометрически.

В кондуктометрическом методе замеряется удельная электропроводность растворов SDS, и из рис. 3а определена ККМ, которая составила 8.0 ммоль/л, так как при большей концентрации график не изменяется.

В методе висячей капли определяется поверхностное натяжение, которое с увеличением концентрации SDS падает, и на рис. 3б видно, что при $\ln(C(\text{SDS}))$ больше 2 поверхностное натяжение раствора перестает меняться. Это происходит при концентрации 7.5 ммоль/л. Таким образом, критическая концентрация мицеллообразования раствора SDS в дистиллированной воде составила 7.5 ± 0.5 ммоль/л.

Для экспериментов с генерацией парогазовых пузырьков использовалась водопроводная вода, в которой присутствуют ионы различных солей. В данной воде наблюдалось помутнение растворов при концентрации SDS ниже ККМ, можно предположить, что ККМ SDS смещается в сторону более низких концентраций из-за процессов высаливания солей из воды и мицеллообразования при концентрации SDS 3 ммоль/л.

Заключение

В работе изучено влияние концентраций SDS на количество и размеры воздушных пузырьков, возникающих в жидкости при использовании кварцевой, гидрофильной, мелкодисперсной мембраны. При увеличении концентрации SDS в воде размеры парогазовых пузырьков уменьшаются

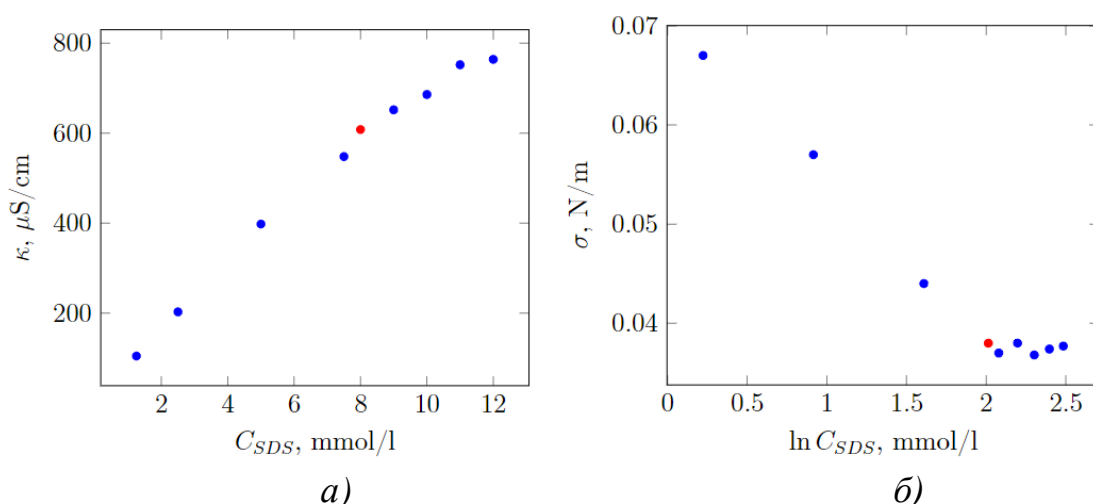


Рис. 3. Графики зависимостей: а) удельной электропроводности от концентрации SDS; б) поверхностного натяжения от концентрации ($\mu\text{S}/\text{cm}$ – $\text{мкСм}/\text{см}$, N/m – $\text{Н}/\text{м}$, mmol/l – $\text{ммоль}/\text{л}$)

и увеличивается их количество.

Обнаружено, что при увеличении концентрации SDS до 3 ммоль/л раствор мутнеет и съемка в этой области невозможна. Можно предположить, что это происходит из-за образования микропузырьков, так как при увеличении концентрации SDS размеры генерируемых пузырьков асимметрично смачиваемой мембраной уменьшаются, а их количество растет. Помутнение раствора так же возникает из-за процессов высаливания и мицеллообразования. Эксперименты в дистиллированной воде показали, что достижение ККМ SDS происходит при концентрации 7.5 ± 0.5 ммоль/л. Но для генерации пузырьков использовалась водопроводная вода, в которой содержались различные ионы солей. Таким образом при использовании воды, содержащей соли жесткости, значение ККМ SDS смещалось в сторону меньшего значения и происходило высаливание и мицеллообразование при концентрации SDS 3 ммоль/л. Для разделения вклада микропузырьков и мицелл в помутнение раствора требуются дополнительные исследования выходящие за рамки настоящей работы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-69-46066).

Список литературы

1. Xie B., Zhou C., Huang X., Chen J. et al. Microbubble generation in organic solvents by porous membranes with different membrane wettabilities // Industrial Engineering Chemistry Research. 2021. Vol. 60 (23). С. 8579–8587.
2. Lyubimova T., Rybkin K., Fattalov O., Kuchinskiy M., Filippov L. Experimental study of temporal dynamics of cavitation bubbles selectively attached to the solid surfaces of different hydrophobicity under the action of ultrasound // Ultrasonics. 2021. Vol. 117. 106516.

3. *Tao X., Liu Y., Jiang H., Chen R.* Microbubble generation with shear flow on large-area membrane for fine particle flotation // *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. 2019. Vol. 145. 107671.
4. *Елохов А. М.* Феномен точки помутнения в растворах неионных оксиэтилированных поверхностно-активных веществ и водорастворимых полимеров (обзор) II. Влияние неорганических солей на точку помутнения // *Вестник Пермского университета. Серия: Химия*. 2017. Т. 7. №. 2. С. 167–186.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДРЕЙФОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА

А. А. А. Аль-Балуши^{a,b}, А. А. Журавлев^{a,b}, И. Л. Вольхин^{a,b}

^aПермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

^bПАО Пермская научно-производственная приборостроительная компания,
614990, Пермь, 25 Октября, 106

Несмотря на множество вариантов решения, проблема защиты металлов от коррозии продолжает оставаться актуальной. Одним из основных способов снижения коррозии является метод наложения внешнего тока. Для его реализации нужен датчик электрического потенциала. Разработан пассивный оптический датчик электрического потенциала. Преимущество по сравнению с обычными, экономичность, отсутствие металлических частей. Разработана математическая и физическая модели датчика. Создан прототип пассивного датчика электрического потенциала на основе интегрального интерферометра Майкельсона. Исследованы его основные характеристики.

Ключевые слова: электрический потенциал; оптический датчик; модулятор Майкельсона

TEMPERATURE DRIFTS STUDY OF ELECTRICAL POTENTIAL FIBER-OPTIC SENSOR

A. A. A. Al-Balushi^{a,b}, A. A. Zhuravlev^{a,b}, I. L. Volhin^{a,b}

^aPerm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

^bPAO Perm Scientific Production Instrument Company,
106 25 Oktyabrya St., 614990, Perm

Despite the many solutions, the problem of protecting metals from corrosion continues to be relevant. One of the main ways to reduce corrosion is the method of applying an external current. For its implementation, electric potential sensor is needed. Passive optical electric potential sensor has been developed. Advantage over conventional ones, economical, no metal parts. Mathematical and physical models of sensor have been developed. Prototype of passive electrical potential sensor based on the integrated Michelson interferometer has been created. Its main characteristics are investigated.

Keywords: electric potential; optical sensor; Michelson modulator

Проблема защиты металлов от коррозии была и остается актуальной для широкого круга изделий работающих в агрессивных средах. Современная защита металлов от коррозии базируется на следующих методах: повышение химического сопротивления конструкционных материалов, изоляция поверхности металла от агрессивной среды, понижение агрессивности производственной среды, снижение коррозии наложением внешнего тока (электрохимическая защита). Эти методы можно разделить на две группы.

Первые два метода обычно реализуются до начала производственной эксплуатации металлоизделия (выбор конструкционных материалов и их сочетаний еще на стадии проектирования и изготовления изделия, нанесение на него гальванических и иных защитных покрытий). Последние два метода, напротив, могут быть осуществлены только в ходе эксплуатации металлоизделия (пропускание тока для достижения защитного потенциала, введение в технологическую среду специальных добавок-ингибиторов) и не связаны с какой-либо предварительной обработкой до начала использования. При применении первых двух методов не могут быть изменены состав сталей и природа защитных покрытий данного металлоизделия при непрерывной его работе в условиях меняющейся агрессивности среды. Вторая группа методов позволяет при необходимости создавать новые режимы защиты, обеспечивающие наименьшую коррозию изделия при изменении условий их эксплуатации. Например, на разных участках трубопровода в зависимости от агрессивности почвы можно поддерживать различные плотности катодного тока или для разных сортов нефти, прокачиваемой через трубы данного состава, использовать разные ингибиторы.

Электрохимическая защита основана на том, что, сдвигая потенциал металла пропусканием внешнего тока, можно изменять скорость его коррозии.

Оптический пассивный датчик необходим для измерения разности потенциалов между анодом и защищаемым объектом (трубопроводом) электрохимической защиты, чтобы сохранить необходимый уровень потенциала для замедления коррозии. Оптические датчики обладают следующими преимуществами относительно классических: обладают меньшим током утечки за счет большего входного сопротивления, более устойчивы к коррозии, полностью пожаро- и взрывобезопасны и не требуют собственного электропитания [1].

Измерение электрического потенциала происходит косвенным методом. Чувствительным элементом датчика является интерферометр Майкельсона, собранный на основе фотонно-интегральной схемы рис. 1. На подложке монокристалла ниобата лития изготовлены: входной канальный световод, Y-разветвитель и два оптических канала представляющих собой плечо 1 и плечо 2 интерферометра Майкельсона. Отражающими зеркалами являются торцы канальных волноводов. Сверху на монокристалл напылены три электрода средний из которых соединен с землей, а на верхний и нижний электрически соединенные между собой подается исследуемое напряжение U .

Оптический сигнал подается на оптический вход и проходя через Y-разветвитель делится на две части одинаковые по амплитуде. Сигналы по верхнему и нижнему волноводам доходят до зеркал и отражаются назад. При вторичном прохождении через Y-разветвитель сигналы складываются, а длина волны не изменяется. При приложении к электродам разности потенциалов U показатели преломления верхнего и нижнего волноводов изменяются в одном увеличиваются в другом уменьшаются за счет

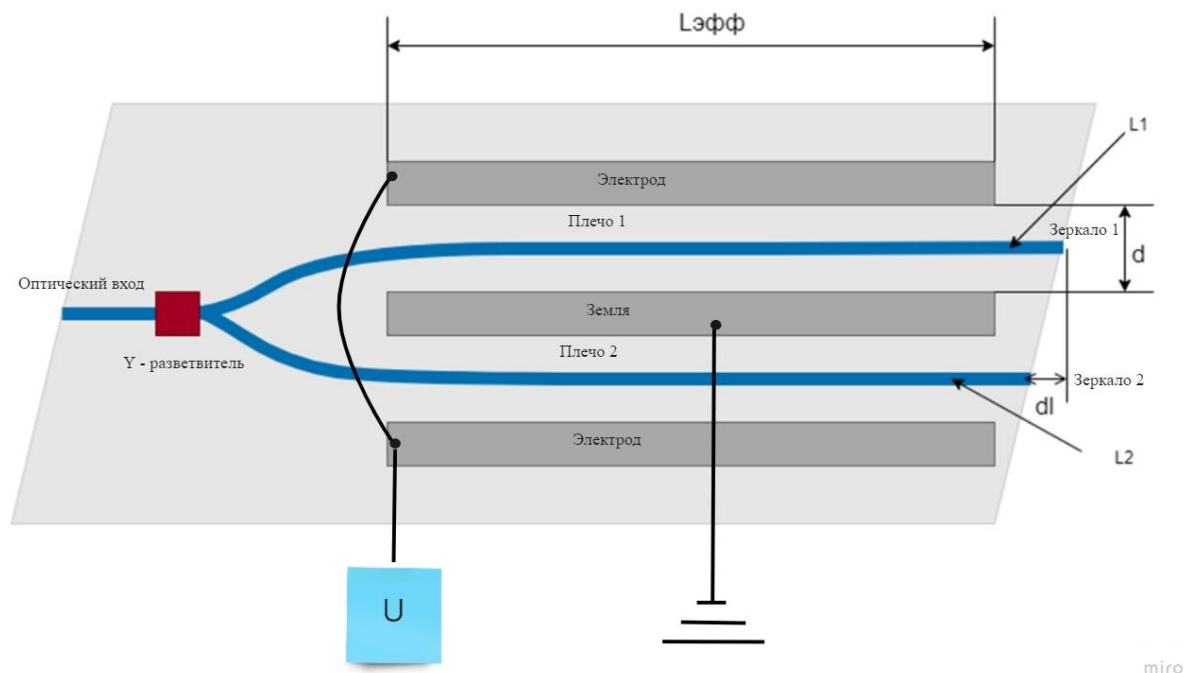
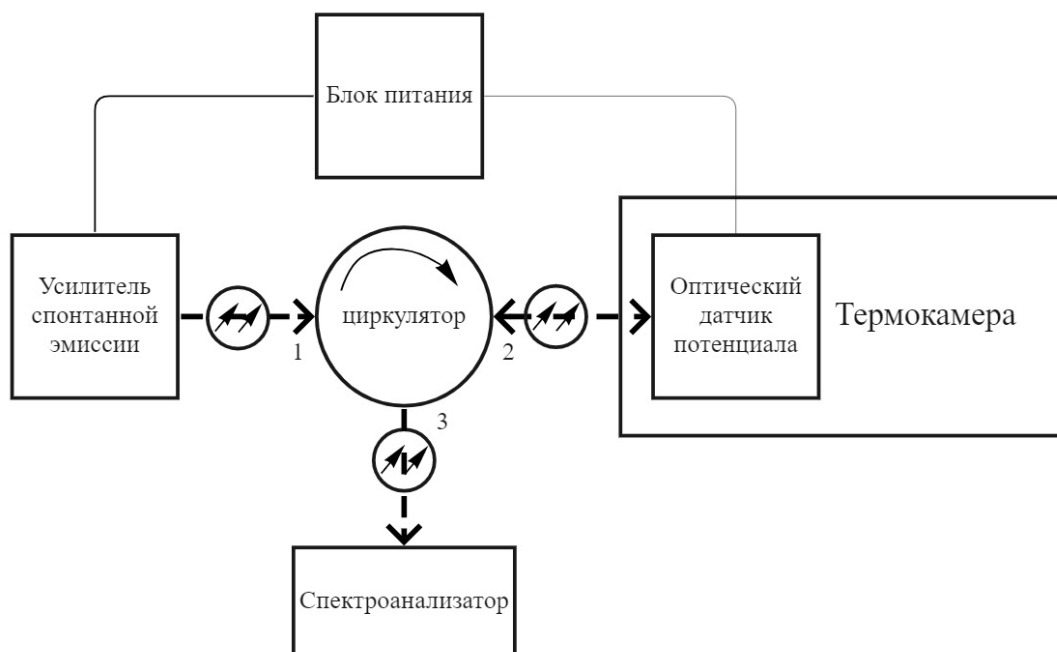


Рис. 1. Интерферометр Майкельсона на основе фотонно-интегральной схемы

электрооптического эффекта [2]. При сложении отраженных сигналов возникает сдвиг рабочей длины волны $\lambda_{\text{раб}}$ пропорциональный приложенному напряжению U .

Измерение напряжения с помощью волоконно-оптического датчика электрического потенциала производится следующим образом: Строится калибровочный график зависимости $U=f(\lambda_{\text{раб}})$, измеряется $\lambda_{\text{раб}}$ и по графику определяется электрический потенциал U .

Температурные дрейфы так же изменяют $\lambda_{\text{раб}}$, что является одним из основных факторов возникновения погрешностей измерения электрического потенциала оптическим датчиком, изготовленным на основе интерферометра Майкельсона [3]. Для исследования температурной зависимости рабочей длины волны оптического датчика потенциала собрана экспериментальная установка, представленная на рис. 2. Источником оптического излучения является усилитель спонтанной эмиссии мощностью непрерывного излучения 7 дБм на длине волны $\lambda = 1549$ нм с шириной полосы генерации на уровне половинной мощности $\Delta\lambda_{\text{ген}} = 50$ нм. Выбор источника обусловлен тем, что предполагаемый сдвиг рабочей длины волны датчика вследствие изменения электрического потенциала и паразитного температурного дрейфа не превышает ± 10 нм относительно центральной длины волны. Потери мощности в оптическом тракте не более 30 дБм. Сигнал с широким спектром с выхода усилителя спонтанной эмиссии через оптическое волокно поступает на вход 1 циркулятора и с выхода 2 – на оптический вход датчика потенциала. Отраженный от датчика сигнал с узким спектром $\Delta\lambda_{\text{отр}} = 3$ нм возвращается назад во вход 2 циркулятора и с входа 3 поступает на спектроанализатор



miro

Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Yokogawa AQ6370D. Циркулятор служит для развязки падающего и отраженного сигналов и защищает усилитель спонтанной эмиссии от повреждения за счет ослабления отражённого сигнала на входе 1 на 40 дБ. Блок питания служит источником энергии усилителя спонтанной эмиссии и эталонным источником контролируемого напряжения. Для изменения температуры оптический датчик потенциала размещен в термокамере Еспрес.

Проведены эксперименты по определению температурных дрейфов длины волны отражённого излучения оптического датчика потенциала, результаты которых представлены на рис. 3. При изменении температуры от -40 до $+40$ С длина волны изменялась в пределах от 1532 нм до 1548 нм. На рисунке приведены доверительные интервалы измерений. Анализ графика показал, что в пределах доверительных интервалов зависимость рабочей длины волны от температуры может быть представлена в виде функции

$$y = 0.1908 x^2 - 582.89 x + 445121.$$

Полученная зависимость позволяет ввести коррекцию ошибок возникающих в следствии температурных дрейфов и определить истинное значение электрического потенциала.

В результате выполнения работы получена зависимость рабочей длины волны пассивного оптического датчика электрического потенциала на основе интегрального интерферометра Майкельсона от температуры. Зависимость может быть использована при коррекции показаний датчика в условиях



Рис.3. График зависимости длины волны от температуры

эксплуатации и нахождения истинного значения разности потенциалов между защищаемой от коррозии поверхности металла и анодом.

Список литературы

1. Шарапов В. М., Полищук Е. С., Кошевой Н. Д., Ишанин Г. Г., Минаев И. Г., Совлуков А. С. Датчики: Справочное пособие. М.: Техносфера, 2012. 624 с.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Оптика. Т. IV. М.: Наука, 1980. 752 с.
3. Ход лучей в интерферометре Майкельсона. Энциклопедия по машиностроению [Электронный ресурс]. URL: <https://mash-xxl.info/info/238147/> (дата обращения: 08.08.2022).

РАЗРАБОТКА МИКРОПРОЦЕССОРНОГО ТЕРМОСТАТА

А. А. Андреева, Д. И. Гнездилова, А. В. Манцуоров

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

В данной публикации рассматривается процесс проектирования и разработки микропроцессорного термостата на базе микроконтроллера STM32F303VCT6 с использованием программно реализованного ПИД-регулятора с целью управления температурным режимом нагревательного элемента. Подобный прибор может быть использован в исследованиях температурной зависимости индивидуальных характеристик радиоэлектронных компонентов.

Ключевые слова: ПИД - регулятор

DEVELOPMENT OF A MICROPROCESSOR THERMOSTAT

A. A. Andreeva, D. I. Gnezdilova, A. V. Mantsurov

Perm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

The publication uses the process of designing and developing a microprocessor thermostat based on the STM32F303VCT6 microcontroller using a software-implemented PID controller with a heating element temperature control function. The landing of the device can be used depending on the temperature, taking into account the characteristics of radio-electronic components.

Keywords: PID controller

Термостаты контролируют температурные режимы устройств с помощью системы управления и регулярно применяется в отраслях, связанных с охлаждением и нагревом. Прежде всего, устройства термостатов важны для систем кондиционирования, отопления и различных бытовых приборов. Термостат делает их использование удобным, так как пропадает необходимость вручную контролировать и настраивать приборы, также становится возможным достичь экономичного потребления ресурсов.

Чаще всего, термостаты представляют собой электронный блок с алгоритмом стабилизации и термокамеру. Размер термокамеры, диапазон регулируемых температур и точность стабилизации являются основными критериями термостатов, которые определяют его стоимость. Для большинства температурных исследований требуются термокамеры средних габаритов. Однако термостат даже с малым размером рабочей камеры может стоить достаточно дорого, из-за чего приобретение такого устройства для проведения простых исследований оказывается экономически необоснованно. Таким образом, принято решение разработать собственный микропроцессорный термостат с миниатюрной термокамерой.

Принцип работы нагревательного термостата: встроенный в термокамеру датчик измеряет текущую температуру и, если она не соответствует требуемой, то регулятор корректирует мощность, передаваемую от источника питания в нагревательный элемент. Таким образом, исчезает необходимость самостоятельно следить за температурой устройства и заниматься его ручной настройкой.

Целью данной работы является разработка микропроцессорного термостата с цилиндрической керамической термокамерой.

Разработанный прибор состоит из нескольких частей, которые находятся под управлением микроконтроллера STM32F303VCT6. Микроконтроллер выполняет важнейшие функции, такие как:

- вывод информации на дисплей;
- считывание данных с переключателя;
- формирование ШИМ-сигнала;
- считывание температуры с датчика;
- расчёт ПИД регулятора.

Самим же нагревательным элементом является керамический резистор. Ниже приведена функциональная схема термостата (рис. 1).

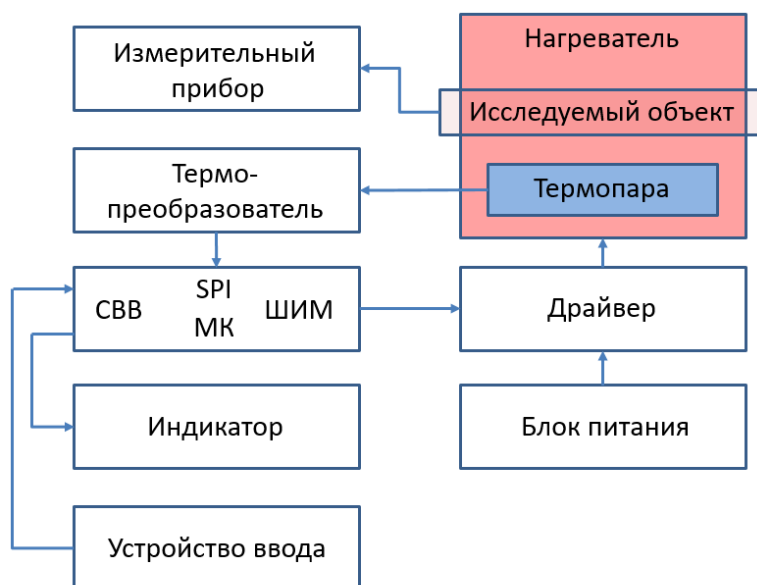


Рис. 1. Функциональная схема разработанного прибора

Опишем её элементы:

- **Микроконтроллер** – STM32F303VCT6.
- **Индикатор** – четырёхразрядный семисегментный светодиодный индикатор CA56–12EWA, который подключен к микроконтроллеру. Необходим для вывода текущего значения температуры.
- **Устройство ввода** – трехразрядный двоично-десятичный переключатель, он необходим для ввода в систему информации о величине температуры стабилизации.

- **Драйвер** – модуль HW532, состоящий из транзисторной оптопары и мощного n-канального полевого транзистора с изолированным затвором. Драйвер выполняет роль ключевого регулятора мощности, передаваемой от источника питания к нагревателю. Величина мощности определяется ШИМ-сигналом микроконтроллера.
- **Нагреватель** – мощный цилиндрический резистор номиналом 47 Ом со сквозным внутренним каналом. Служит непосредственно в качестве термокамеры и нагревательного элемента.
- **Термопреобразователь** – модуль преобразователя сигнала термопары MAX6675. Измеряет ЭДС термопары с помощью аналого-цифрового преобразователя. Микросхема MAX6675 обладает 12 разрядным АЦП, что определяет точность измерения данного модуля – 0.25°C. Для подключения модуля MAX6675 к микроконтроллеру используется интерфейс SPI.
- **Блок питания** – лабораторный источник питания Wanptek DPS605U, представляет собой источник регулируемого постоянного тока. Блок питания является источником энергии нагревательного элемента.

Программное обеспечение для микроконтроллера STM32 разработано в среде программирования СооСоx на языке Си. В программе реализована работа с системой ввода/вывода, таймерами, обработчиками прерываний и алгоритм ПИД-регулятора.

Алгоритм работы программы описан в виде блок-схемы (рис. 2). Вначале подключаются необходимые библиотеки, объявляются инициализационные структуры и глобальные переменные,



Рис.2. Блок-схема программы

инициализируются периферийные устройства. Далее программа переходит в режим ожидания событий. События обрабатываются в обработчиках прерываний. Оба типа событий генерируют таймеры микроконтроллера, сосчитав до своего верхнего значения. Один из таймеров отвечает за вывод текущей температуры на дисплей в режиме динамической индикации. Другой таймер запускает процесс измерения температуры, корректировки управляющего воздействия и считывания новой температуры стабилизации.

Для того, чтобы термостат мог автоматически нагреваться, достигая определенной температуры, необходимо знать заранее величину управляющего сигнала широтно-импульсной модуляции. ШИМ-сигнал должен поступать к драйверу по такому закону, по какому в дальнейшем температура в термокамере стабилизировалась бы и поддерживалась на заданном уровне. Для формирования управляющего сигнала используется программно реализованный ПИД-регулятор.

Пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор — это устройство в цепи с обратной связью, используемое в системах автоматического управления для поддержания заданного значения измеряемого параметра. ПИД-регулятор формирует управляющий сигнал из трёх слагаемых:

- Первое слагаемое, **пропорциональная составляющая**, пропорционально разности входного сигнала и сигнала обратной связи — сигнала рассогласования, вырабатывает выходной сигнал, противодействующий отклонению регулируемой величины, наблюдаемому в данный момент времени, от заданного значения. При использовании только пропорционального регулятора значение регулируемой величины никогда не стабилизируется на заданном значении, так как существует статическая ошибка.

Статическая ошибка — величина, значение которой равно такому отклонению регулируемой величины, которое обеспечивает выходной сигнал, стабилизирующий выходную величину именно на этом значении.

- Второе слагаемое, **интегрирующая составляющая**, является интегралом сигнала рассогласования, она пропорциональна интегралу по времени от отклонения регулируемой величины. Интегрирующую составляющую используют для устранения статической ошибки, описанной выше, позволяя регулятору со временем ее учитывать.
- Третье слагаемое, **дифференцирующая составляющая**, — производная сигнала рассогласования, она пропорциональна темпу изменения отклонения регулируемой величины. Наличие дифференцирующей составляющей обусловлено необходимостью в противодействии отклонениям от целевого значения, которые прогнозируются в будущем [1].

K_p , K_i , K_d — коэффициенты усиления пропорциональной, интегрирующей и дифференцирующей составляющих регулятора соответственно (рис. 3).

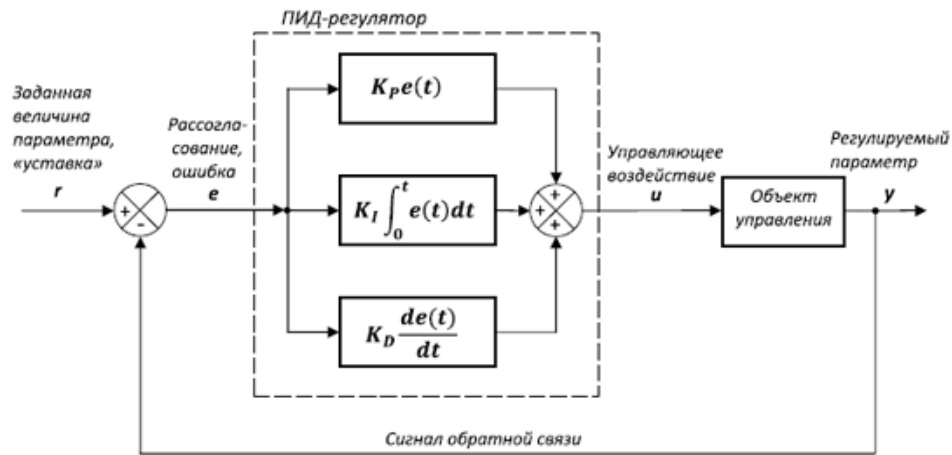


Рис.3. Структурная схема ПИД-регулятора

Величина $e(t)$ обозначает разность между входным сигналом и сигналом обратной связи, рассогласование, т.е. $e(t) = T - T_{cm}$. T – текущая температура нагревателя, а T_{cm} – требуемая температура нагревателя или температура стабилизации.

Для разрабатываемой термокамеры данная величина будет считаться разностью между задаваемой и реальной температурой, которая установилась в камере после управляющего воздействия $u(t)$. Регулируемым параметром y , соответственно, является сама температура.

В настоящей работе реализован только ПИ-регулятор, т.к. удалось подобрать коэффициенты, исключаяющие нестабильность системы. В ходе преобразований получено следующее выражение [2]:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + K_{ip} \int_0^t e(\tau) d\tau \right).$$

Осуществив дискретизацию уравнения получим:

$$u(n) = K_p \left(e(n) + K_{ip} \Delta t M(n) \right),$$

где $M(n)$ – сумма всех предыдущих значений $e(n)$, т.е. $e(n) + e(n-1) + e(n-2) + \dots$. Нормируем сигнал рассогласования $e(n)$ и сумму всех предыдущих значений $M(n)$ на температуру стабилизации:

$$x(n) = \frac{e(n)}{T_{cm}}, \quad S(n) = \frac{M(n)}{T_{cm}}.$$

В результате всех преобразований формула примет вид:

$$u(n) = K_p \left(x(n) + K_{ip} \Delta t S(n) \right).$$

Полученное выражение реализовано в программном коде микроконтроллера.

С использованием программно реализованного ПИД-регулятора, проведен эксперимент, с целью подобрать корректные значения коэффициентов. Температура стабилизации $T_{st} = 50^{\circ}\text{C}$, а температура окружающей среды 20°C .

Синей линией на рис. 4 показана реализация П-регулятора. Оранжевая линия на графике отражает реализацию ПИ-регулятора.

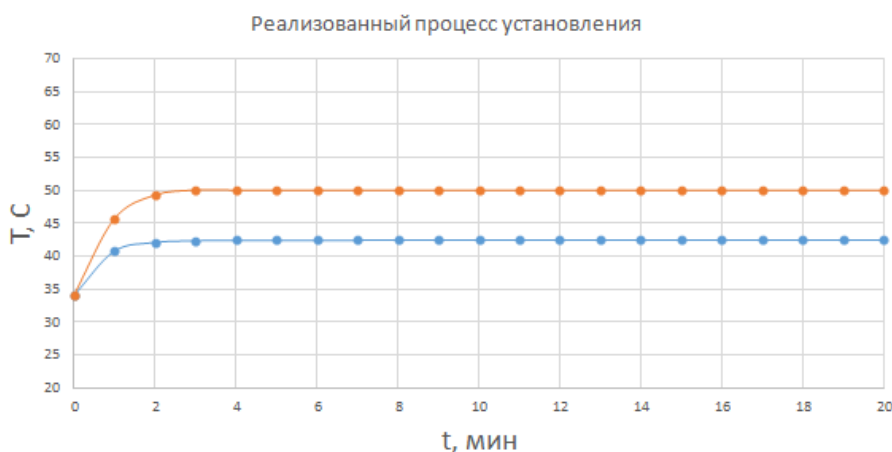


Рис.4. График реализованного процесса установления температуры стабилизации

Корректная подборка пропорционального и интегрального коэффициентов позволила свести интервал стабилизации к 2 – 2,5 минутам.

При тех же начальных условиях, в случае отсутствия системы ПИД-регулирования, нагрев до заданной температуры занял порядка 25 – 30 минут.

Вне зависимости от значения пропорциональной компоненты уравнения П-регулятор всегда выдаёт статическую ошибку.

Список литературы

1. Ощепков А. Ю. Системы автоматического управления: теория, применение, моделирование в MATLAB: учебное пособие. Перм. ун-т. Пермь, 2006. 170 с.
2. ПИД-регуляторы в частотных преобразователях [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vesper.ru/presscenter/articles/pid-regulatory-v-chastotnykh-preobrazovatelyakh-vesper-vysokaya-tochnost-protssesa-avtomaticheskogo> (дата обращения: 28.06.2022).

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ПУЛЬСОКСИМЕТРА

А. В. Барминов, М. В. Пигасов, Я. А. Бушуев, М. А. Романов,
А. В. Манцуров

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

Данная работа посвящена разработке цифрового пульсоксиметра – прибора, способного благодаря оптическим датчикам неинвазивно определять долю насыщенного кислородом гемоглобина. Что в свою очередь позволяет проводить активный мониторинг и не допускать развития патологий. В отличие от большинства аналогов разработанный программно-аппаратный комплекс имеет особое устройство датчиков, а также возможность взаимодействовать как с ПК, так и с мобильным устройством в режиме реального времени.

Ключевые слова: пульсоксиметрия; сатурация

DEVELOPMENT DIGITAL PULSEOXIMETER

A. V. Barminov, M. V. Pigasov, Y. A. Bushuev, M. A. Romanov,
A. V. Mantsurov

Perm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

This work is devoted to the development of a digital pulse oximeter – a device capable of using optical sensors noninvasively determine the proportion of oxygenated hemoglobin. Which in turn allows for active monitoring and prevents the development of pathologies. Unlike most analogues, the developed hardware and software complex has a special sensor device, as well as the ability to interact with both a PC and a mobile device in real time.

Keywords: pulseoximetry; saturation

Насыщение кислородом (сатурация) является одним из наиболее важных показателей функционирования человеческого организма. Стабильным значением SpO₂ для взрослого человек считается 95–100%. Пониженное содержание кислорода в организме приводит к гипоксии. Человек, страдающей гипоксией, может испытывать головные боли, одышку, помутнение сознания. Уровень кислорода ниже 80% нарушает работу жизненно важных органов и требует незамедлительного медицинского вмешательства. Наиболее восприимчивыми к кислородному голоданию являются центральная нервная система (ЦНС), сердце, почки и печень. Поэтому болезни сердца и лёгких, астма, пневмония, а также множество других заболеваний требуют контроля уровня насыщения крови кислородом. Одним из методов мониторинга сатурации является пульсоксиметрия.

Пульсоксиметрия – это неинвазивный метод, используемый для оценки процентного содержания кислорода в артериальной крови. Обычно это

небольшое устройство, датчик которого крепится к пальцу и передаёт считываемые показания на само устройство. В датчике находятся два светодиода с красным и инфракрасным излучением, которые включаются с заданной периодичностью. Отражённый, либо прошедший сквозь палец сигнал считывается с помощью фотодатчика. Соотношения считываемых фотодатчиком потоков позволяет дать оценку степени насыщения крови кислородом [1].

Так как цифровая пульсоксиметрия основана на неинвазивном методе, то на точность проводимых измерений способен повлиять ряд как внешних, так и внутренних факторов. А ложная информация в свою очередь может приводить к принятию неверных решений. Присутствие в крови человека некоторых веществ может вызвать искажения при прохождении излучения от светодиодов через исследуемую часть тела и привести к появлению артефактных значений SpO_2 . К искажениям могут привести такие вещества как: флюоресцеин, фетогемоглобин, метиленовая синька и другие. Маникюр, также может искажать показатель SpO_2 . Способность измерения программой сатурации зависит от объёма пульсаций крови в артериях. Если что-то будет мешать нормальному кровотоку, то и точность измерений будет снижаться. Программа прибора в таких случаях должна прибегнуть к усилению сигнала. Но при этом увеличивается фоновый шум фототранзистора, что приводит к неточному расчёту сатурации. Также на работу прибора может повлиять возросшее давление, которое приводит к искажению световых волн. Ещё одним важным фактором является симметричное расположение датчиков, если расстояние между фототранзистором и светодиодом неравно, то это приведёт к перегрузке одной из волн. Различные движение испытуемого также вносят артефакты в процесс обработки данных. Некоторые виды излучения могут вызывать артефактные значение SpO_2 . Так существует угроза искажения сигнала из-за мерцания ксеноновых ламп и инфракрасных светильников.

Таким образом, целью данной работы является разработка цифрового пульсоксиметра с возможностью мониторинга уровня насыщения кислородом артериальной крови, частоты сердечных сокращений и фотоплетизмограммы в режиме реального времени.

На основе теоретических данных и решений по улучшению прибора, разработана структурная схема пульсоксиметра (рис. 1).

Разработанный программно-аппаратный комплекс включает в себя два блока. Рассмотрим функционал каждого блока в отдельности.

Пульсоксиметр представлен следующими компонентами:

- датчики, один с красным, другой с инфракрасным светодиодом;
- усилитель сигнала, объединённый с фильтром нижних частот (ФНЧ);
- микроконтроллер;
- Bluetooth-модуль.

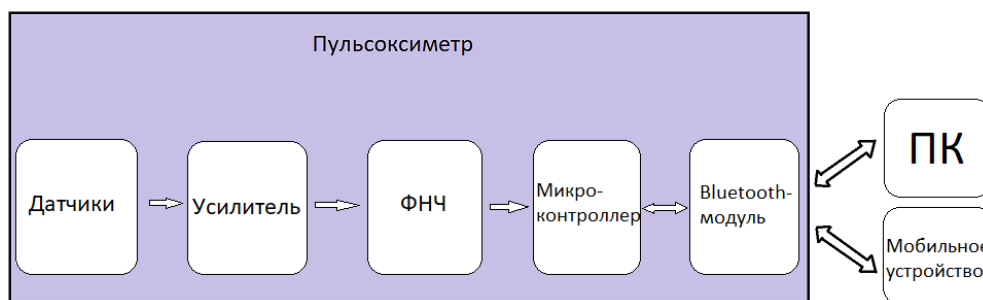


Рис. 1. Структурная схема пульсоксиметра

Изначальный сигнал формируется на компоненте «Датчики». Считывание красного (660 нм) и инфракрасного (940 нм) сигнала происходит одновременно за счёт разделения красного и инфракрасного светодиода на отдельные датчики, что качественно отличает данную разработку от аналогичных моделей и обеспечивает постоянное считывание данных фототранзисторами.

Далее сигнал поступает на «Усилитель», увеличивающий амплитуду сигнала на несколько порядков, так как входной сигнал не превосходит нескольких тысячных долей вольт.

Для подавления высокочастотных помех и ограничения спектра сигнала с целью исключения эффекта наложения, сигнал проходит через фильтр нижних частот «ФНЧ».

Следующим этапом усиленный сигнал поступает на выводы компонента "Микроконтроллер" для дальнейшей цифровой обработки. За процесс преобразования сигнала из аналогового в цифровой вид отвечает встроенный в микроконтроллер модуль АЦП. Аналого-цифровое преобразование подразумевает процесс квантования по амплитуде и дискретизации по времени исходного аналогового сигнала. АЦП микроконтроллера STM32F103C8T6, является преобразователем последовательного приближения с разрядностью равной 12 бит, что обеспечивает чувствительность порядка 0.8 мВ [2]. Микроконтроллер с заданной частотой оцифровывает аналоговый сигнал, формирует пакет данных и передает его по интерфейсу USART на модуль «Bluetooth», тот в свою очередь отправляет данные либо на ПК, либо на мобильное устройство, где реализованы все алгоритмы обработки и визуализации полученных данных.

Питание прибора осуществляется посредством подачи с платы питания 5 В напряжения на микроконтроллер через разъем micro-usb, уже с микроконтроллера подаётся 3.3 В на плату самого прибора для его работы и 5 В на питание Bluetooth-модуля. При помощи работы от АКБ предотвращаем влияние наводок с usb входа от ПК или зарядного устройства. Эти наводки могут влиять на чистоту сигнала датчиков, создавая помехи.

Для выделения полезного сигнала и для того чтобы сделать сигнал более линейным, на вход усилителя ставится конденсатор ёмкостью 1000 мкФ, т.к. при подаче питания возникает скачок напряжения на не нужной для работы прибора частоте. При этом увеличивается время работы прибора, т.к. сперва

должен зарядиться конденсатор довольно большой ёмкости и только после этого начнется передача сигнала.

Корпус изготовлен по технологии 3D печати с помощью созданных чертежей по замерам размеров плат, микроконтроллера, Bluetooth-модуля и аккумулятора с платой питания.

Для передачи данных между микроконтроллером и мобильным приложением/ПК использован Bluetooth модуль HC-05. Технология Bluetooth обеспечивает хорошую устойчивость к широкополосным помехам.

Программа для микроконтроллера разработана в среде программирования Coocox IDE. После включения микроконтроллера, подключается набор стандартных библиотек, объявляются глобальные переменные и структуры, а также прототипы функций. Далее идёт инициализация всех используемых модулей и интерфейсов и соответствующих им портов ввода-вывода. Микроконтроллер переходит в режим ожидания. По приходу в микроконтроллер байта, срабатывает обработчик прерываний USART. Если пришло значение 0x01, то включатся таймер и начинается оцифровка данных. Если пришло значение 0x00, то таймер отключается. Частота вызова обработчика прерываний таймера имеет значение в 102.4 Гц. При каждой итерации обработчика прерываний таймера АЦП считывает значения красного и инфракрасного светодиода, далее формируется пакет данных, считается его контрольная сумма и готовый пакет через Bluetooth передаётся на подключённое устройство. Кроме этого на микроконтроллере также реализована защита от зависаний.

АЦП микроконтроллера имеет разрядность равную 12 бит. А так как USART способен за один раз передать лишь 1 байт данных, то каждый оцифрованный сигнал с красного и инфракрасного светодиода разбивается и с помощью побитного сдвига и умножения записывается в два байта. На (рис. 2) изображено как формируется отдельно взятый пакет. Сначала сигнал красного светодиода побитно умножается на 0x00FF, а затем побитно умножается на 0x0F00 и сдвигается на 8 бит вправо. Тем самым мы обеспечиваем передачу красного и инфракрасного сигнала без потери данных. Вместе с пакетом отправляется его контрольная сумма, для проверки целостности данных при их передаче. Контрольная сумма вычисляется на основе алгоритма CRC32 – аппаратно на микроконтроллере и программно на ПК и мобильном устройстве.

Для реализации управления пульсоксиметром, обработки данных и их визуализации разработаны приложения: на языке C# для ПК, на языке kotlin для мобильного устройства.

При приёме данных происходит проверка каждого пакета с помощью программно реализованного алгоритма CRC32 [3]. Пакеты контрольные суммы, которых не совпали отбрасываются. Далее данные красного и инфракрасного сигнала склеиваются.

0x00FF - начало пакета
 0x00FF & Red_Signal - данные о красном светодиоде
 (0x0F00 & Red_Signal) >> 8 - данные о красном светодиоде
 0x00FF & Infrared_Signal - данные об инфракрасном светодиоде
 (0x0F00 & Infrared_Signal) >> 8 - данные об инфракрасном светодиоде
 0x00FE - конец пакета
 CRC32 - контрольная сумма пакета

Рис. 2. Пакет данных

При обработке экспериментальных данных часто возникает необходимость их усреднения. С этой целью программно реализован алгоритм арифметического скользящего среднего. Скользящее среднее – общее название для семейства функций, значения которых в каждой точке определения равны среднему значению исходной функции за предыдущий период. Скользящие средние обычно используются с данными временных рядов для сглаживания краткосрочных колебаний и выделения основных тенденций или циклов. Данную функцию можно использовать для фильтрации сигналов. В качестве входного параметра определяется окно усреднения [4].

Для дальнейшего использования пульсоксиметра и получения процентного значения сатурации произведена калибровка с помощью другого медицинского пульсоксиметра. По накоплению 200 пакетов начинается расчёт SpO2, а по накоплению 300 – пульса, данные о которых выводятся на экран. Далее для проверки работоспособности прибора проведены проверки как на мобильном, так и на компьютерном приложении. В ходе испытаний получены следующие результаты (рис. 3).

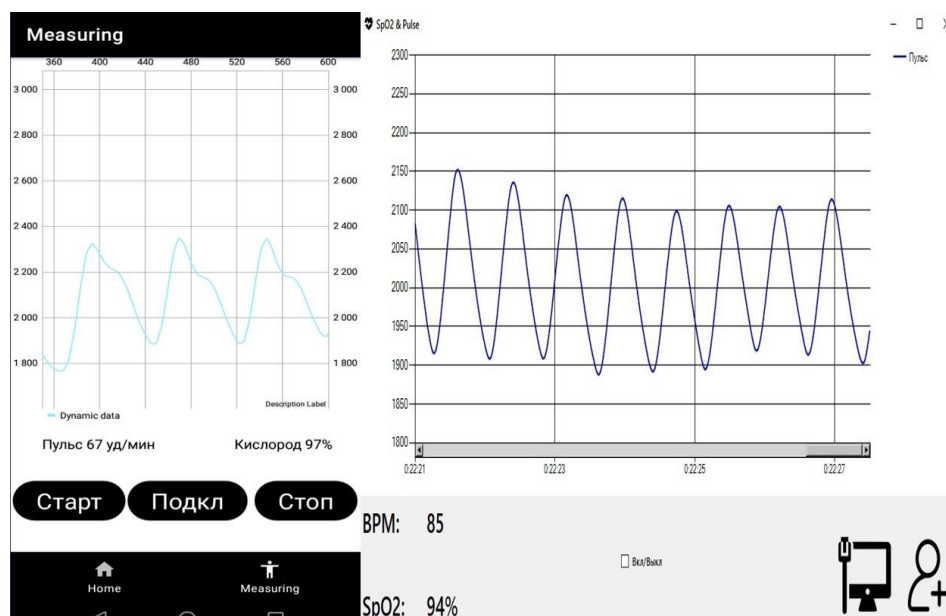


Рис. 3. Результаты испытаний

В результате работы разработан, изготовлен и протестирован цифровой пульсоксиметр (рис. 4), основной задачей которого является мониторинг уровня насыщения крови кислородом и ЧСС в режиме реального времени. В дальнейшем цифровой пульсоксиметр может стать базой для более точного и улучшенного прибора, в котором будет повышена устойчивость к шумам и наводкам, а также реализован процесс для анализа фотоплетизмограммы, чтобы на основе всех вычисленных параметров идентифицировать патологии сердечно-сосудистой системы человека на более высоком уровне.

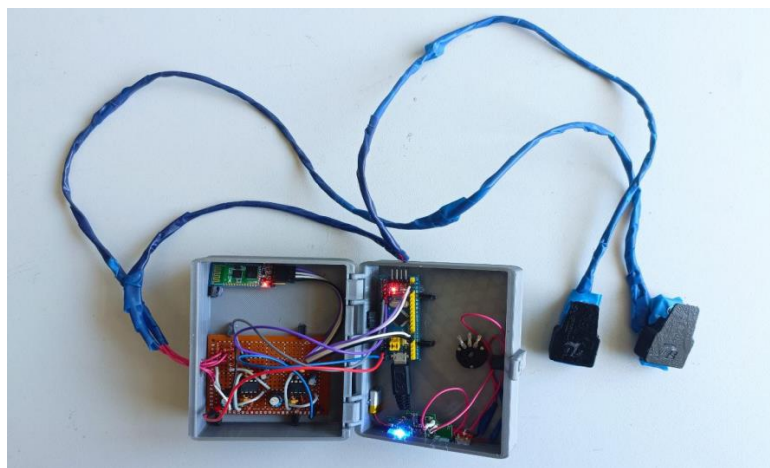


Рис.4. Разработанная модель пульсоксиметра

Список литературы

1. *Шурыгин И. А.* Мониторинг дыхания: пульсоксиметрия, капнография, оксиметрия. М.: «Издательство БИНОМ», 2000. 299 с.
2. RM0008. Reference manual. STM32F103xx. STMicroelectronics. Руководство по эксплуатации. 2021. 1136 с.
3. *Айфичер Э. С., Джервис Б. У.* Цифровая обработка сигналов. М.: Вильямс, 2004. 992 с.
4. *Скин Д., Гринхол Д.* Kotlin. Программирование для профессионалов. СПб.: Прогресс книга, 2020. 464 с.
5. *Троелсен Э, Джепикс Ф.* Язык программирования C# 7 и платформы .NET и .NET Core. М.: Вильямс, 2018. 1300 с.

ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

В. В. Ванюков^{a,b}, И. Л. Вольхин^{a,b}

^aПермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева 15

^bПАО Пермская научно-производственная приборостроительная компания,
614990, Пермь, 25 Октября, 106

Разработан импульсный источник вторичного электропитания на основе двухкаскадного обратного преобразователя напряжения. Источник трансформирует напряжение сети постоянного тока с номинальным напряжением 27 В в три канала напряжения постоянного тока с номинальным напряжением 5 В. Сформирован перечень отечественных элементов. Разработаны принципиальная электрическая схема и печатная плата. Исследованы основные характеристики импульсного источника вторичного электропитания.

Ключевые слова: преобразователь напряжения; постоянный ток; принципиальная схема

DEVELOPMENT OF A PULSED SECONDARY POWER SUPPLY

V. V. Vanyukov^{a,b}, I. L. Volkhin^{a,b}

^aPerm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

^bPAO Perm Scientific Production Instrument Company,
106 25 Oktyabrya St., 614990, Perm

Pulsed secondary power supply based on two-stage flyback voltage converter has been developed. The source transforms voltage of DC network with nominal voltage of 27 V into three channels of DC voltage with nominal voltage of 5 V. A list of domestic elements has been formed. Circuit diagram and printed circuit board have been developed. The main characteristics of pulsed secondary power supply are investigated.

Keywords: voltage converter; direct current; circuit schematics

Введение

Преобразователь электрической энергии – электротехническое устройство, преобразующее электрическую энергию с одними значениями параметров в электрическую энергию с другими значениями параметров. Целью данной работы является разработка преобразователя напряжения сети постоянного тока в диапазоне от 9 В до 36 В в три напряжения постоянного тока с номиналом 5 В.

Принцип действия обратного преобразователя

В работе используется обратный преобразователь [1] (рис. 1). Ключевой транзистор, управляемый широтно-импульсный контроллер

(ШИМ-контроллер), соединяет первичную обмотку трансформатора Т1 к источнику питания. Первичная обмотка обратноходового трансформатора Т1 представляет собой катушку индуктивности, поэтому после подачи напряжения ток через неё линейно нарастет. В ней накапливается энергия магнитного поля. В начальный момент времени t_0 (рис. 2) к выходным диодам VD3, VD4 и VD6 приложено запирающее напряжение и ток во вторичной обмотке трансформатора не протекает. В момент t_1 (рис. 2) транзисторы VT1, VT2 закрываются и полярность напряжения на вторичных обмотках в соответствии с законом самоиндукции изменяется на противоположную. Диоды VD3, VD4, VD6, открываются, ток начинает протекать через вторичную обмотку трансформатора, и запасенная энергия переходит в нагрузку [2].

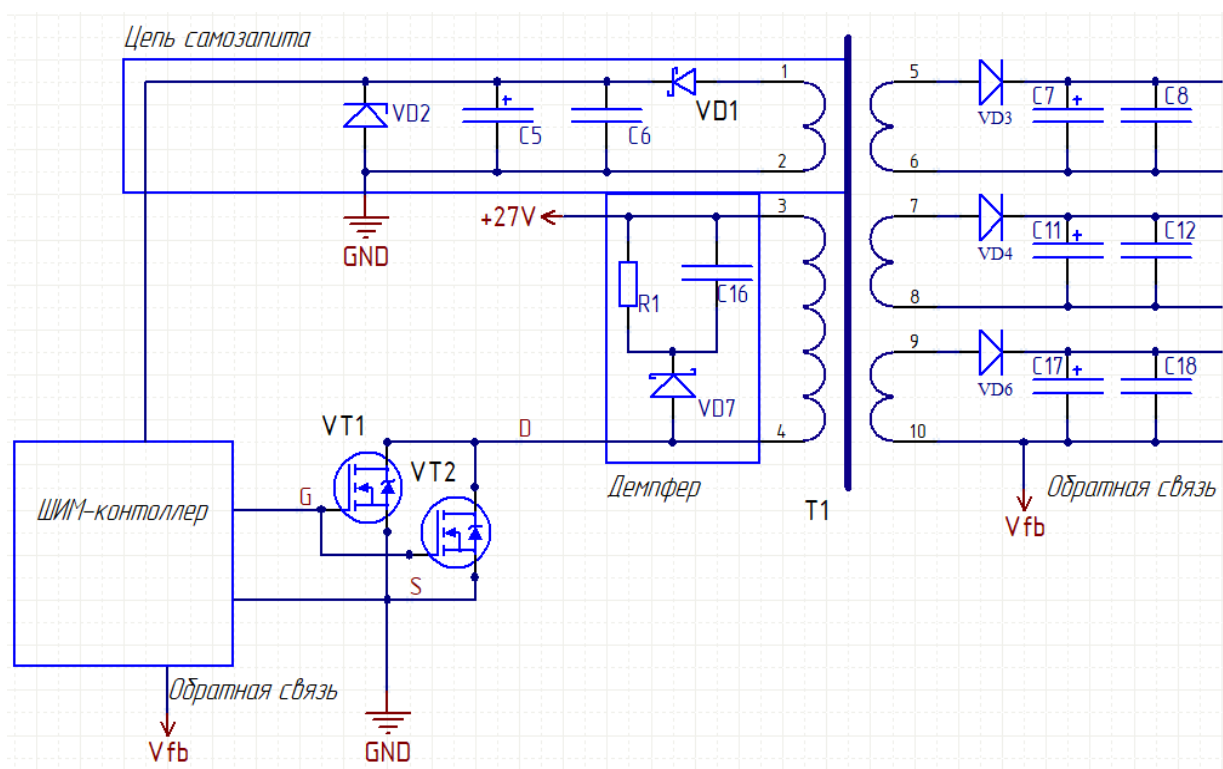


Рис. 1. Упрощенная схема обратноходового трансформатора

Далее процесс повторяется. Выходной конденсатор фильтра является энергетическим буфером, поддерживающим ток в нагрузке в моменты паузы.

В основе работы преобразователя лежит явление накопления энергии магнитного поля в первичной обмотке во время первой стадии заряда и передача запасенной энергии на последующей стадии передачи энергии.

Функциональная схема преобразователя напряжения представлена на рис. 3. Основные блоки преобразователя – планарный трансформатор, ШИМ-контроллер, силовые ключи, питание логики, обратная связь, входные/выходные фильтры, межкаскадный фильтр и понижающий преобразователь напряжения. По техническому заданию преобразователь напряжения должен трансформировать напряжение сети постоянного тока с

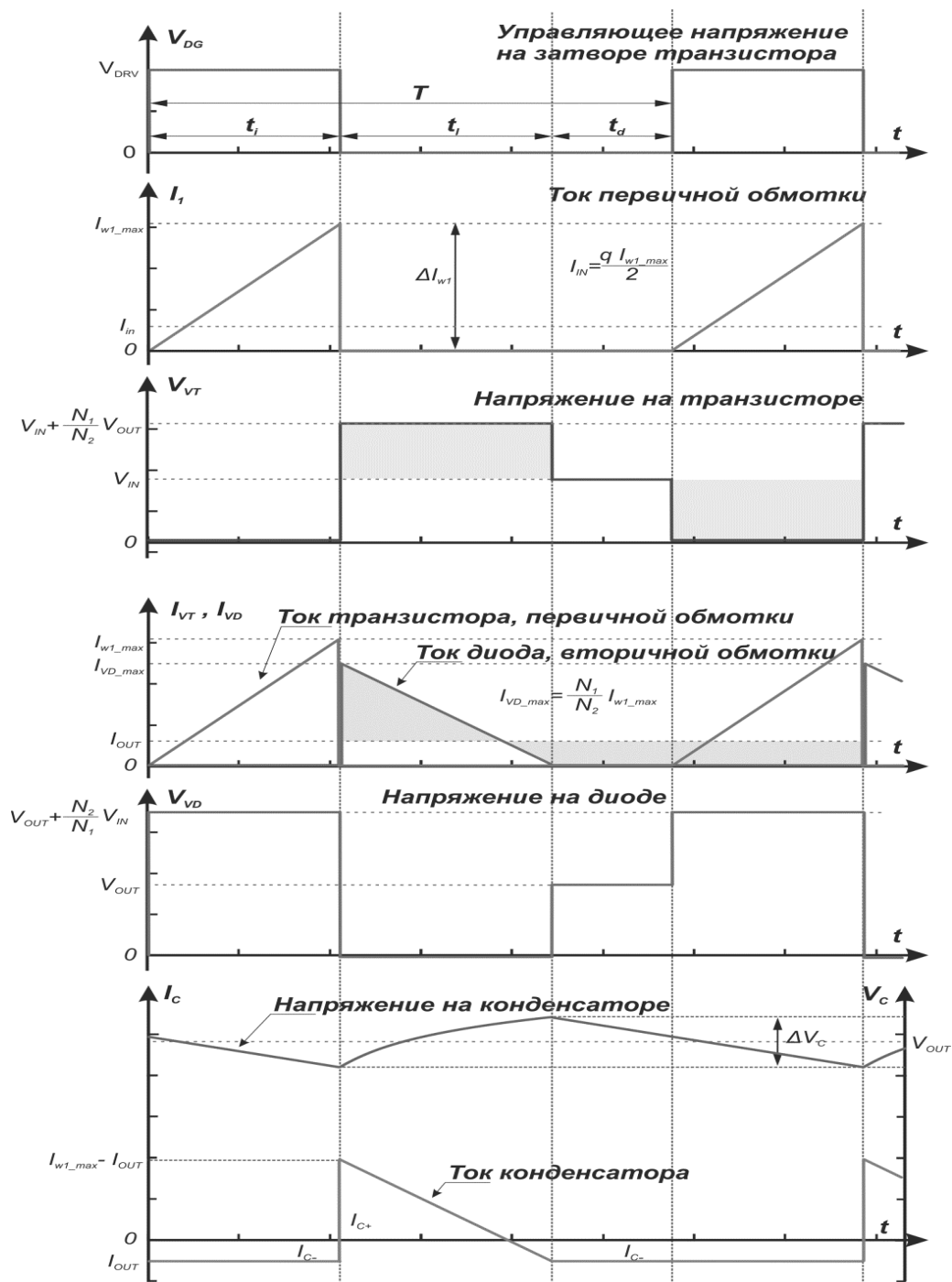


Рис. 2. Временные диаграммы напряжений и токов

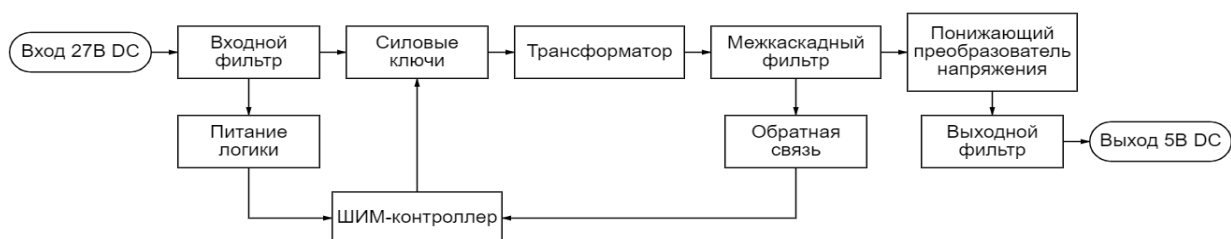


Рис. 3. Функциональная схема преобразователя напряжения

номинальным напряжением 27 В в три канала напряжения постоянного тока с номинальным напряжением 5 В и гальванической развязкой этих цепей друг от друга и от сети напряжения постоянного тока. Прибор должен сохранять свои параметры при изменении входного напряжения от 9.0 до 36.0 В.

Принципиальная схема (рис. 4, 5) и печатные платы (рис. 6а, б и в) разработаны в программе Altium Designer с использованием отечественной дискретной элементной базой.

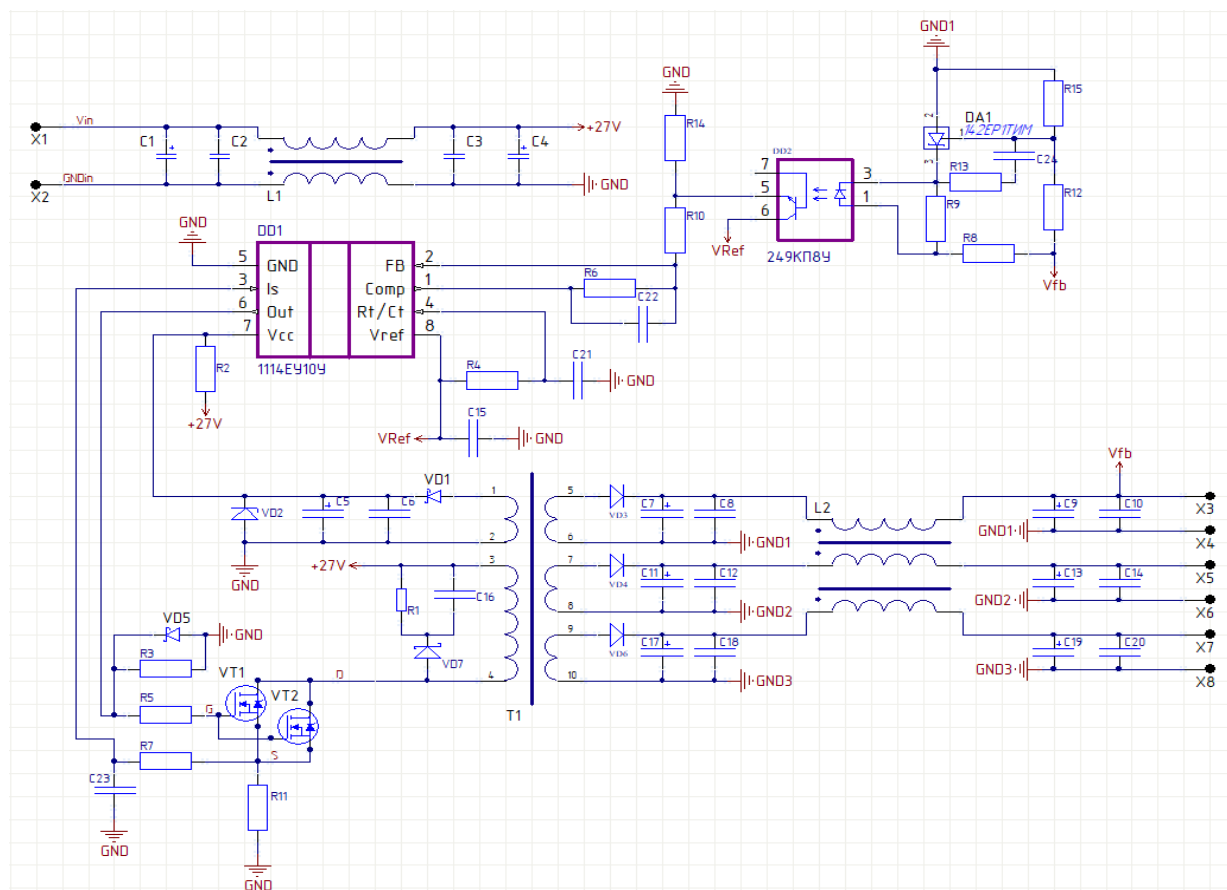


Рис. 4. Принципиальная схема первого каскада

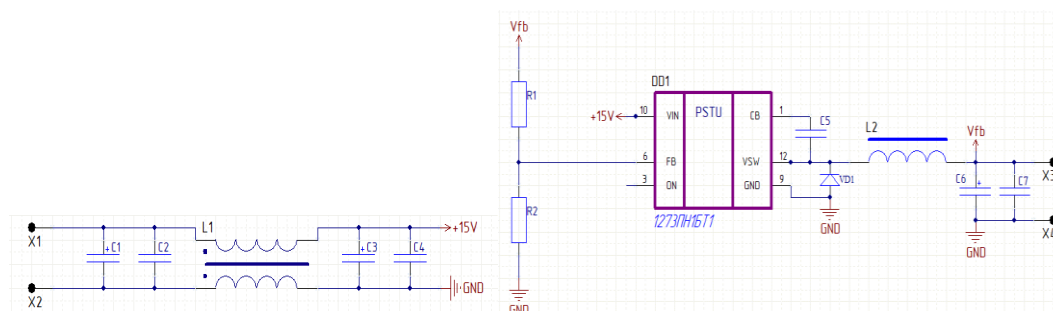
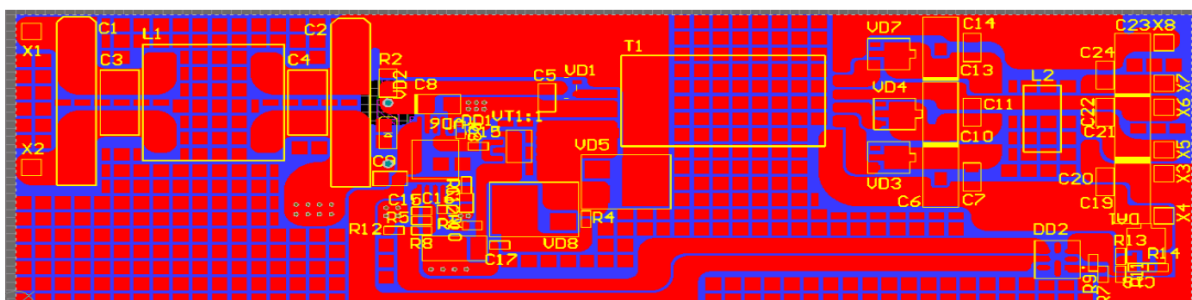
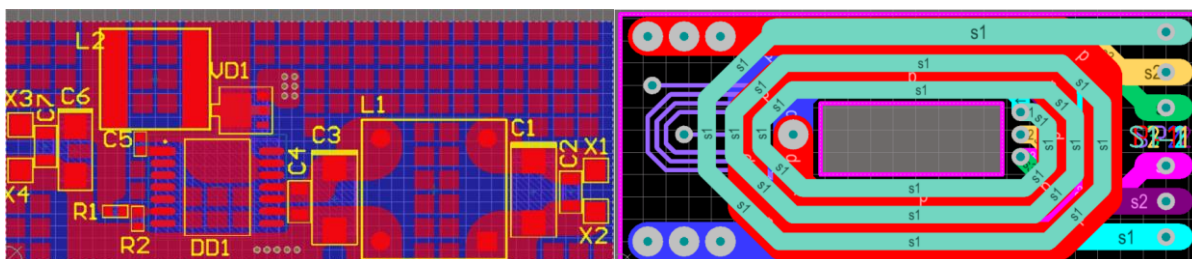


Рис. 5. Принципиальная схема второго каскада



а)



б)

в)

Рис. 6. Печатная плата: а) первого каскада; б) второго каскада; в) обмоток планарного трансформатора

Для проверки качества работы преобразователя напряжения, были рассчитаны зависимости КПД от входного напряжения U_{in} при разных (минимальной и максимальной) нагрузках как показано на рис. 7. Из рисунка видно, что при увеличении входного напряжения U_{in} до 20 В, КПД остается практически постоянным при любой нагрузке, а затем уменьшается. При минимальной нагрузке КПД меньше, чем при максимальной.

Интервал изменения КПД при изменении нагрузки и величины входного напряжения составляет от 56% до 86% [3].

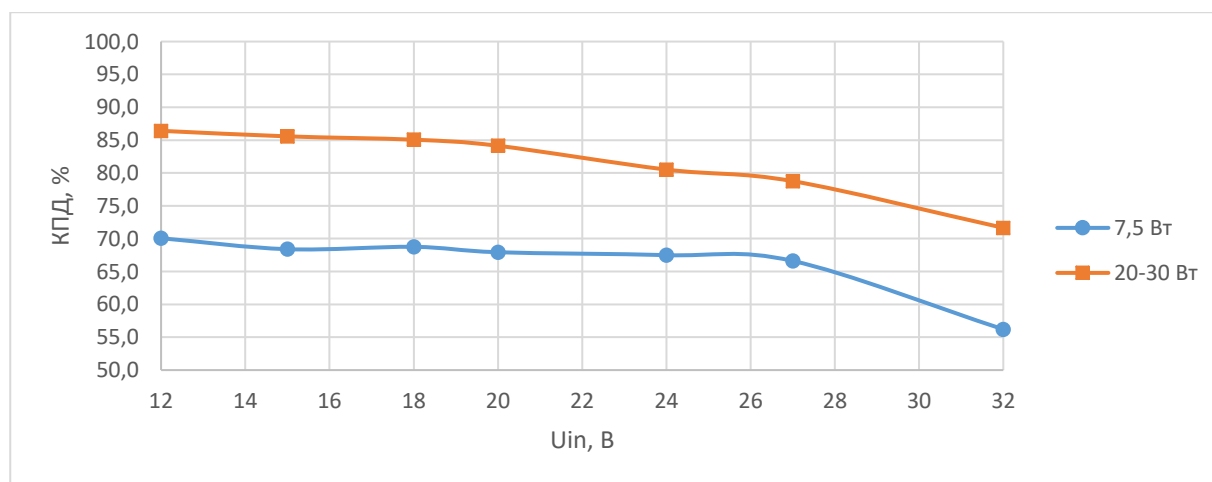


Рис. 7. Зависимость КПД от входного напряжения при разных нагрузках

В работе исследованы переходные процессы на стоке силового ключа демпферной цепи. Результаты приведены на рис. 8. По горизонтальной оси отложено время (одно деление – 500 нс), а по вертикальной – напряжение (одно деление – 10 В).

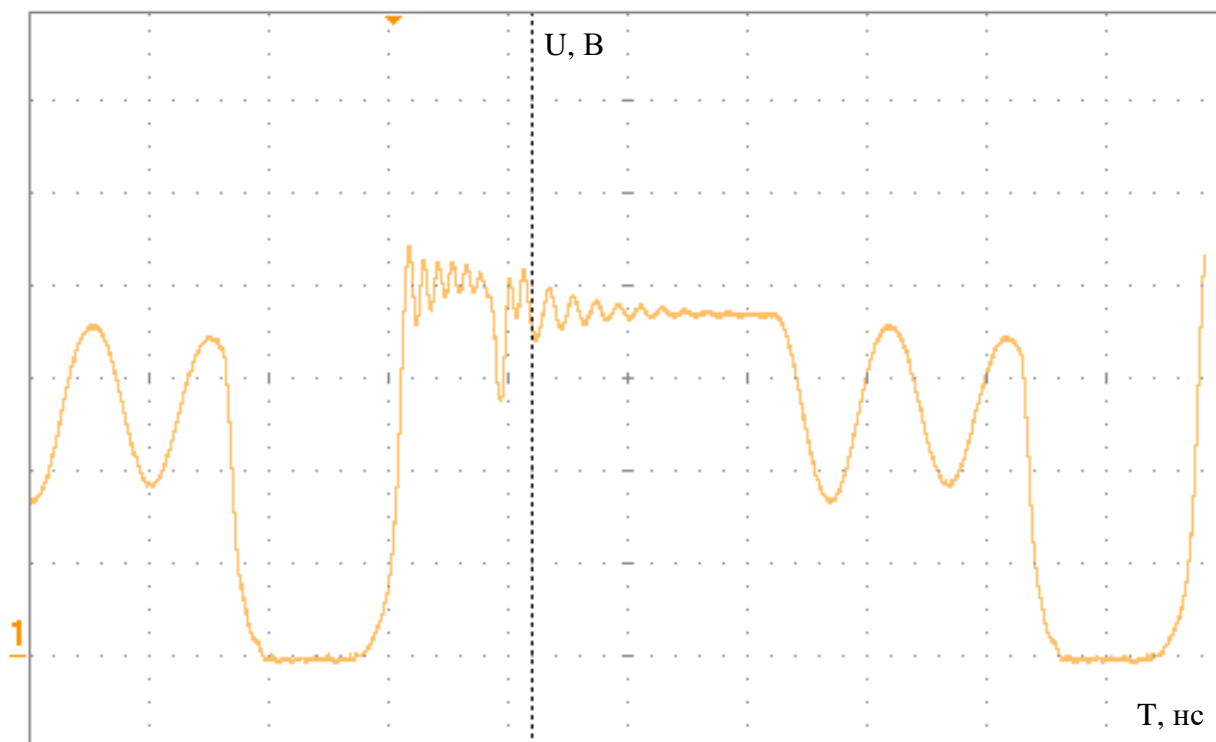


Рис. 8. Осциллограмма напряжения на стоке силового ключа демпферной цепи

Заключение

Разработана схема преобразователя напряжения сети постоянного тока 27 В в напряжение постоянного тока с номиналом 5 В. Выполнен дизайн печатной платы в САПР «Altium Designer». Изготовлена печатная плата, на которой смонтированы компоненты преобразователя. Исследованы его основные технические характеристики при различных сопротивлениях нагрузки. В разрабатываемом преобразователе использованы компоненты отечественного производства.

Список литературы

1. Маклиман В. Проектирование трансформаторов и дросселей. Справочник. М.: ДМК Пресс, 2016. 476 с.
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. М.: Издательство БИНОМ, 2014. 704 с.
3. Ненахов С. М. Расчет обратноходового преобразователя напряжения в установившемся режиме // Электрическое питание. 2005. №3. С. 10–13.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА С ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕМ ПО ОПТИЧЕСКОМУ ВОЛОКНУ

А. А. Гаркушин^{a,b}, Р. П. Расулев^{b,c}, Е. В. Нифонтова^{a,b}, В. В. Криштоп^{a,b,c},
И. Л. Вольхин^{b,c}

^aПермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29

^bПАО Пермская научно-производственная приборостроительная компания,
614990, Пермь, 25 Октября, 106

^cПермский государственный национальный исследовательский университет,
614068, Пермь, Букирева, 15

Разработана система мониторинга удаленных датчиков физических величин с энергоснабжением по оптическому волокну. Проведено испытание системы в различных режимах работы. Выработаны рекомендации по использованию количества каналов энергоснабжения в зависимости от пиковой электрической мощности потребляемой отдельными датчиками и системой в целом.

Ключевые слова: энергоснабжение; датчики; оптическое волокно

DEVELOPMENT OF A MONITORING SYSTEM WITH POWER SUPPLY THROUGH OPTICAL FIBER

A. A. Garkushin^{a,b}, R. P. Rasulev^{b,c}, E. V. Nifontova^{a,b}, V. V. Krishtop^{a,b,c},
I. L. Volkhin^{b,c}

^aPerm National Research Polytechnic University,
29 Komsomolsky Pr., 614990, Perm

^bPAO Perm Scientific Production Instrument Company,
106 25 Oktyabrya St., 614990, Perm

^cPerm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

System for monitoring remote sensors of physical quantities with power supply via optical fiber has been developed. System was tested for different operating modes. Recommendations for use of number of power supply channels depending on the peak electrical power consumed by individual sensors and the system as whole have been developed.

Keywords: energy supply; sensors; fiber optic

Введение

Существуют различные производства, на которых имеется риск возгорания или взрыва. На таких объектах периодически происходят катастрофы и для их предотвращения необходимо использовать оборудование, которое будет следить за концентрацией взрывоопасных газов в воздухе. Кроме того оборудование и система его энергоснабжения не должны создавать угрозу взрыва или пожара. Достижения в области

новейших оптоволоконных и фотонных технологий позволяют решить эту проблему и обеспечить безопасность как в линиях, связывающих датчики и узел обработки, так и в системе в целом. Представленная в настоящей работе разработка измерительной системы мониторинга обстановки на взрывоопасных и пожароопасных объектах с энергоснабжением по оптическому волокну является перспективным вариантом решения указанной задачи.

Схема, иллюстрирующая основные способы передачи электроэнергии, приведена на рис. 1. Существуют разные методы её передачи: прямой,

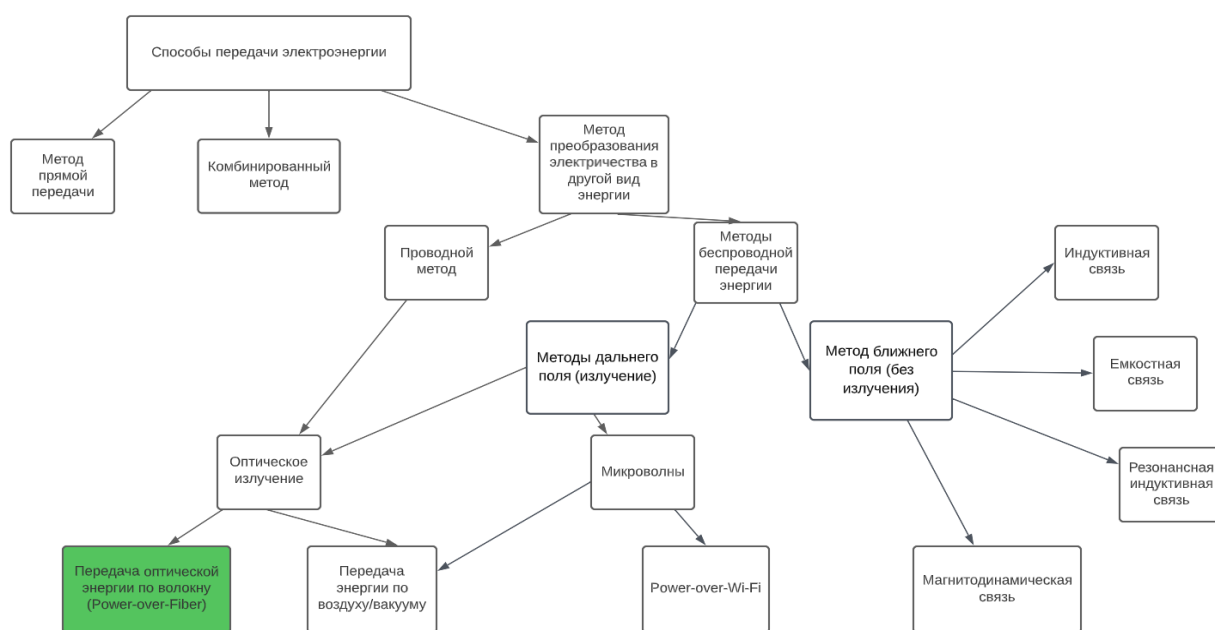


Рис. 1. Основные способы передачи электроэнергии

комбинированный и способ, использующий преобразование электричества в другой вид энергии. При этом передача энергии может быть как проводной, так и беспроводной. Носителем преобразованной электрической энергии может служить излучение в различных диапазонах длин волн. В настоящее время наиболее перспективными являются микроволновый и оптический диапазоны электромагнитных волн. Для нашей задачи лучше подходит использование энергии оптического излучения. Последняя может передаваться либо по воздуху/вакууму, либо по оптическому волокну. В нашей разработке используется проводной метод передачи энергии лазерного излучения через оптическое волокно, в литературе известный как технология Power-over-fiber (PoF) [1]. При этом происходит двойное преобразование энергии: электрической в оптическую, при вводе в оптическое волокно и обратное из оптической в электрическую на выходе из него. Преимуществом выбранной схемы передачи энергии является её взрыво- и пожаробезопасность, отсутствие металлических проводов, меньшие габариты и масса «силового» кабеля энергоснабжения. К

недостаткам относятся потери энергии при двойном преобразовании. Поэтому наиболее перспективной областью применения PoF-технологии передачи энергии является использование её для питания удаленных маломощных устройств, работающих в агрессивных средах.

Альтернативные варианты электропитания: аккумуляторы, солнечные батареи и т.д. требуют либо постоянной подзарядки, либо зависят от наличия благоприятных внешних факторов и проигрывают PoF-технологии в надёжности энергоснабжения удалённых датчиков, особенно в подземных сооружениях, трубопроводах и при размещении во внутриконструктивных полостях сложной конфигурации.

1. Схема макета системы

Блок-схема системы мониторинга с энергоснабжением по оптическому волокну представлена на рис. 2. Она состоит из трёх частей: блока передачи, соединительного оптического кабеля и приёмного блока.

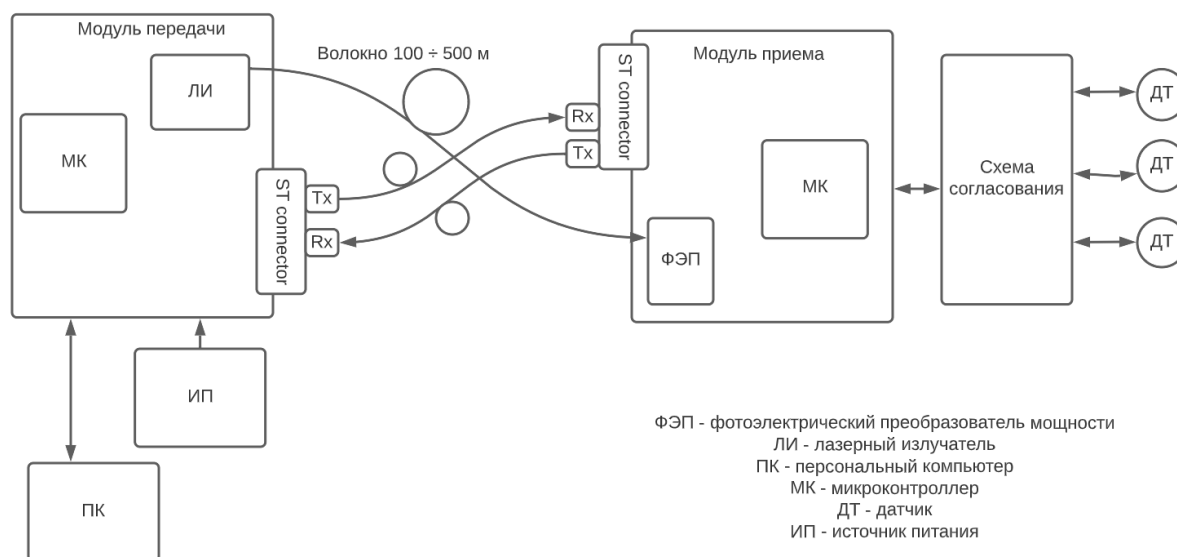


Рис. 2. Блок-схема системы мониторинга

Блок передачи

Он смонтирован на плате и включает в себя: лазерный излучатель ЛИ, микроконтроллер МК марки STM32F407 для обмена информацией с приёмным блоком, электрические и оптические коннекторы. К электрическим коннекторам подключаются: внешний источник питания ИП электрической мощностью до 50 Вт и персональный компьютер ПК. К оптическим коннекторам подключается: FC – «силовое» оптическое волокно энергоснабжения; ST – два сигнальных оптических волокна, один (Tx) – для передачи, другой (Rx) – для приёма информации. Все три оптических волокна объединены в один кабель, имеющий общую защитную оболочку и отдельные «силовой» и сигнальный коннекторы. Оптическая мощность лазерного излучения составляет 2.5 Вт на длине волны 980 нм. Персональный

компьютер служит для наблюдения за получаемой информацией и в случае критической ситуации подаёт аварийный сигнал.

Соединительный оптический кабель

Как было написано выше, кабель образован тремя многомодовыми оптическими волокнами с германо-силикатными сердцевинами диаметром 62.5 мкм, одно из которых является «силовым», а два других – сигнальными. Длина оптического кабеля составляет от 100 до 500 метров в зависимости от расстояния между блоками передачи и приёма. При увеличении мощности лазерного излучателя до 20 Вт длина кабеля может быть увеличена до 20 км и более.

Блок приёма

Блок приема является системой из трёх компонентов: модуля приёма, схемы согласования и нескольких датчиков. Модуль приёма состоит из платы с размещёнными на ней: из фотоэлектрического преобразователя ФЭП марки YCH-L250, микроконтроллера МК марки STM32F407 оптических и электрических коннекторов. Оптическая энергия поступает на коннектор FC и с помощью ФЭП преобразуется в электрическую. Максимальная мощность составляет 200 мВт при напряжении 5 В и служит для электропитания всей электроники приёмного блока. Оптические коннекторы ST служат для приёма и передачи информации, Rx и Tx, соответственно. Посредством электрического коннектора и электрического кабеля модуль приёма связан со схемой согласования. Схема согласования и набор первичных датчиков физических величин подробно описаны в работе [2]. В тестовом варианте систему планируется укомплектовать двумя устройствами: НТ-2000 с датчиками углекислого газа, температуры, влажности и IP-видеокамерой. Схема согласования необходима для изменения уровней сигналов датчиков физических величин так, чтобы при их изменении использовались все разряды аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллера. Кроме того, в схеме согласования имеется стабилизатор напряжения для питания тех датчиков, которые работают с напряжениями питания ниже 5 В. Датчики следует подобрать так, чтобы их общая максимальная потребляемая мощность не превышала 200 мВт, либо при большей потребляемой мощности использовать лазер, генерирующий большую мощность оптического излучения, и использовать преобразователь, рассчитанный на генерацию большей электрической мощности.

2. Эксперимент

Исследование силовой части системы было произведено по схеме, представленной на рис. 3. Система включает в себя следующие элементы: лазерного источника излучения 1, оптического кабеля 2, фотоэлектрического преобразователя 3, стабилизатора напряжения 4 и двух первичных датчиков концентрации углекислого газа 5 и IP-видеокамерой 6. ПК 7 использован для контроля работы IP-видеокамерой, а измерительные приборы 8, 9, 10, 11 –

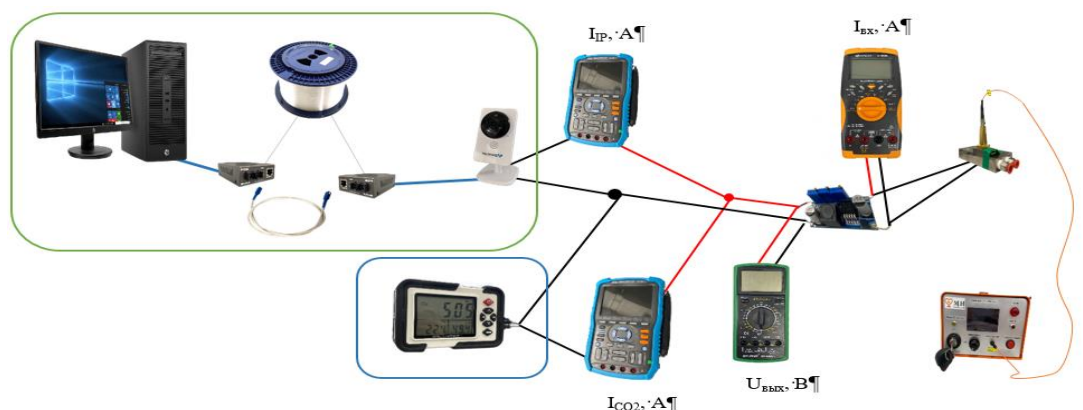


Рис. 3. Схема исследования силовой части системы мониторинга

для мониторинга энергопотребления датчиком уровня углекислого газа и IP-видеокамеры.

Установлено, что датчик и видеокамера в различных режимах работы потребляют разную электрическую мощность. Для нахождения пиковых значений потребляемой электрической мощности и необходимой для её поддержания оптической мощности исследования проводились в течение нескольких часов. Наиболее характерные результаты приведены на рис. 4. Здесь по осям отложены: горизонтальной – текущее время эксперимента, по левой вертикальной – сила потребляемого электрического тока в амперах, правой – соответствующая ей оптическая мощность лазера в ваттах.

Эксперимент проводился следующим образом: увеличивалась мощность лазерного излучения и наблюдалось включение устройств потребителей электроэнергии. Проведено три различных вида исследований при работе: датчика углекислого газа; IP-видеокамеры и совместной работе обоих устройств. На графике выделены восемь областей, соответствующих различным режимам электропотребления.

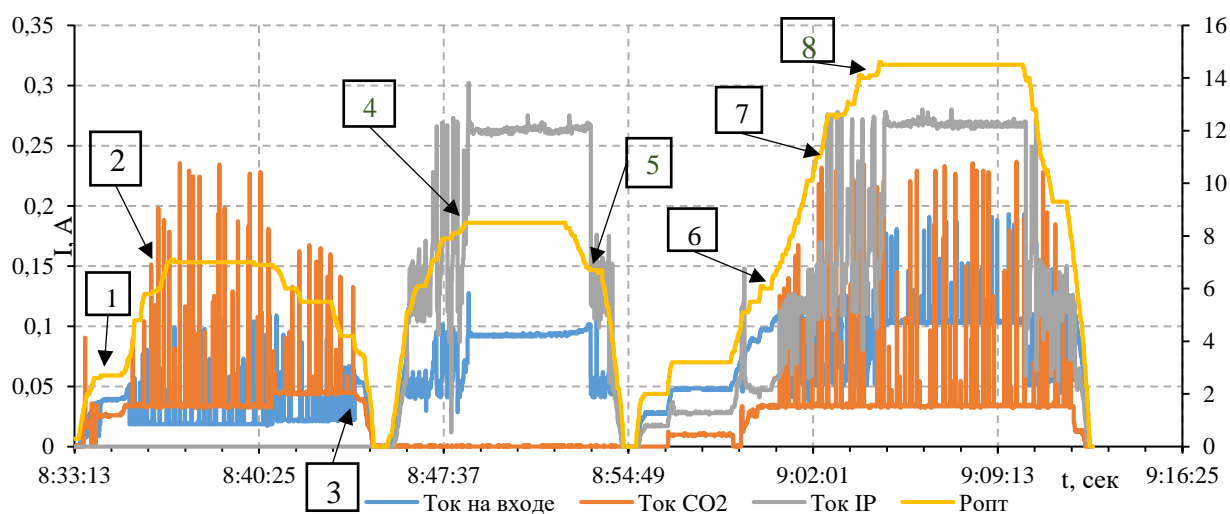


Рис. 4. Результаты эксперимента

Датчик углекислого газа

1. «Холодный старт» при оптической мощности, равной 2.7 Вт, устройство включается, но датчик CO₂ не работает.
2. «Горячий старт» при оптической мощности, равной 7 Вт, включается датчик CO₂.
3. При оптической мощности равной 1.6 Вт устройство отключается.

IP-видеокамера

4. Включается при оптической мощности, равной 8.5 Вт.
5. Выключается при оптической мощности, равной 6.7 Вт.

Совместно датчик углекислого газа и IP-видеокамера

6. «Холодный старт» при оптической мощности, равной 6 Вт, устройство включается, но датчик CO₂ и IP-видеокамера не работают.
7. «Горячий старт» при оптической мощности равной 11 Вт включается датчик CO₂.
8. При оптической мощности, равной 14 Вт, дополнительно включается IP-камера.

3. Результаты и обсуждение

Таким образом, установлено, что пиковая оптическая мощность, необходимая для электропитания по отдельности: датчика CO₂ равна 7 Вт, а IP-камеры – 8.5 Вт. Для их совместной работы необходима мощность 14 Вт.

Следует отметить, что суммарная пиковая потребляемая мощности двумя устройствами больше и составляет 15.5 Вт. Указанный эффект связан с тем, что пиковые мощности, потребляемые приборами, приходятся на различные промежутки времени. В течение всего времени эксперимента превышения совместной потребляемой мощности, равной 14 Вт, зафиксировано не было. Таким образом, для экономии энергоресурсов лучше подключить два прибора одновременно к одному источнику лазерного излучения, чем к двум разным. Однако, у такого подключения имеются свои недостатки: большая выделяемая тепловая мощность источника лазерного излучения и фотопреобразователя, что требует их принудительного охлаждения. При увеличении передаваемой оптической мощности приходится увеличивать диаметр сердцевины оптического волокна. При различных рабочих напряжениях датчиков физических величин и IP-видеокамеры требуется дополнительное преобразование выходного напряжения фотоэлектрического преобразователя. При использовании независимых каналов передачи оптической энергии можно подобрать фотоэлектрические преобразователи с необходимыми выходными напряжениями. Таким образом, выбор в качестве оптимальной одноканальной или многоканальной схемы энергоснабжения зависит от количества первичных датчиков и их энергетических характеристик.

Список литературы

1. *López-Cardona J. D., Vázquez C., Montero D. S., Lallana P. C.* Remote optical powering using fiber optics in hazardous environments // *Journal of Lightwave Technology*. 2018. Vol 36 (3). P. 748–754.
2. *Lebedev A. V., Pschenichnikov A. F.* Rotational effect: The influence of free or solid moving boundaries // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1993. Vol. 122 (1–3). P. 227–230.

РАЗРАБОТКА МОДУЛЕЙ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ С ДАТЧИКОВ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

А. А. Гаркушин^{a,b}, М. С. Цао^{b,c}, Е. А. Голубчиков^{b,c}, С. А. Скрыбин^{b,c},
Д. Р. Харитонов^{b,c}, Д. А. Мишуткин^{b,c}, И. Л. Вольхин^{b,c}

^aПермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29

^bПАО Пермская научно-производственная приборостроительная компания,
614990, Пермь, 25 Октября, 106

^cПермский государственный национальный исследовательский университет,
614068, Пермь, Букирева, 15

Работа является частью проекта по созданию системы сбора информации с удаленных датчиков физических величин. В результате разработана блок-схема системы сбора данных с датчиков физических величин. Выработаны рекомендации по использованию компонентов для создания электронных модулей. Основным преимуществом разработанной конструкции является её модульность, что позволяет гибко реагировать на требования заказчиков и создавать на её основе промышленные образцы для работы в различных, в том числе агрессивных средах.

Ключевые слова: датчик; сбор данных; измерения

DEVELOPMENT OF MODULES OF DATA COLLECTION SYSTEM FROM SENSORS OF PHYSICAL VALUES

A. A. Garkushin^{a,b}, M. S. Cao^{b,c}, E. A. Golubchikov^{b,c}, S. A. Scriabin^{b,c},
D. R. Kharitonov^{b,c}, D. A. Mishutkin^{b,c}, I. L. Volkhin^{b,c}

^aPerm National Research Polytechnic University,
29 Komsomolsky Pr., 614990, Perm

^bPAO Perm Scientific Production Instrument Company,
106 25 Oktyabrya St., 614990, Perm

^cPerm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

The work is part of project to create system for collecting information from remote sensors of physical quantities. As a result, block diagram of system for collecting data from sensors of physical quantities was developed. Recommendations for use of components for the creation of electronic modules have been developed. The main advantage of developed design is its modularity, which makes it possible to respond flexibly to customer requirements and create industrial designs based on it for operation in various, including aggressive environments.

Keywords: sensor; data collection; measurements

Системы сбора данных с датчиков физических величин для работы требуют наличия источника питания. Источники электропитания могут быть либо автономными, либо использовать существующие линии

электропередач. Если датчики расположены удаленно от места сбора и обработки информации, то возникают сложности с обеспечением бесперебойного электропитания. В настоящее время возникла возможность передачи энергии по оптическому волокну. Это позволяет существенно упростить прокладку линии энергоснабжения и отказаться от использования металлических проводов. Вторым преимуществом является возможность работы в пожароопасных и взрывоопасных средах, например, в угольных шахтах. Указанная работа выполняется на базе НОЦ ПНППК и включает несколько разработок. Общая схема описана в работе [1]. Система сбора данных с датчиков физических величин является ее составной частью.

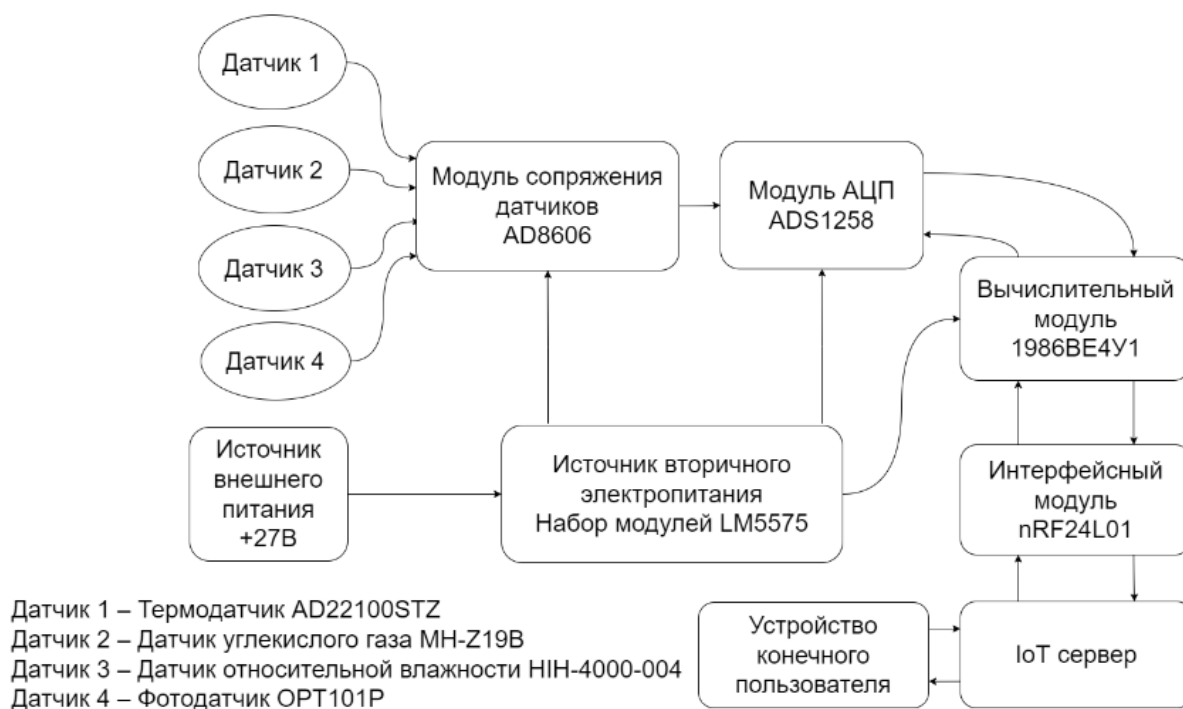


Рис. 1. Блок-схема системы сбора данных с датчиков физических величин

Датчик – конструктивно обособленное устройство, содержащее один или несколько первичных измерительных преобразователей. Датчик предназначен для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем [2].

В разрабатываемой системе предложено использовать аналоговые датчики: температуры, относительной влажности, углекислого газа и освещённости. Согласно техническому заданию были выбраны следующие марки датчиков: термодатчик AD22100STZ, датчик углекислого газа (CO₂) МН-Z19В, датчик относительной влажности НН-4000-004 и фотодиод ОРТ101Р. Их основные характеристики удовлетворяют требованиям заказчика, они имеются в свободной продаже и обладают оптимальным соотношением цена-качество.

Модуль сопряжения

Модуль сопряжения датчиков необходим для согласования выходных сопротивлений датчиков с входным сопротивлением АЦП. Большинство пассивных датчиков выдают выходные сигналы либо меньше, либо больше необходимых для работы АЦП. Их величина часто не превышает нескольких микровольт и пикоампер или наоборот составляет единицы вольт и сотни миллиампер. Кроме того, уровни выходных сигналов четырёх датчиков, используемых в системе сбора данных, существенно отличаются. Поэтому для оптимального подключения датчиков к АЦП требуются индивидуально настроенные масштабирующие усилители. Их обычно изготавливают на основе операционных усилителей (ОУ) с цепями обратной связи и, при необходимости, частотной коррекции. Кроме того, усилители согласуют выходные сопротивления датчиков с входным сопротивлением АЦП [2].

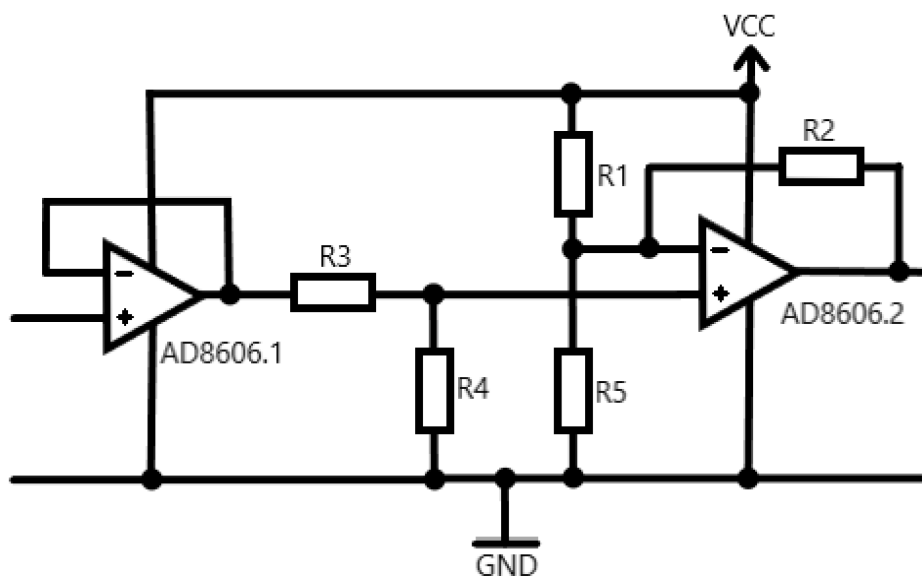


Рис. 2. Электрическая схема масштабирующего усилителя постоянного тока модуля сопряжения датчиков

Схемы масштабирующих усилителей, используемые в нашей системе сбора данных, представлены на рис. 2. Электрическая схема представляет собой сочетание из трёх двухкаскадных и одного однокаскадного усилителей, выполненных на основе ОУ AD8606. Первый каскад трёх двухкаскадных усилителей собран по типовой схеме повторителя

напряжения и имеет высокое (порядка единиц МОм) входное и порядка сотен Ом выходное сопротивление. Он необходим для согласования больших (порядка сотен кОм – единиц МОм) сопротивлений датчиков температуры, относительной влажности и углекислого газа. Датчик освещённости работает в режиме генератора тока и повторителя напряжения в его схеме нет. Резисторы R3 и R4 образуют выходной делитель напряжения. Второй каскад представляет собой неинвертирующий масштабный усилитель напряжения. Использование двухкаскадной схемы усилителя постоянного тока позволяет использовать все разряды АЦП для оцифровки измеряемых датчиками значений физических величин.

Аналого-цифровой преобразователь

Аналогово-цифровой преобразователь – один из самых важных электронных компонентов в измерительном и тестовом оборудовании. АЦП преобразует аналоговый сигнал в цифровой код, с которым микропроцессор и программное обеспечение выполняют определенные действия [3].

Существует несколько основных типов архитектуры АЦП, в пределах которых имеется множество вариаций. В зависимости от назначения измерительного оборудования используют различные типы АЦП. Например, в цифровом осциллографе необходима высокая частота дискретизации, но обычно не требуется высокое разрешение. В цифровых мультиметрах нужно большее разрешение, но можно в определённых пределах пренебречь скоростью измерений. Системы сбора данных общего назначения по скорости дискретизации и разрешающей способности обычно занимают промежуточное место между осциллографами и цифровыми мультиметрами. В оборудовании такого типа используются АЦП последовательного приближения либо сигма-дельта АЦП. Существуют также параллельные АЦП для приложений, требующих скоростной обработки аналоговых сигналов и интегрирующие АЦП с высокими разрешением и помехоподавлением. В разработанной системе сбора данных оптимально использовать АЦП ADS1258 сигма-дельта архитектуры. Выбор обусловлен наилучшим, с точки зрения построения системы сбора данных, сочетанием характеристик: разрешением (24 разряда), количеством каналов (16 несимметричных или 8 дифференциальных) и оптимальным соотношением цена-качество.

Вычислительный модуль

Вычислительный модуль представляет собой плату, “сердцем” которой является микроконтроллер 1986BE4Y1 компании Миландр. Входными сигналами для которого являются данные с интерфейсных выходов АЦП, передаваемых по интерфейсу SPI (Serial Peripheral Interface). Вычислительный модуль выполняет функцию обработки полученной информации, вывода её на встроенный дисплей и передачи данных через интерфейсный модуль на устройство конечного пользователя. Дополнительные входы микроконтроллера позволяют использовать цифровые датчики физических величин в дополнение к аналоговым.

Интерфейсный модуль

Внешний вид интерфейсного модуля, которым является плата nRF24L01+ приведен на рис. 3. На модуле расположена основная микросхема 1 типа nRF24L01+, рядом установлен кварцевый резонатор 2 и полосковая антенна 3, интегрированная в топологию печатной платы. Программное обеспечение микросхемы nRF24L01+ устанавливается на производстве. Связь с вычислительным модулем осуществляется в двунаправленном режиме по интерфейсу SPI, для этого предусмотрен 8-ми контактный соединитель. Посредством интерфейсного модуля разрабатываемая система работает с устройством конечного пользователя, которое представляет собой стационарный или портативный компьютер (ноутбук).

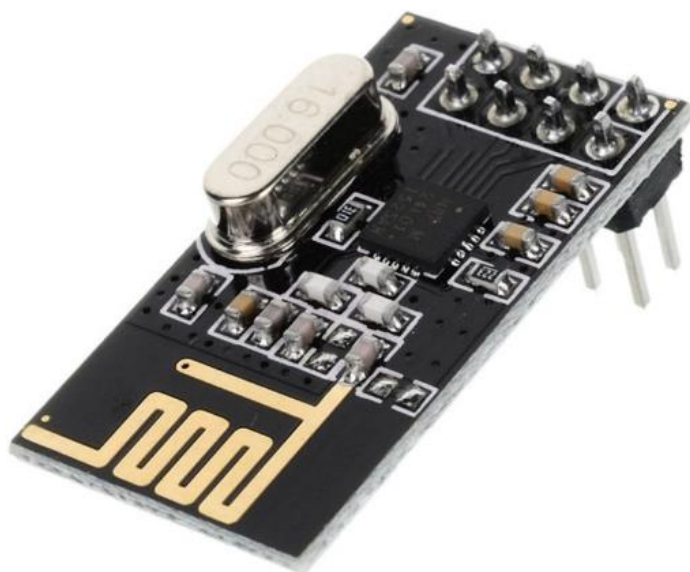


Рис. 3. Внешний вид интерфейсного модуля

Источник вторичного электропитания

Источником внешнего электропитания является сеть постоянного тока напряжением +27 В бортовой сети техники специального назначения, либо сеть переменного тока напряжением 220 В промышленной частоты 50 Гц. В настоящей работе предполагается использовать постоянное напряжение 27 В и для него и разработан источник питания. Он представляет собой импульсный источник вторичного электропитания на основе двухкаскадного обратного преобразователя напряжения. Источник трансформирует напряжение сети постоянного тока с номинальным напряжением 27 В в 5 каналов напряжения постоянного тока с номинальными напряжениями 2.5 В, 3.3 В, 5 В, 10 В и 15 В. Электрическая схема одного из каналов приведена на рис. 4. Подробное описание его работы приведено в [4].

В результате выполнения работы разработана блок-схема системы сбора данных с датчиков физических величин. Выработаны рекомендации по использованию компонентов для создания электронных модулей. Основным преимуществом разработанной конструкции является её модульность, что позволяет гибко реагировать на требования заказчиков и создавать на её

основе промышленные образцы для работы в различных, в том числе агрессивных средах.

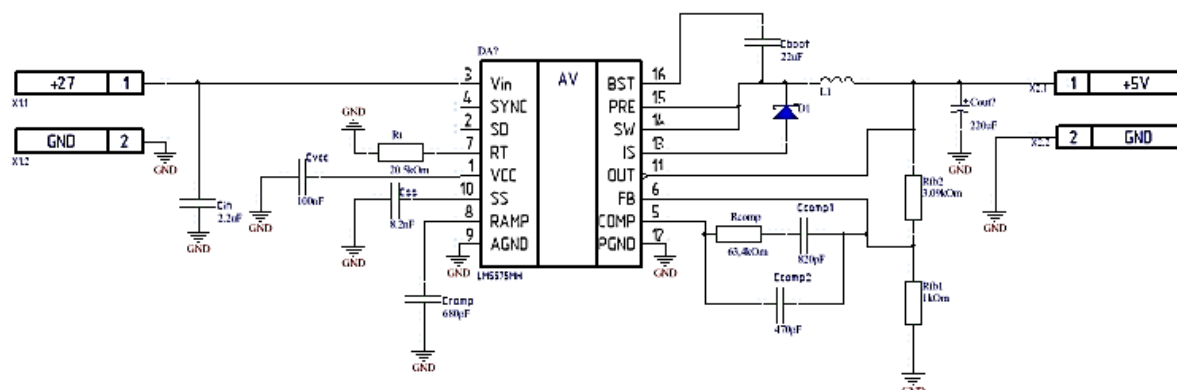


Рис. 4. Электрическая схема канала преобразователя

Список литературы

1. Гаркушин А. А., Расулев Р. П., Нифонтова Е. В., Криштон В. В., Вольхин И. Л. Разработка системы мониторинга с энергоснабжением по оптическому волокну // Физика для Пермского края: материалы региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Пермь, 2022. Вып. 15. С. 112–118.
2. Шарапов В. М., Полищук Е. С., Кошевой Н. Д., Ишанин Г. Г., Минаев И. Г., Совлуков А. С. Датчики: Справочное пособие. М.: Техносфера, 2012. 624 с.
3. Топильский В. Б. Схемотехника аналого-цифровых преобразователей. М.: Техносфера. 2020. 290 с.
4. Ванюков В. В., Вольхин И. Л. Импульсный источник вторичного электропитания // Физика для Пермского края: материалы региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Пермь, 2022. Вып. 15. С. 106–111.

БИОМЕТРИЧЕСКАЯ АУТЕНТИФИКАЦИИ ПО ВЕНОЗНОМУ РИСУНКУ ЛАДОНИ

М. А. Давыдов, И. Н. Черепанов

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

Биометрический способ аутентификации личности по венозному рисунку ладони — относительно новая технология, позволяющая обеспечить значительную степень бесконтактности, что позволит пользоваться ей в случаях необходимости повышенной гигиены. Также данный способ является безопасным в плане защиты от краж, так как рисунок вен является одним из наиболее безопасных биометрических параметров.

Ключевые слова: биометрия; аутентификация личности; венозный рисунок ладони

BIOMETRIC AUTHENTICATION BY PALM VENOUS PATTERN

M. A. Davydov, I. N. Cherepanov

Perm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

The biometric method of identity authentication based on the venous pattern of the hand is a relatively new technology that allows for a significant degree of contactlessness, which will allow it to be used in cases of increased hygiene. Also, this method is safe in terms of protection against theft, since the vein pattern is one of the most secure biometric parameters.

Keywords: biometry; identity authentication; venous palm pattern

Биометрическая система должна отвечать заданным требованиям к точности распознавания, скорости и ресурсам, быть безвредной для пользователей, приниматься целевой аудиторией и быть достаточно устойчивой к различным мошенническим методам и атакам на систему [1].

Одними из наиболее важных требований к биометрической системе являются уникальность и постоянство биометрического параметра, используемого для распознавания. Даже в случае полной уникальности биометрическая система должна быть достаточно чувствительной, чтобы иметь возможность точно различать образцы, полученные от разных людей.

У сканирования венозного рисунка ладони есть много преимуществ. Визуальная структура рисунка вен ладони является уникальной для каждого человека. Кроме того, локализация артерий, вен и капилляров тоже индивидуальна [2].

Уникальное строение сети венозных сосудов человека окончательно формируется уже к 12 годам и почти не меняется в течение жизни. Таким образом, венозная биометрия может функционировать аналогично системе

распознавания отпечатка пальца с той разницей, что «венозный» сканер считывает рисунок вен с расстояния 3 – 9 см и не требует прикосновения.

Вероятность обнаружения двух людей с одинаковым рисунком вен очень мала. Исследования пространственного распределения клеток показывают автоматическое формирование кровеносных сосудов и миграцию клеток с целью создания связанной сосудистой сети [3]. Возможное расположение сети вен, принадлежащих руке человека, можно увидеть на рисунке 1.

Второе свойство – это постоянство рисунка вен. Система биометрического распознавания полезна только в том случае, если человек может быть идентифицирован при последующих сканированиях на разных периодах времени. Для кровеносных сосудов существует три процесса, которые могут частично или полностью изменить их сеть:

- естественные изменения сосудистой системы в течение жизни здорового человека;
- изменения в сосудистой сети вследствие травм или заболеваний;
- изменения кровеносных сосудов вследствие хирургических вмешательств.

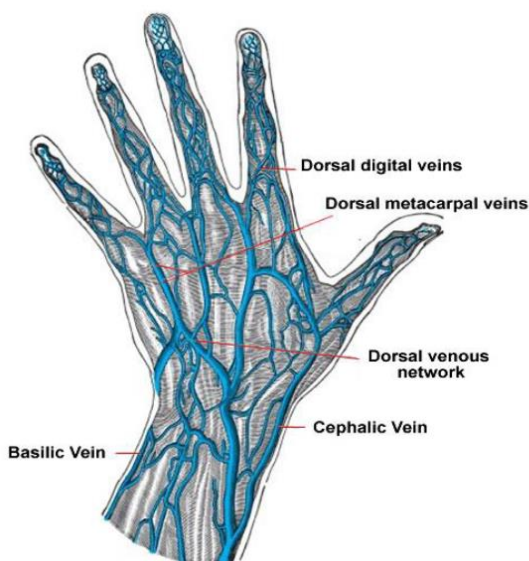


Рис. 1. Возможное расположение сети вен руки человека [2]

Исходя из генеза кровеносных сосудов человека во время развития, большинство различий в структуре по мере взросления человека связаны с общим размером и положением кровеносной системы. Вены станут толще или тоньше, или будут иметь неровности, но общий путь останется в основном неизменным. Принимая во внимание тот факт, что на эту модель не влияют поверхностные раны или рваные раны кожи, она является приемлемым биометрическим параметром для сканирований в долгосрочной перспективе [2]. В крайних случаях, таких как хирургическое вмешательство, которое может изменить – путем разрезания, перенаправления, трансплантации и

т.д. – модель вены, биометрическое устройство может повторно зарегистрировать человека или компенсировать изменения между двумя последовательными сканированиями с помощью автоматизированных алгоритмов.

С точки зрения постоянства, использование рисунка вен в качестве биометрической характеристики является правильным, поскольку это параметр с предсказуемыми изменениями в течение жизни человека, а виды операций или заболеваний, которые могут полностью изменить модель в области кисти, редки и могут быть компенсированы путем повторного сканирования. Тем не менее, чтобы свести к минимуму сложность алгоритмов сканирования, обнаружение рисунка вен следует выполнять у лиц, близких к совершеннoлетию, для менее радикальной модификации сети кровеносных сосудов от одного сканирования к следующему. В [4] отмечается, что в течение взрослой жизни не происходит значительного роста, а общепринятый интервал неизменности структуры вен составляет от 20 до 50 лет. В более позднем возрасте сосудистая система уменьшает свои размеры и изменяет траектории движения.

Различные исследования, касающиеся узоров вен, указывают на приемлемость этого параметра как сильного биометрического признака при соблюдении требуемых условий сканирования. Отпечатки пальцев и сканирование радужной оболочки имеют преимущество в виде более сложных шаблонов и могут работать правильно даже в далеко не идеальных условиях. С другой стороны, вены сложны, но общая модель имеет меньше извлекаемых функций и требует идеальных отсканированных изображений для обеспечения высокой скорости распознавания.

Основное преимущество узоров вен как биометрического признака заключается в совокупности влияющих аспектов. Большинство биометрических характеристик согласуются без серьезных недостатков, что позволяет технологии потенциально заменить другие методы.

Узоры вен руки почти не видны при обычном освещении, однако можно получить их изображение, если подвергнуть воздействию инфракрасного излучения. Из-за отличных друг от друга скоростей поглощения инфракрасного излучения в различных типах тканей устройство для сканирования вен способно точно определять местоположение вен, игнорируя артерии и окружающие ткани. Для достижения этого эффекта освещение должно осуществляться под плотным «тканевым оптическим окном», которое находится в диапазоне длин волн от 700 до 900 нм, что соответствует ближней инфракрасной части спектра электромагнитного излучения.

Изображение получается благодаря активному поглощению инфракрасного излучения раскисленным гемоглобином (Hb), который течёт в венозных сосудах. Немного меньше поглощает окисленный гемоглобин (HbO₂), находящийся в артериях (рис. 2). Еще меньше на поглощение инфракрасного излучения в заданном диапазоне влияет вода (H₂O), которая очень часто встречается в тканях, но имеет очень низкую скорость

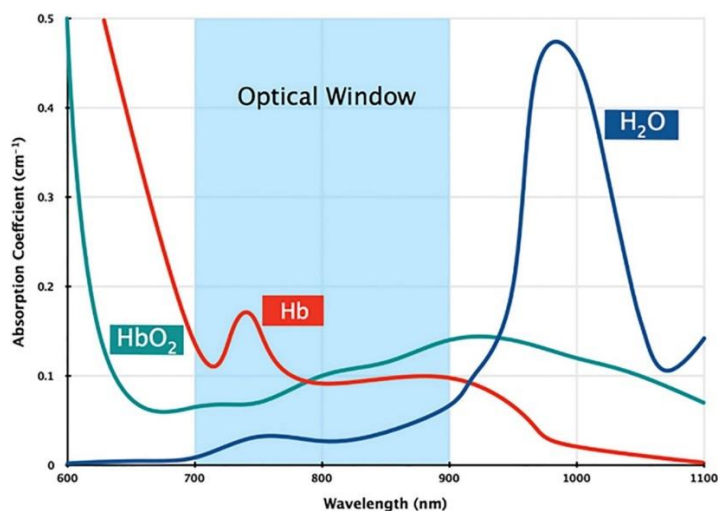


Рис. 2. Окно оптического излучения ближнего инфракрасного диапазона [5]

поглощения в этой конкретной области. Если выбрать длину волны больше 900 нм, то вода будет поглощать слишком много фотонов, что будет мешать получению необходимого изображения.

Гемоглобин является основным компонентом эритроцитов, содержащихся в кровотоке (примерно 96%). Гемоглобин переносит кислород из легких по артериям и помогает в транспортировке углекислого газа из тканей по венам обратно в легкие. Высокий уровень поглощения связан с тем, что одна клетка эритроцита содержит около 280 миллионов молекул гемоглобина [5].

Наличие крови в венах руки так же является параметром достоверности биометрического параметра, так как это доказывает жизнеспособность, а если кровь перестанет течь по сосудам, то четкого и возможного обработке изображения не получится.

Таким образом, с использованием инфракрасного излучения в диапазоне 760 – 870 нм можно получить изображение, готовое к обработке, однако надо учитывать еще несколько факторов:

- тканевая оптическая диффузия;
- глубина сканируемых вен;
- фильтрация излучения, связанной с водой в тканях;
- диффузные и зеркальные отражения от внешних слоев кожи.

Статистически максимальное расстояние проникновения инфракрасного излучения составляет 3 мм, и это накладывает некоторые ограничения на количество и качество извлеченного рисунка вены.

Источник освещения должен быть однородным по всей области, степень освещенности должна оставаться одинаковой для различных снимков, а контраст результирующего изображения должен быть достаточно резким, чтобы уменьшить потребность в сложных алгоритмах постобработки изображений. Полученное изображение рисунка вен под инфракрасным излучением можно увидеть на рисунке 3.

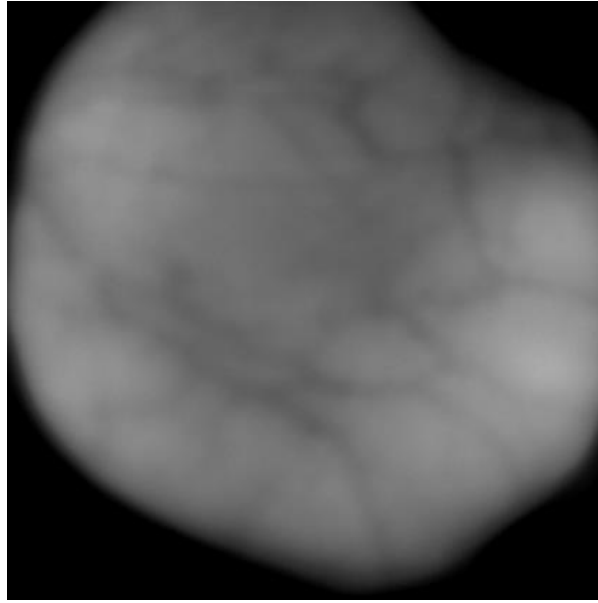


Рис. 3. Изображение рисунка вен под инфракрасным излучением

Для получения узора вен, готового к шифрованию необходимо наложить на изображение несколько фильтров.

Фильтр Гаусса (1) используется для размытия изображений, является по сути фильтром нижних частот. Для двумерного пространства этот фильтр дает поверхность, контуры которой представляют собой концентрические окружности с нормальным распределением относительно центральной точки:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{\frac{-x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где x, y – координаты точки, а σ – среднеквадратическое отклонение нормального распределения. Размытие необходимо для отсека лишнего шума, которые помешают дальнейшей обработке (рис. 4а).

После фильтра Гаусса необходимо инвертировать изображение, для выделения вен белым цветом (рис. 4б). После инвертирования изображение обрабатывается фильтром Габора (2). Такая фильтрация необходима для сегментации рисунка вен (рис. 4в).

$$g(x, y; \lambda, \theta, \psi, \sigma, \gamma) = e^{\frac{-x'^2+\gamma^2 y'^2}{2\sigma^2}} \cos\left(2\pi \frac{x'}{\lambda} + \psi\right), \quad (2)$$

где $x' = x\cos\theta + y\sin\theta, y' = -x\sin\theta + y\cos\theta$. λ – длина волны множителя-косинуса, θ – определяет ориентацию нормали параллельных полос, ψ – сдвиг фаз в градусах, σ – ширина полосы пространственной частоты, γ – коэффициент сжатия.

После фильтрации Габором изображение бинаризируется и скелетизируется (рис. 4г) для получения матрицы, состоящей из нулей и единиц, представляющей собой узоры вен, толщиной в 1 – 2 пикселя.

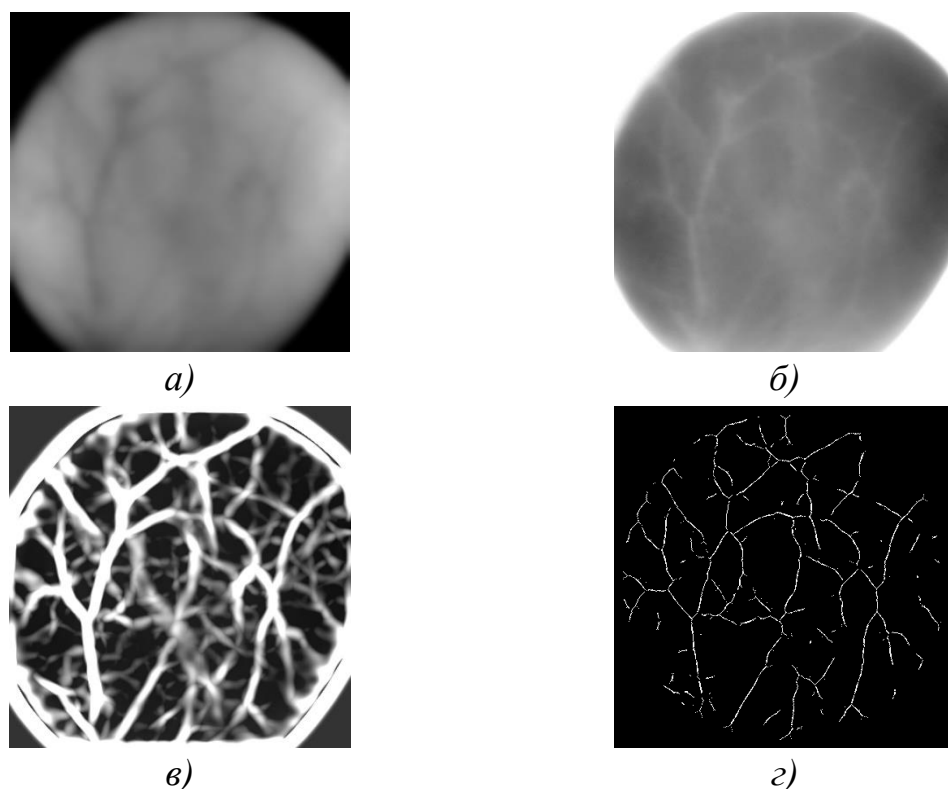


Рис. 4. Изображение вен после: а) фильтра Габора; б) инвертирования; в) фильтра Габора; г) скелетизации

Список литературы

1. *Phillips P. J., A. Martin, Wilson C. L., Przybocki M.* An introduction evaluating biometric systems // *Computer*. 2000. Vol. 33(2). P. 56–63.
2. *Zheng H.* Static and dynamic analysis of near infra-red dorsal hand vein images for biometric applications: Doctoral dissertation. The University of Central Lancashire, 2017. 102 p.
3. *Gamba A., Ambrosi D., Coniglio A., de Candia A. et al.* Percolation, morphogenesis, and burgers dynamics in blood vessels formation // *Physical review letters*. 2003. Vol. 90(11). 118101.
4. *Wayman J. L.* Technical testing and evaluation of biometric identification devices // *Biometrics*. Springer, Boston, MA, 1996. Chapter 544. P. 345–368.
5. *Crisan S.* Novel perspective on hand vein patterns for biometric recognition: problems, challenges, and implementations // *Biometric Security and Privacy*. Springer, Cham, 2017. P. 21–49.

О НЕДОСТАТКАХ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ И РЕМОНТОМ ОБОРУДОВАНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ КЛАССА ERP

М. В. Жужгов, В. А. Семёнов

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

В работе перечислен ряд распространенных ошибок, совершаемых при составлении работ и задач по техническому обслуживанию и ремонту оборудования в корпоративных информационных системах класса ERP.

Ключевые слова: техническое обслуживание и ремонт оборудования (ТОиР); ERP-системы

ABOUT THE SHORTCOMINGS OF EQUIPMENT MAINTENANCE AND REPAIR MANAGEMENT IN ERP-CLASS INFORMATION SYSTEMS

M. V. Zhuzhgov, V. A. Semenov

Perm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

The paper lists a number of common mistakes made in the preparation of works and tasks for the maintenance and repair of equipment in corporate information systems of the ERP class.

Keywords: maintenance and repair of equipment (MRO); ERP systems

Этапы обработки заказа технического обслуживания и ремонта оборудования (заказа ТОРО) [1] в типовой корпоративной информационной системе (КИС) обычно представляются в виде сопоставления соответствующих действий пользователей в КИС и изображают их при помощи блок-схем - начиная от формулировки требований по ТОРО, и заканчивая выполнением определенного действия (операции) и завершением задачи [2]. Чтобы рабочий процесс обслуживания использовался в качестве эффективного средства коммуникации, он должен содержать достаточную информацию по определению последовательности действий с точки зрения того, что требуется, кто отвечает за выполнение задачи, когда требуется выполнение задачи и как выполнить задачу в КИС. При первоначальном составлении процесса управления заказом ТОРО следует определить, какую ценность добавит то или иное действие, сколько времени потребуется для его выполнения, как оно будет взаимодействовать с другими процессами и какие риски, вероятно, будут связаны с этим действием. На рис. 1 показан типичный процесс выполнения работ по ТОРО, содержащий основную информацию [3].

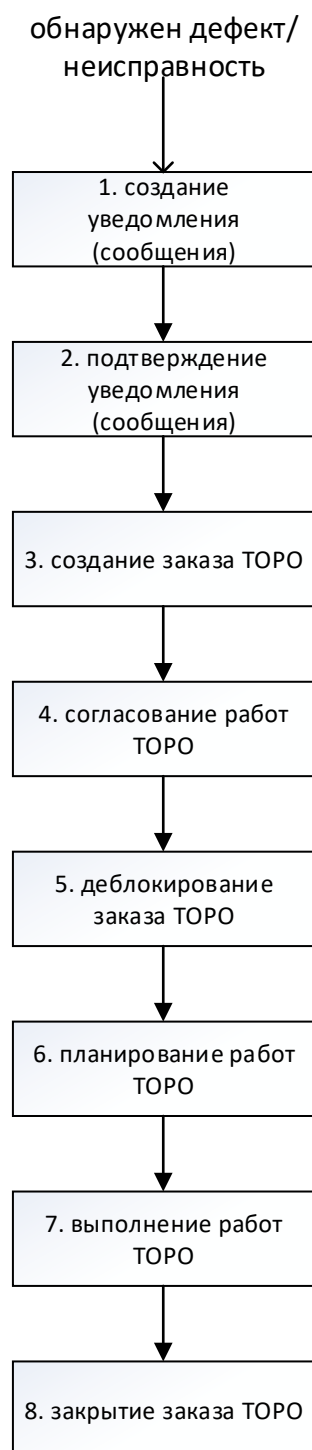


Рис. 1. Блок-схема последовательности обработки заказа ТОРО в КИС

Рассмотрим ряд распространенных недостатков, допускаемых при составлении работ и задач по ТОРО в информационных системах класса ERP.

1. Сложные процессы выполнения работ ТОРО

Многие компании используют бизнес-процессы, разработанные в ходе внедрения модуля ТОРО, в качестве учебных пособий, но эти процессы зачастую являются слишком детализированы и сложны в процессе обучения. В одном из случаев компания использовала рабочий процесс, состоящий из

последовательности 75 действий при объяснении обязанностей своим новым пользователям. При наличии сложного бизнес-процесса пользователи приходят в замешательство и разочарование, и неизменно считают модуль ТОРО «недружелюбным к пользователю» и «сложным в использовании». Соответственно, необходимо, чтобы процессы по выполнению работ ТОРО оставались простыми. Процессы, состоящие из последовательности более десяти действий, часто плохо воспринимаются конечными пользователями.

2. Процессы выполнения работ по ТОРО, которые не используются во время подготовки перед запуском в эксплуатацию КИС

Иногда учебные пособия и материалы для конечных пользователей разрабатываются отдельно от самих процессов ТОРО. Это приводит их к неприятию новой системы, поскольку нет четкой корреляции между учебным материалом и процессом выполнения работ по ТОРО. Кроме того, в процессах, в которых указаны индивидуальные обязанности, конечным пользователям трудно определить, какие разделы обучения применимы к ним. Наиболее эффективным будет учебный материал, в котором сопоставляются и детализируются отдельные этапы процесса выполнения работ по ТОРО. Таким образом, существует четкая связь между учебными упражнениями («как») и процессами технического обслуживания («что и кто»). Соответствующее учебное мероприятие также должно быть четко указано в рабочем процессе.

3. Недостаточное количество вариантов отчетности в ERP системе для поддержки процессов ТОРО

Считается, что конечные пользователи системы способны сами разрабатывать свои собственные варианты предоставления отчетности в ERP системе (оперативные отчеты с использованием возможностей редактирования данных) для определения списка сообщений и заказов ТОРО в различных стадиях обработки рабочего процесса. Однако такая практика нежелательна по следующим причинам: большинство новых пользователей системы считают, что функция онлайн-разработки отчетов сложна в настройке и использовании. Во-вторых, новые пользователи не имеют достаточного представления о том, как работает система сообщений и заказов ТОРО, а также не имеют представления о смысле и содержании кодов пользовательских статусов обработки заказа ТОРО, которые изменяются на протяжении всего процесса выполнения работ – данные знания необходимы при разработке различных вариантов отчетов, в которых будут отображаться корректные данные о заказах ТОРО и сообщениях. В-третьих, важно, чтобы все пользователи имели одинаковый формат отчета. Это включает в себя последовательность сортировки сообщений и заказов ТОРО в градации от наиболее критичных к менее важным, а также поля, представленные в отчете. В-четвертых, любыми изменениями в рабочем процессе после создания заказа ТОРО, например, введение нового этапа подтверждения, можно легко управлять, если имеется

несколько общих отчетов для их отслеживания. Пользователи даже не будут знать об этих изменениях, что усилит их восприятие стабильности системы или процессов.

Таким образом, нецелесообразно - и даже может быть опасной практикой – требовать от пользователей разработки собственных отчетов. Считается важным для безопасного и эффективного управления работами по ТОРО предоставлять пользователям общие варианты и шаблоны для каждого действия в процессе ведения документооборота, а также предоставлять пользователям возможность запускать эти варианты во время выполнения своих производственных задач.

4. Неэффективность схем принятия решений

При проведении работ в рамках ТОРО должен быть принят ряд технических и финансовых решений. Схемы принятия решений предоставляют собой возможность убедиться, что заказ на выполнение работ или сообщение содержат корректную информацию, в то время как финансовые схемы принятия решения предоставляют возможность убедиться в наличии достаточных средств для выполнения указанного ТОРО. Далее приводится список действий, которые могут быть встроены в рабочий процесс ТОРО:

1. Утверждение сообщения – когда руководитель соглашается с тем, что требуется техническое обслуживание, приоритет задания выбран корректный, выбрано корректное функциональное местоположение и что сообщение содержит достаточно информации, чтобы гарантировать, что оно может быть обработано дальше без непрерывных запросов информации от создателя сообщения.
2. Подтверждение заказа ТОРО – когда супервайзер проверяет полный объем рабочего задания, чтобы убедиться, что в рабочем задании указаны корректный объем рабочих затрат, запасных частей, специальных инструментов, документация и т.д. Помимо обеспечения приемлемости объема, существует также возможность утвердить финансовые обязательства.
3. Деблокирование заказа ТОРО – это действие, которое инициирует процесс получения ресурсов, указанных в заказе на выполнение работ (т.е. запасных частей, рабочей силы, специальных инструментов и т.д.) в дату, указанную в заказе на выполнение работ. Планировщик обычно является лицом, согласующим рабочий заказ, поскольку он/она может затем контролировать, когда запасные части будут зарезервированы или, начнется процесс покупки.
4. Техническое закрытие заказа ТОРО означает, что задание было выполнено в соответствии с заданием на выполнение работ и что вся история была завершена и все последующие работы были определены. Обычно это делается в процессе заключительной проверки руководителем ТОРО.

Во многих организациях обслуживающая бригада – это единственные люди, участвующие в процессе от создания сообщения до закрытия рабочего заказа. Это может быть дорогостоящей и потенциально опасной практикой,

поскольку в этих случаях руководители операций ТОРО не принимают активного участия в рабочем процессе технического обслуживания, чтобы подтвердить приоритет заданий или объем выполняемых работ. Делегирование фактических задач по ТОРО соответствующей бригаде не означает также делегирования ответственности за принятие решений. Для обеспечения эффективного принятия решений в отношении рабочего процесса управления важно ограничить количество элементов принятия решений и четко распределить ответственность за каждое принятое решение между уполномоченным, хорошо подготовленным лицом, принимающим решения.

5. Расплывчатые рекомендации по сбору истории ТОРО

Выполнение работ по ТОРО включает в себя сбор информации об истории изменения заказа ТОРО как часть процесса закрытия последнего. Обычно требуется следующая информация:

1. В закодированном формате указывается «что было не так», «что вызвало это», «какой части объекта был нанесен ущерб» и «что было сделано для устранения ущерба» (т.е. указание ущерба, коды причин, коды объектов и коды действий в сообщении).
2. Краткое описание того, что было сделано, и какая последующая работа требуется (обычно упоминается в подробном тексте сообщения).
3. Время, затраченное на выполнение задания (часть подтверждения времени).

Рекомендации о том, куда именно записывать историю обслуживания, не всегда понятны пользователям. Подробный текст заказа ТОРО может быть указан в пяти независимых текстовых полях: в месте подробного текста сообщения, в месте подробного текста заказа ТОРО, в месте подробного текста подтверждения, в описании подробного текста кода причины и в месте подробного текста операции заказа ТОРО. Без надлежащих рекомендаций бригада технического обслуживания, как правило, вводит подробные описания выполненных работ в подробный текст подтверждения – поле, которое часто даже не просматривается аналитиками данных технического обслуживания заказов ТОРО.

Другая часто встречающаяся проблема связана с подтверждением временных затрат в заказе ТОРО: должно ли подтверждаться только время ремонтных работ или в него также должно быть включено время на получение разрешений по проведению данных работ, время по получению запасных частей и соответствующей документации? Должно ли также быть подтверждено время на выполнение работ? Существует ли предел допустимых отклонений между тем, что было запланировано в рабочем задании, и тем, что было окончательно подтверждено?

Аналитики данных должны понимать соответствующие проблемы и неопределенности, касающиеся сбора истории по обслуживанию заказов ТОРО, прежде чем пытаться анализировать эти данные. Без уточнения этих проблем последующий анализ будет неточным, а корректирующие действия неэффективными.

6. Эффективность процесса выполнения работ по ТОРО не отслеживается

В большинстве компаний нередко бывают периоды, когда количество работ, отведенных на выполнение ТОРО больше, чем людей, выполняющих эту работу. В таких случаях может возникнуть переполнение количества заказов ТОРО на выполнение работ. В процессе выполнения работ есть ряд определенных задач, задержка по обработке которых нежелательна – например, подтверждение сообщений, создание заказа на выполнение работ и их техническое закрытие. Задержка не должна допускаться особенно для последних двух упомянутых действий из-за риска, что заказы на выполнение работ с высоким приоритетом могут быть не выполнены вовремя. Невыполненные заказы по профилактическим работам могут остановить генерацию будущих заказов на выполнение работ (в зависимости от того, как были настроены планы обслуживания). Чтобы убедиться, что отставание отслеживается и должным образом корректируется, руководитель технического обслуживания или планировщик должны регулярно создавать оперативные отчеты в ERP-системе по каждому из произведенных действий в процессе управления работ по техническому обслуживанию. Многим компаниям это не удастся, и часто только после серьезного сбоя они осознают ценность регулярного представления этих отчетов.

7. Отсутствие понимания связей между процессами, происходящими как в модуле ТОРО, так и в модуле управления материалами

Главным недостатком при работе в модуле ТОРО ремонтные бригады и специалисты по планированию отмечают анализ наличия доступных запасных частей (материалов) или время, когда они будут доставлены на склад. Частично проблема заключается в неточной каталогизации запасных частей в системе, но самой большой проблемой является отсутствие знаний о модуле управления материалами [4]. И в связи с этим у специалистов ТОРО зачастую возникают следующие вопросы:

1. Как пользователю узнать, занесен ли материал в каталог (есть ли сведения о материале в системе)?
2. Прикреплен ли материал где-нибудь к спецификации?
3. Как пользователь узнает, сколько товаров есть на складе и где они находятся?
4. Каково ожидаемое время доставки для товара, не имеющегося в наличии (т.е. товаров, приобретенных с использованием заявок на закупку и заказов на закупку)?
5. Как пользователь может узнать, где находится материал в данный момент обработки заказа ТОРО (например, был ли запрос на покупку преобразован в «запрос ценового предложения», был ли создан заказ на покупку и т.д.)?

Вывод

В данной статье перечислены наиболее существенные недостатки при работе в модуле ТОРО корпоративных информационных систем класса ERP. Существующая задача по оптимизации бизнес-процессов в данного рода систем является актуальной и решается построением нового вида корпоративных информационных систем на базе мобильных решений и технологий, в которых будет встроен инструментарий по решению вышеупомянутых проблем и задач не только в модуле ТОРО, но и в остальных модулях системы.

Список литературы

1. *Campbell J. D.* Uptime: strategies for excellence in maintenance management. Portland, Or.: Productivity Press, 1995. 204 p.
2. SAP Maintenance Order [Электронный ресурс]. URL: <https://erproof.com/pm/free-training/sap-maintenance-order/> (дата обращения: 14.06.2022).
3. SAP PM – Обзор [Электронный ресурс]. URL: <https://coderlessons.com/tutorials/sap/uznaite-sap-pm/sap-pm-kratkoe-rukovodstvo> (дата обращения: 13.06.2022).
4. SAP MM – Обзор [Электронный ресурс]. URL: <https://coderlessons.com/tutorials/sap/izuchite-sap-mm/sap-mm-kratkoe-rukovodstvo> (дата обращения: 13.06.2022).

УНИВЕРСАЛЬНАЯ МЕТЕОСТАНЦИЯ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ КОМПОНЕНТОВ

И. В. Кадочиков^{a,b}, В. Ю. Горбушин^{a,b}, Д. С. Торопицын^{a,b},
А. П. Рябов^{a,b}, И. Л. Вольхин^{a,b}, А. А. Гаркушин^{b,c}, О. Д. Шилова^b

^aПермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

^bПАО Пермская научно-производственная приборостроительная компания,
614990, Пермь, 25 Октября, 106

^cПермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29

Разработана схема и изготовлена универсальная метеостанция на основе цифровых компонентов. Конструкция собрана в пластиковом корпусе. Показана работоспособность готового устройства. С использованием метрологически поверенной камеры глубокого холода проведены исследования температурных датчиков метеостанции. точности измерения температуры датчиками BMP280 и DHT22. Установлено, что с вероятностью 0,95 погрешности измерения температуры составляют $\pm 0.2\%$ для DHT22 и $\pm 0.7\%$ для BMP280. Рекомендовано более точные измерения следует проводить с помощью датчика DHT22. Для бытовых измерений температуры подходят оба исследованных датчика.

Ключевые слова: метеостанция; микропроцессор; температура

UNIVERSAL WEATHER STATION BASED ON DIGITAL COMPONENTS

I. V. Kadochikov^{a,b}, V. Y. Gorbushin^{a,b}, D. S. Toropitsyn^{a,b},
A. P. Ryabov^{a,b}, I. L. Volkhin^{a,b}, A. A. Garkushin^{b,c}, O. D. Shilova^b

^aPerm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

^bPAO Perm Scientific Production Instrument Company,
106 25 Oktyabrya St., 614990, Perm

^cPerm National Research Polytechnic University,
29 Komsomolsky Pr., 614990, Perm

A scheme has been developed and a universal meteorostation based on digital components has been manufactured. The structure is assembled in a plastic case. The operability of the finished device is shown. With the use of a metrologically verified deep cold chamber, studies of the temperature sensors of the weather station were carried out. accuracy of temperature measurement by BMP280 and DHT22 sensors. It was found that with a probability of 0.95, the temperature measurement errors are $\pm 0.2\%$ for DHT22 and $\pm 0.7\%$ for BMP280. It is recommended that more accurate measurements should be carried out using the DHT22 sensor. Both of the investigated sensors are suitable for household temperature measurements.

Keywords: meteorostation; microprocessor; temperature

Большое значение для обеспечения работоспособности и комфорта работников имеют условия окружающей среды. Если температура в помещении или уровни давления и влажности в ней значительно отличаются от оптимальных, то сотрудники будут быстро уставать, что приведёт к снижению их продуктивности, а при долговременном воздействии неблагоприятных условий персонал может начать испытывать проблемы со здоровьем. Не менее важную роль отслеживание указанных показателей имеет в домашних условиях, где неоптимальные условия могут нанести вред здоровью жильцов, а также в теплицах и террариумах, в которых важно соблюсти условия содержания различных экземпляров флоры и фауны. Настоящая работа решает поставленную задачу путем разработки и изготовления универсальной метеостанции на основе цифровых компонентов.

В ходе выполнения работы разработана метеостанция на основе микроконтроллера Arduino в схеме которого использован модуль реального времени RTC с встроенными опциями установки даты, времени, настройки будильника, а также отслеживания ряда внешних факторов, таких как влажность, атмосферное давление и температура. Блок-схема устройства приведена на рис. 1. Центральное место занимает отладочная плата Arduino UNO R3 представляющая собой микроконтроллер Arduino UNO с аналоговыми и цифровыми разъемами. К ним подключены цифровые следующие датчики: Датчик 1 – сенсор влажности и температуры DHT22; Датчик 2 – сенсор давления и температуры BMP280; Датчик 3 – часы реального времени DS3231. Информация выводится на два одинаковых экрана. LCD экран – дисплей формата 1602 с I2C адаптером. Управление

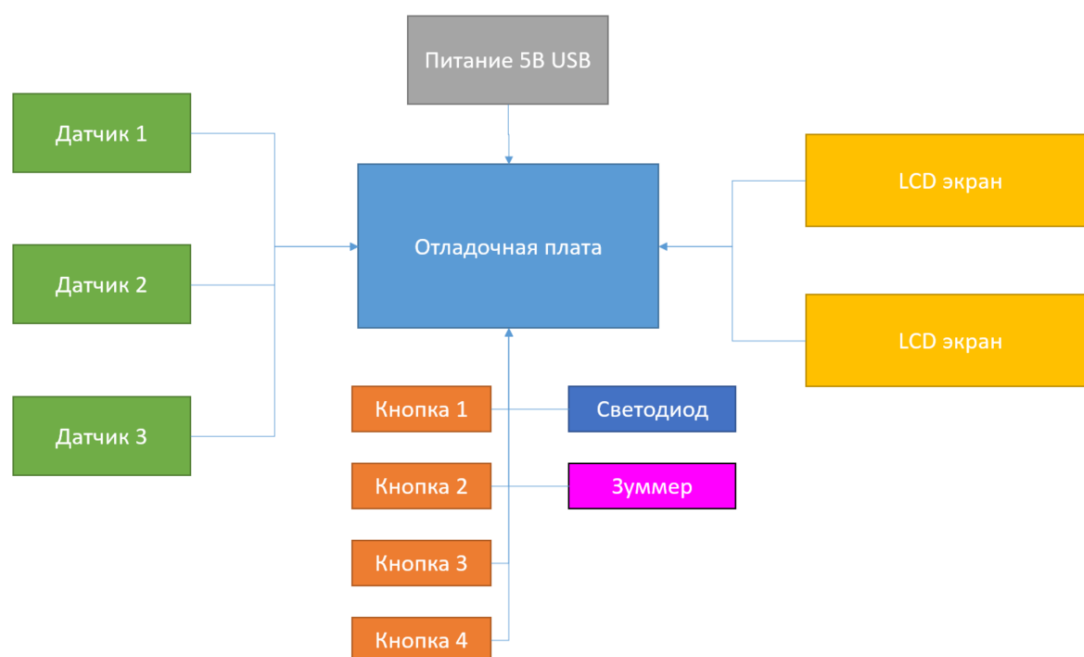


Рис. 1. Блок-схема универсальной метеостанции

происходит кнопками:

кнопка 1 – тактовая кнопка, выполняющая функцию клавиши «MODE»;

кнопка 2 – тактовая кнопка, выполняющая функцию клавиши «ALARM»;

кнопка 3 – тактовая кнопка, выполняющая функцию клавиши «+»;

кнопка 4 – тактовая кнопка, выполняющая функцию клавиши «-».

Внешний источник питания через USB-разъем подает постоянное напряжение 5 В на отладочную плату Arduino.

Управление устройством осуществляется четырьмя кнопками на верхней панели (рис. 2). В основном режиме работы «Дата-Время» устройство выводит на экраны, текущие время и дату. При нажатии правой кнопки «MODE» переключается режим работы на отображение данных с датчиков. Повторное нажатие кнопки «MODE» приводит к переключению режима отображения на страницу с настройкой будильника. Следующее нажатие той же кнопки позволит вернуться к режиму отображения времени и даты.

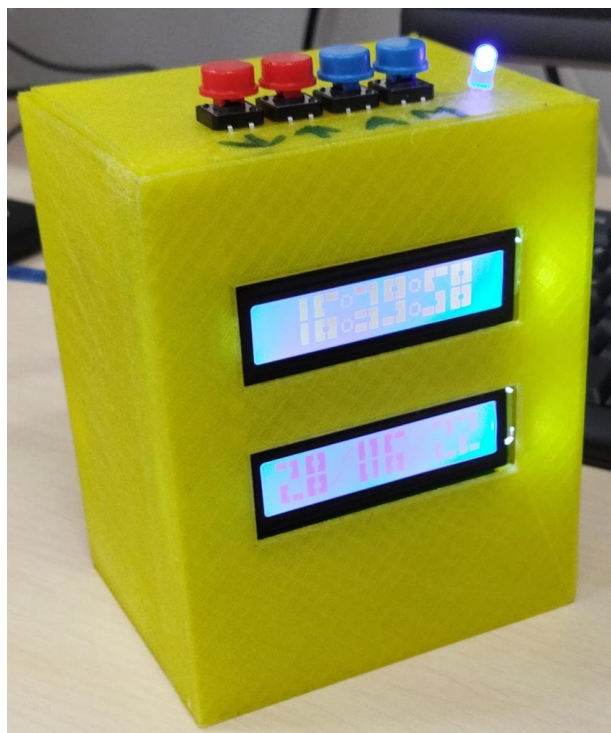


Рис. 2. Фотография универсальной метеостанции

Использование второй справа кнопки «ALARM» в режиме настройки будильника позволяет переключить курсор с часов на минуты и обратно. При удержании этой кнопки не менее 2 секунд пользователь может включить будильник, срабатывающий в установленное время. Включить или выключить будильник можно в любом режиме работы устройства путем удержания кнопки «ALARM». Светодиод загорается при активированном будильнике, а при выключенном индикация отсутствует.

Настройка будильника происходит кнопками «↑» (вверх) и «↓» (вниз), однократное нажатие позволяет увеличить или уменьшить устанавливаемое значение на единицу.

Технические характеристики использованных датчиков приведены в табл. 1 и 2.

Табл. 1. Характеристики датчика температуры и давления BMP280 [1]

Рабочий диапазон давлений	300÷1100 гПа
Относительная точность (для 700... 900 гПа, 25°C)	±0.12 гПа, эквивалентно ±1 м
Абсолютная точность (950... 1050 гПа, 0...+40°C	±1 гПа
Смещение температурного коэффициента (25... 40°C, 900 гПа)	1.5 Па/К, эквивалентно 12 см/К
Цифровые интерфейсы	I ² C (до 3.4 МГц) SPI (3 и 4 провода, до 10 МГц)
Потребляемый ток	2.7 мкА для частоты дискретизации 1 Гц
Рабочий диапазон температур	−40÷+85°C

Табл. 2. Характеристики датчика температуры и влажности DHT22 [2]

Источник тока	3,3÷6 В постоянный ток
Сигнал на выходе	Цифровой сигнал через одиночную шину
Чувствительный элемент	Полимерный конденсатор
Рабочий диапазон	Относительная влажность от 0 до 100%; Температура от −40 до +80 °C
Точность	Отн. влажность ±2% (Макс. ±5%); Температура <±0.5°C
Разрешение, чувствительность	Отн. влажность 0.1%; Температура 0.1 °C
Повторяемость	Отн. влажность ±1%; Температура ±0.2°C
Размеры	22×28×5 мм

В устройстве используется жидкокристаллический экран LCD-1602A основные характеристики которого представлены в табл. 3.

Табл. 3. Характеристики экрана LCD-1602A [3]

Количество символов		16 символов × 2 строки
Габариты		80×36×14 мм
Область просмотра		73.8×27.1 мм
Символ	Размер в точках	5×7 точек
	Размер	2.95×4.35 мм
	Площадь расположения	3.65×5.05 мм

Точка	Размер	0.55×0.5 мм
	Площадь расположения	0.6×0.55 мм
Диаметр монтажного отверстия		2.7 мм
Вес		50 г

С помощью программы Altium Designer созданы схемы: электрическая соединений Э4, а также перечень компонентов и модулей устройства [4].

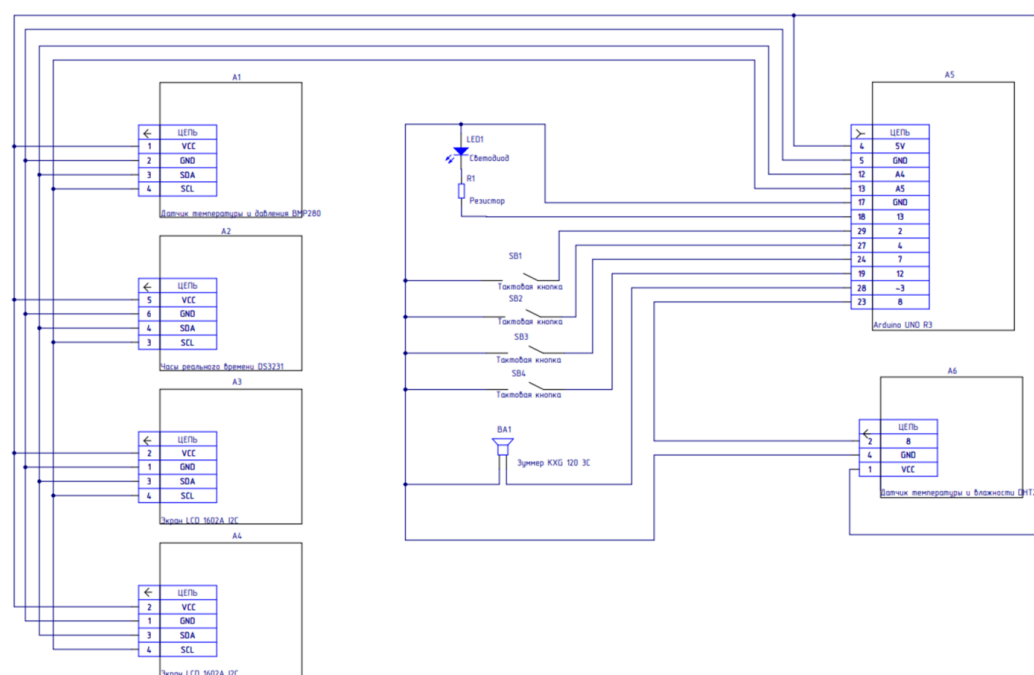


Рис. 3. Электрическая схема

Схема электрических соединений (рис. 3) содержит описание всех подключений между модулями и компонентами устройства, а также указание портов и разъемов, по которым это подключение происходит.

Корпус метеостанции напечатан на 3D-принтере из цветного пластика PETG.

Проведено исследование точности измерений двух температурных датчиков DHT22 и BMP280. Исследование датчиков проводилось в камере глубокого холода EVCLIM. В ходе эксперимента температура изменялась в диапазоне от 0 до 50°C с шагом в 5 градусов. Каждое измерение проводилось при достижении температурного баланса после 5-минутной выдержки при выбранной температуре. Выбор диапазона изменений соответствует ожидаемому диапазону реальных рабочих температур.

Результаты исследований представлены на рис. 4. На графике по горизонтальной оси отложена температура в камере в градусах Цельсия, по вертикальной – температура, измеренная датчиками. Для удобства анализа для каждой температуры изображена гистограмма первый столбец которой соответствует температуре в камере (задана с точностью одной десятой градуса), второй – показаниям датчика DHT22, а третий – BMP280.

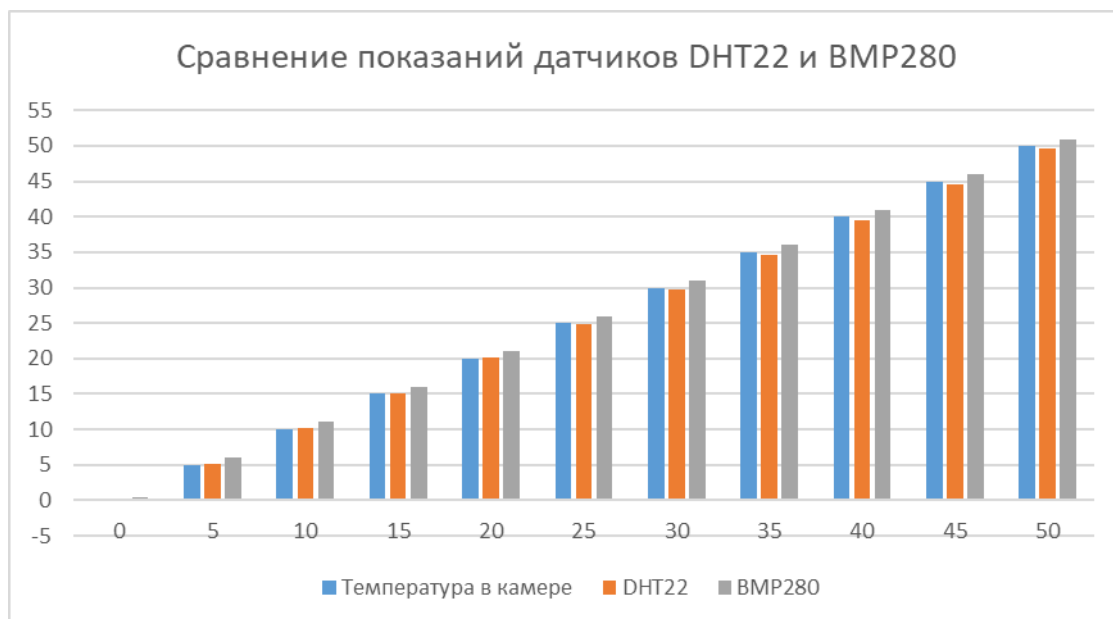


Рис. 4. Результаты температурных исследований

Исследовалась точность измерения температуры датчиками BMP280 и DHT22.

В результате анализа данных рис. 4 определены величины случайной погрешности измерений температуры датчиками. Они составили с вероятностью 0.95: $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ для DHT22 и $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ для BMP280.

Установлено, что более точные измерения следует проводить с помощью датчика DHT22. Для бытовых целей, как правило, измерение температуры достаточно проводить с точностью $\pm 1\%$. Для этих измерений подходят оба исследованных датчика температуры.

Список литературы

1. BMP280 Digital Pressure Sensor [Электронный ресурс]. URL: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP280-DS001-11.pdf> (дата обращения: 05.07.2022).
2. Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf> (дата обращения: 05.07.2022).
3. WaveShare LCD1602 [datasheet] [Электронный ресурс]. URL: https://supereyes.ru/img/instructions/simvolnyy_displey_lcd1602_datasheet.pdf (дата обращения: 05.07.2022).
4. Сабунин А. Е. Altium Designer. Новые решения в проектировании электронных устройств. М.: Солон-Пресс, 2009. 432 с.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОГО СТРИМИНГА

Д. О. Корякина

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

В последние годы было проведено несколько крупномасштабных внедрений систем P2P live video. Существующий и будущий P2P системы видео в реальном времени будут предлагать большое количество каналов, при этом пользователи будут часто переключаться между каналами. Настоящая статья посвящена математическому моделированию и численному исследованию процессов оптимизации работы технологии передачи видео при наличии пиринга (P2P) (peer-to-peer) на примере данных технологии Teleport Media.

Ключевые слова: пиринг (P2P) (peer-to-peer); оптимизация; линейное программирование

OPTIMAL STREAMING MODEL DEVELOPMENT

D. O. Koryakina

Perm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

There has been numerous large scale implementations of P2P live video systems in the recent years. Today's and future's P2P live video systems will offer a large number of channels, with users switching between channels frequently. This article is devoted to mathematical modeling and numerical study of the optimization of the video transmission technology in the presence of peering (P2P) (peer-to-peer) using Teleport Media technology data as an example.

Keywords: peering (P2P) (peer-to-peer); optimization; linear programming

Настоящая работа посвящена математическому моделированию и численному исследованию процессов оптимизации работы технологии передачи видео при наличии пиринга (P2P) (peer-to-peer) на примере данных технологии Teleport Media. Актуальность работы связана с тем, что в современном мире наблюдается тенденция к росту не только количества, но и разнообразия способов передачи данных с помощью технологии P2P, развитие которой сейчас представляет особенный интерес.

В последние годы было несколько крупномасштабных промышленных развертываний P2P-видеосистем [1]. Недавние исследования показали, что сотни тысяч пользователей могут одновременно участвовать в этих системах [2]. Почти все P2P-видеосистемы для трансляций прямых эфиров предлагают несколько каналов. Так, например, PPLive и его конкуренты имеют более 100 каналов; будущие пользовательские системы, вероятно, будут иметь тысячи, если не миллионы каналов прямых эфиров. Существующие P2P-видеосистемы делятся на две категории: древовидные и одноранговые. Большая часть предыдущих исследовательских работ сосредоточена на

проектировании и совершенствовании изолированных P2P-поточковых систем, в то время как оптимизации ресурсов многоканальных P2P-поточковых систем уделяется мало внимания, чему и посвящена настоящая работа.

Teleport Media – это технология, реализованная в виде программного кода JavaScript, которая соединяет между собой несколько браузеров с одной и той же открытой веб-страницей с видеоплеером [3].

Ключевая задача Teleport Media – передать видеофайл (видеофайлы) с устройства А, где он хранится (поскольку зритель А уже успел посмотреть этот кусок видео), на устройство Б, которое еще не успело его получить. Каждый раз, когда происходит такое скачивание, программа Teleport Media, работающая на устройстве Б, «запоминает» объем полученного файла и время, которое было потрачено на его скачивание с устройства А. Затем эти данные передаются на сервер статистики.

Таким образом, исследуемая система представляет собой сеть передачи данных, предназначенная для доставки видео через интернет. Через сеть передачи данных транслируется конечное, возможно большое количество различных видео, а число зрителей каждого из видео роликов случайным образом меняется от 0 до N. Каждый сервер обладает конечным значением ресурсов: хранилище для видео (V), скорость раздачи видео (r). Кроме этого, в системе имеется возможность передачи видео между самими зрителями, такой процесс далее будем называть пирингом.

Для моделирование рассматриваемой системы введем понятие универсального стриминга, при котором все пиры в системе удовлетворяют свой спрос. При подключении пира к какому-то каналу, он смотрит видео с битрейтом (скоростью потока данных) этого канала. Другая естественная метрика эффективности – это ожидаемое число каналов, находящихся в состоянии универсального стриминга.

Математически такой универсальный стриминг может быть описан с помощью введения ресурсного индекса [4], который может быть вычислен как

$$\sigma_j(M_j) = \frac{b_j - o_j}{d_j(M_j)},$$

где b_j – общая полоса пропускания доступная для канала j , d_j – требуемая пирами полоса пропускания, o_j – требуемая полоса для раздающих пиров. Эти характеристики, в свою очередь, могут быть вычислены, как

$$b_j = v_j + \sum_{i \in N_j} u_i,$$

$$o_j = r_j n_j,$$

$$d_j = r_j M_j,$$

где n_j – количество пиров, u_i – скорость раздачи пира, J – число каналов, v_j – емкость сервера для стрима, r_j – скорость раздачи канала (которая требуется), M_j – количество пиров, смотрящих канал, при этом

$$0 \leq M_j \leq n.$$

Если ресурсный индекс больше 1, то возможно достижение универсальный стриминга, то есть полная обеспеченность каждого зрителя ресурсами, что и является целью работы.

Вычисление ресурсного индекса значительно упрощается для случая, когда число пиров достаточно велико (> 1000), а скорость загрузки пира всегда одинакова. В этом случае, согласно [4], характеристикой универсального стриминга становится параметр

$$\alpha = \sum_{j=1}^J \frac{r_j \rho_j}{u - r_j}.$$

Раз для универсального стриминга необходимо $\sigma_j \geq 1$, значит для этого нового параметра $\alpha < 1$. Проверив соответствуют ли значения параметра α универсальному стримингу на модельной задаче, при любом значении скорости u мы получили, что параметр $\alpha < 1$. Таким образом, можно считать, что в общем случае в реальной системе наблюдается универсальный стриминг. Это действительно так, наличие зрителей, которые могут раздавать видео-фрагменты приводит к тому, что исследуемый параметр всегда меньше 1. Таким образом, можно заключить, что работа настоящей системы является оптимальной с точки зрения теории универсального стриминга.

Помимо пиринга для раздачи видео зрителям в системе используются специальные раздающие сервера. Чтобы добиться состояния универсального стриминга, число серверов должно зависеть от количество смотрящих зрителей. Таким образом, вопрос оптимизации работы технологии можно сформулировать следующим образом, как именно распределить ресурсы сервера среди зрителей без учета и с учетом раздачи ими файлов (пиринга), чтобы оптимизировать затраты на сервер и чтобы как можно меньшее число зрителей получило отказ.

Математическая задача такой оптимизации сводится к необходимости максимизировать значение функции:

$$F(M_j) = \sum_{j=1}^n r_j M_j.$$

При условиях:

$$\sum_{j=1}^n r_j M_j \leq v, 0 \leq M_j \leq M_{maxj}, j = \overline{1, N},$$

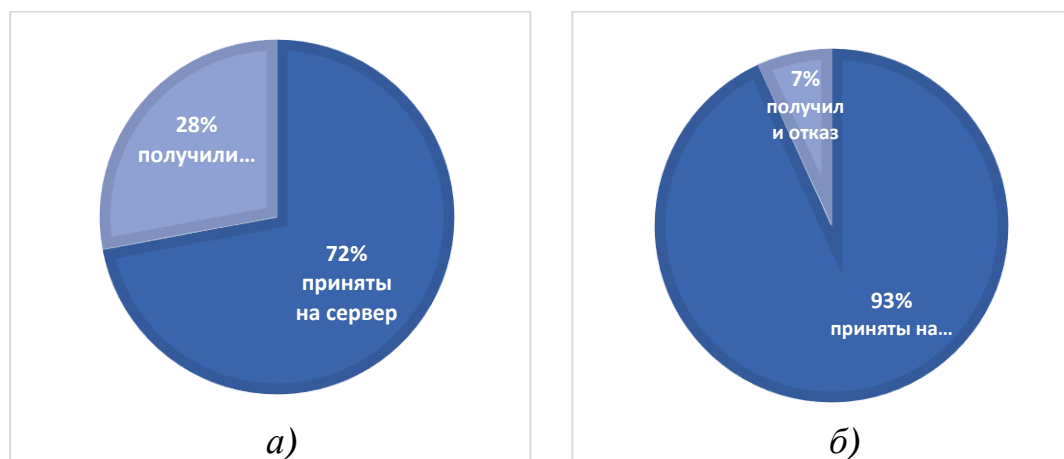
где v – заданная емкость сервера.

Таким образом, мы получаем стандартный вид задачи оптимизации, которая может быть решена методами линейного программирования [5, 6].

Для определения эффективности работы метода сравним два случая, первый — когда система работает в режиме заполнения сервера по мере поступления прибывающих пользователей, второй — заполнение дополнительного сервера посредством программы оптимизации распределения пользователей.

Для этого были взяты реальные данные пользователей технологии Teleport Media, были проведены вычисления заполнения сервера объемом $v = 500\text{Мбит/с}$ для первого и второго случаев. В случае постепенного заполнения сервера из всего возможного объема было использовано 499.65 Мбит/с, так же из 12350 пользователей, было обслужено всего 8901, а 3449 получили отказ (рисунок а).

Во втором случае, был использован весь возможный объем, 11509 пользователей было обслужено, и всего 841 получили отказ (рисунок б).



*Рисунок. Заполнение дополнительного сервера:
а) неоптимизированное; б) оптимизированное*

Таким образом, сравнивая эффективности разных способов заполнения сервера, можно сказать, что оптимизационная программа позволит более продуктивно воспользоваться имеющимися ресурсами, как с точки зрения обслуживания дополнительных серверов, так и со стороны количества обслуженных пользователей, так как в рамках проведенных вычислений, процент необслуженных пользователей сократился с 28% до 7%.

По статистике, чем больше зрителей у одного видео, тем выше процент трафика, который удастся передавать пирам между собой. В реальности до 80% трафика может быть предоставлено через такую пиринговую сеть. Это означает, что, чем больше зрителей, тем меньше каждый из них в среднем зависит от сервера. Бывают случаи, что некоторые зрители потребляют весь свой трафик от других пиров.

С точки зрения использования дополнительных серверов, стоит выбор какой канал является приоритетным для обслуживания в случае недостаточности ресурсов: канал, где уже высокий процент пиринга, либо канал, где процент пиринга низкий. Для рационального распределения ресурсов свободных серверов необходимо выбирать канал с низким процентом пиринга, потому что в таком случае польза от обслуживания зрителей окажется кратно выше. Иными словами, можно сказать, что если зритель и так получает 80% трафика из пиринга, то при добавлении серверов максимум что может получить компания – 20% трафика. Перед потребителем стоит выбор, получить этот контент с исходного сервера или с сервера технологии телепорт медиа. Если компания отдаст предпочтение зрителям с низким процентом пиринга; зрителям, у которых нет возможности, по каким-либо причинам, воспользоваться преимуществами пиринговой сети или скачать контент с исходного сервера, в этом случае «Телепорт Русь», имеет возможность обслужить весь трафик.

Для компании «Телепорт Русь» оказывается более выгодным обслуживать зрителей на дополнительных серверах с низким процентом пиринга, так как зрители с высоким процентом пиринга обслужены за счет технологии пиринга Teleport Media и обязательства компании перед клиентом, заказчиком услуги, выполнены, а когда процент пиринга низкий, то в таком случае для клиента нет преимуществ работы предоставляемой технологии, и он отказывается сотрудничать с компанией. И если мы с помощью системы/серверов, в приоритет поставим обслуживание зрителей с низким процентом пиринга и клиентов, которые не могут воспользоваться пирингом, то с помощью программы оптимизации появляется возможность рационального распределения этих пользователей на дополнительных серверах, и как показывают вычисления проведенные выше, это позволит сократить количество пользователей, которым было отказано в обслуживании, примерно в 4 раза. Таким образом, компании удастся привлечь большее количество заинтересованных пользователей.

Помимо, работы программы оптимизации, исходя из проведенного анализа различного заполнения нескольких серверов, для продуктивного использования свободных ресурсов компании, необходимо заполнять сервера последовательно. В таком случае, компания имеет возможность реализации универсального стриминга, когда все пиры в системе удовлетворяют свой спрос, то есть часть зрителей обслужена с помощью пиринга, а другая часть максимально загружает дополнительные сервера.

Список литературы

1. Zhang X., Liu J., Li B., Yum Y.-S. P. CoolStreaming/DONet: a data-driven overlay network for peer-to-peer live media streaming // Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Miami, FL, USA, 2005. Vol. 3. P. 2102–2111.

2. *Hei X., Liang C, Liang J., Liu Y., Ross K. W.* A measurement study of a large-scale P2P IPTV system // *IEEE Transactions on Multimedia*. 2007. Vol. 9 (8). P. 1672–1687.
3. Сколковская разработка поддерживает бесперебойные трансляции ЧМ-2018 в интернете [Электронный ресурс]. URL: https://old.sk.ru/news/b/articles/archive/2018/06/20/skolkovskaya-razrabotka-obespechivaet-hdkachestvo-translyacii_0603_-chm2018-v-internete.aspx (дата обращения: 23.04.2022).
4. *Wu D., Liu Y., Ross K.* Queuing network models for multi-channel P2P live streaming systems // *IEEE INFOCOM*. Rio de Janeiro, Brazil, 2009. P. 73–81.
5. *Кобзарь А. И.* Прикладная математическая статистика. М: Физматлит, 2006. 813 с.
6. *Boyd S., Boyd S. P., Vandenberghe L.* Convex optimization. Cambridge university press, 2004. 701 p.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНТНОМ ВОЛОКОННОМ ИСТОЧНИКЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. И. Лунегов, И. В. Лунегов

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

В работе представлен основной способ моделирования физических процессов в работе суперлюминесцентного источника оптического излучения волоконно-оптического гироскопа. Способ основан на создании имитационной модели, где каждый элемент входящий в состав рассматривается как отдельный независимый блок со своей передаточной функцией.

Ключевые слова: математическое моделирование; источник оптического излучения; физические процессы; имитационная модель

COMPUTER MATHEMATICAL MODELING OF PHYSICAL PROCESSES IN A SUPERLUMINESCENT FIBER SOURCE OF OPTICAL EMISSION

A. I. Lunegov, I. V. Lunegov

Perm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

The paper presents the main method of modeling physical processes in the operation of a superluminescent optical radiation source of a fiber-optic gyroscope. The method is based on the creation of a simulation model, where each element included in the composition is considered as a separate independent unit with its own transfer function.

Keywords: mathematical modeling; radiation optical emission; physical processes; simulation model

Жесткие требования к точности, массе, габаритным и эксплуатационным параметрам навигационных гироскопических приборов, а также активное развитие и непрерывное совершенствование элементной базы волоконной и интегральной оптики привели к появлению нового типа инерциальных датчиков угловых перемещений – волоконно-оптическому гироскопу (далее по тексту – ВОГ).

Одной из главных и самых сложных, с точки зрения технологий, составных частей ВОГ является суперлюминесцентный источник оптического излучения или по другому его называют усилитель спонтанной эмиссии (УСЭМ). Он построен на основе оптического волокна, легированного эрбием. Главным образом именно выбор эрбиевого усилителя определяет спектр люминесценции ионов эрбия, лежащим в области длин волн,

характеризующейся минимальными потерями современных кварцевых оптических световодов.

Благодаря использованию УСЭм в качестве широкополосного источника оптического излучения, в ВОГ удастся добиться повышения его чувствительности. Работа таких усилителей зависит от многих факторов, одним из самых значимых является наличие шума сигнала, определяющий тот необходимый уровень оптического сигнала, который обрабатывает фотоприемное устройство, что впоследствии может повлиять на максимально допустимую дальность передачи сигнала. Однако наличие шума источника оптического излучения влияет и на показания самого гироскопа, а именно на его точностные характеристики, уровень общего шума. Работа УСЭм основана на усиленном стимулированном излучении с произвольным выделением фотонов, которые в последствии несут так называемый шум относительной интенсивности (Relative Intensity Noise – RIN). Вклад RIN шумов в общую шумовую составляющую очень велик, он превосходит по уровню все остальные шумы, существующие в ВОГ. Компенсация и подавление шума относительной интенсивности на данный момент является одной из важнейших задач в современной гироскопии [1]. Кроме того, для полного понимания работы всех элементов и процессов, возникающих внутри источника оптического излучения волоконно-оптического гироскопа, необходимо построить математическую модель в одном из программных пакетов, которая позволит понимать происхождение шумов относительной интенсивности, нестабильность работы при изменении температур и других изменениях при внешних воздействующих факторах.

Инструменты проектирования и моделирования широко используются в проектировании оптических компонентов, телекоммуникации приложения и изучение системы. Их использование часто помогает в лучшем понимании работы системы, уменьшении время реализации системы и низкая стоимость производство.

Оптические датчики, такие как оптоволоконный гироскоп (ВОГ) состоит из дискретных оптических компонентов с каждый компонент работает определенным образом, что влияет общую производительность системы. ВОГ – это Интерферометр Саньяка, состоящий из источника оптического, детектора, ответвителя, поляризатора, фазового модулятора и катушки оптоволоконного датчика. Коммерчески доступный ВОГ поставляется с различными техническими характеристиками, определяемые в области его применения. Разработка ВОГ под конкретное приложение требует системного изучения, включая функционирование каждый компонент и их интеграцию [2].

Для моделирования работы всего ВОГ, в том числе источника оптического излучения, необходимо построение имитационной модели с помощью программы Matlab Simulink. Ее можно использовать для конструкции гироскопа, а также для преобразования выхода гироскопа в информацию о скорости вращения.

В имитационной модели каждый оптический компонент рассматривается как отдельный независимый блок, имеющий вход N и выход M, математически представленные передаточной функцией, соединяющая выход со своим входом. Длина волны света, его начальная фаза, амплитуда и показатель преломления среды передачи и другие исходные параметры моделирования. Отдельный независимый блок всех оптических компонентов соединены между собой в одном как интерферометр Саньяка, показанный на рисунке 1 [3].

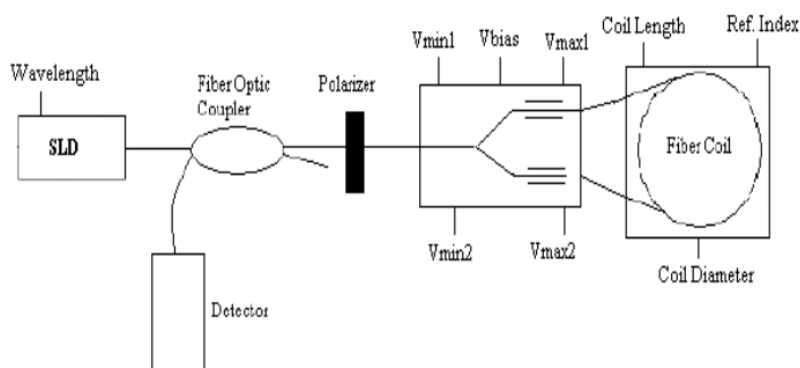


Рис. 1. Интерферометр Саньяка

Эквивалентная блок-схема, используемая в имитационной модели, показана на рисунке 2.

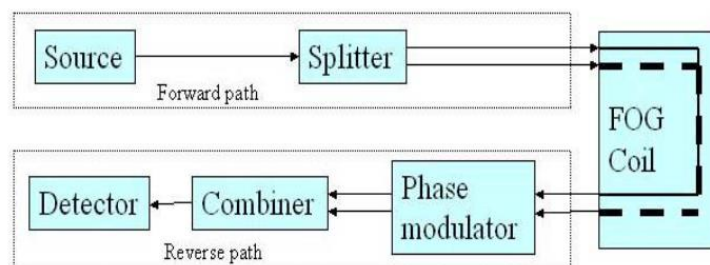


Рис. 2. Эквивалентная блок-схема имитационной модели интерферометра Саньяка

По назначению моделирования, ВОГ разделен на две части, а именно на прямую и обратную. Лазерный источник и сплиттер (разветвитель) разделены в первом разделе, в то время как фазовый модулятор, сумматор и детектор составляют второй раздел. В системе ВОГ, встроенный оптический чип действует как сплиттер (разветвитель) для входящего света и как фазовый модулятор с сумматором для выходящего. Катушка ВОГ имеет два открытых конца, через которые свет распространяется по часовому и против часовой стрелки. Следовательно, два его открытых конца служат входом для прямого пути, а также как выход для обратного пути.

Начальный волновой фронт света в момент времени $t = 0$ проходит через различные этапы гироскопа, претерпевают фазовые и амплитудные

изменения как из-за функциональности компонентов, а также вращение катушки датчика. Наконец свет достигает блока детектора при $t = t_{out}$ в виде интенсивности модулированный сигнал, создаваемый разностью фаз между двумя оптическими сигналами из-за вращения гироскопа. В замкнутом контуре гироскопа электрооптический фазовый модулятор на пути света работает как фазовращающее устройство. Его роль свести к нулю разность фаз, создаваемую Эффект Саньяка и, следовательно, прямое напряжение возбуждения обеспечить меру скорости вращения [3]. Лазерный источник частоты ω_0 с амплитудой A_0 и начальная фаза ϕ_0 работает в импульсном режиме с t_0 в качестве времени включения и t_{off} в качестве времени выключения, как показано на рисунке 3а. Другие функциональные блоки, а именно сплиттер (оптический разветвитель), фазовый модулятор и катушка ВОГ показаны на рис. 3б, в, г, д и е соответственно. Выход каждого функционального блока подключен к входу следующего блока, как показано на рисунке 3 [4]. Блок сумматора объединяет комплексные выходы y_1'' , y_2'' и обеспечивает измеримую интенсивность модулированного сигнала, который обнаруживается детектором. Напряжение нарастания, изменяющееся между $-V_n/2$ и $+V_n/2$, подается на два входа фазового модулятора, расположенных в двухтактной его конфигурации, во время цикла выключения лазера. Напряжение, подаваемое на схему интегрально-оптическую, создает дополнительное изменение фазы на пути света, которое сводит на нет эффект временной задержки из-за эффекта Саньяка.

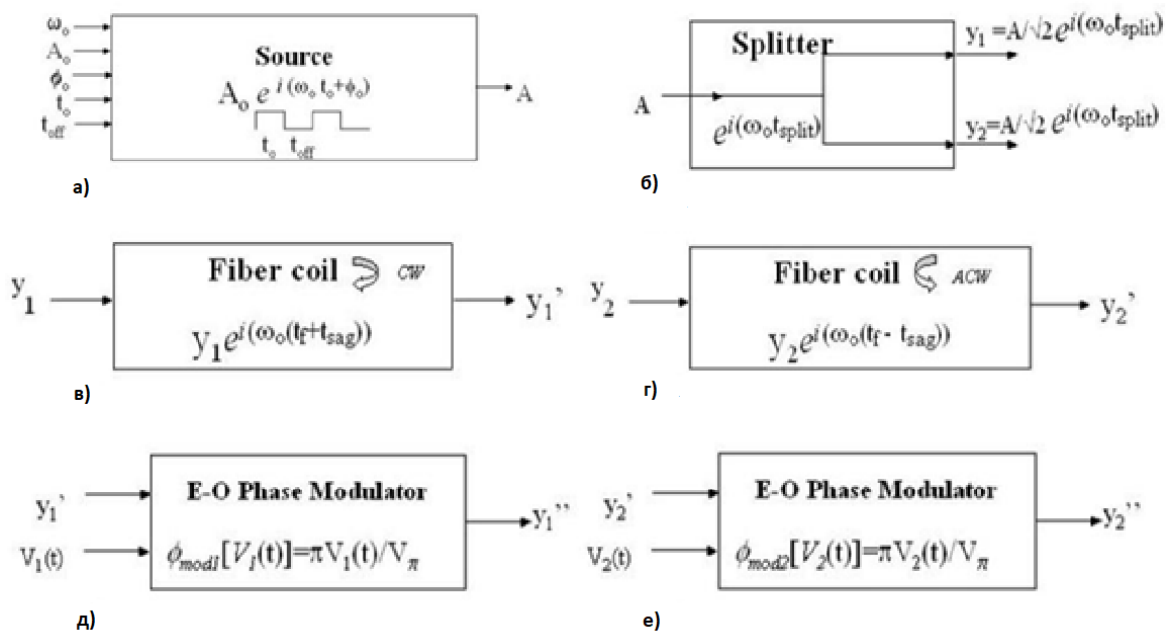


Рис. 3. Модели функциональных блоков интерферометра Саньяка:
а) модель лазерного источника; б) модель сплиттера (разветвителя);
в) модель волоконного контура (первый конец); г) модель волоконного контура (второй конец); д) модель фазового модулятора (первый выход);
е) модель фазового модулятора (второй выход)

Для быстрой и наглядной демонстрации работы любого объекта, включающий в себя большое количество отдельных функциональных блоков и был разработан простой инструмент для моделирования в программной среде Matlab Simulink. Одной из возможных реализаций модели волоконно-оптического интерферометра Саньяка представлена выше. Модель хорошо подходит для понимания работы ВОГ и источника оптического излучения, входящий в его состав. Также модель позволяет отслеживать все изменения физических процессов, происходящие в каждом отдельном компоненте. Тем не менее, модель использует минимальные основные оптические компоненты, необходимые для работы ВОГ [4]. Дальнейшие усилия при разработке полной математической модели суперлюминесцентного источника оптического излучения, включая все оптические компоненты, каждый его элемент, каждый блок и связь между ними, позволят довольно подробно описать его работу и процессы внутри него.

Список литературы

1. *Лунегов А. И., Мушинский С. С., Лунегов И. В.* Компенсация шумов относительной интенсивности источника оптического излучения волоконно-оптического гироскопа методом цифровой обработки сигнала // Физика для Пермского края: материалы региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Пермь, 2021. Вып. 14. С. 211–217.
2. *Sagnac G.* L'ether lumineux par l'effet du vent relatif d'ether dans un interferometer en rotation uniforme // Comptes Rendus d'Academie des Science Francais. 1913. Vol. 95. P. 708–719.
3. *Han J., Ge S., Shen Y., Li X.* Modeling and simulation of digital closed-loop fiber optic gyroscope // Proceedings Of The 6th World Congress On Intelligent Control And Automation. Dalian, China, 2006. P. 1659–1663.
4. *Han J., Ge S., Shen Y.* Implementation of digital detection scheme for closed-loop FOG based on DSP and FPGA // Proceedings of Instrumentation and Measurement Technology Conference. Sorrento, Italy, 2006. P. 2221–2225.

АНАЛИЗ ДАННЫХ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ

С. В. Матарзин, И. Н. Черепанов

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

Разработана методика сбора и анализа данных социальной сети «ВКонтакте» о подписчиках группы «Профбюро» и ССУ физического факультета ПГНИУ. Основные методы сбора и анализа могут быть использованы стартапом для поиска активных блогеров и анализа их аудитории.

Ключевые слова: сбор данных; виды центральности; активность подписчиков

SOCIAL MEDIA DATA ANALYSIS

S. V. Matarzin, I. N. Cherepanov

Perm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

A methodology has been developed for collecting and analyzing data from the «Vkontakte» social network about the subscribers of the Trade Bureau group and the SSU of the Faculty of Physics of Perm State National Research University. The main collection and analysis methods can be used for a startup to find active bloggers and analyze their audience.

Keywords: data collection; types of centrality; subscriber activity

Анализ социальной сети «ВКонтакте» посвящен нахождению «лидеров мнений», наиболее популярных и активных пользователей, которых в дальнейшем можно использовать в качестве распространителей рекламы.

При сборе данных в данной работе рекомендуется опираться на федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ (ред. от 02.07.2021) «О персональных данных». В Статье 6 об условиях обработки персональных данных, пункт 8 и 9 гласят, что обработка персональных данных необходима для осуществления профессиональной деятельности журналиста и (или) законной деятельности средства массовой информации либо научной, литературной или иной творческой деятельности при условии, что при этом не нарушаются права и законные интересы субъекта персональных данных и обработка персональных данных осуществляется в статистических или иных исследовательских целях, за исключением целей, указанных в статье 15 настоящего Федерального закона, при условии обязательного обезличивания персональных данных [1].

API (application programming interface) — это посредник между разработчиком приложений и какой-либо средой, с которой это приложение должно взаимодействовать. API упрощает создание кода, поскольку предоставляет набор готовых классов, функций или структур для работы с имеющимися данными.

В документации API методов «Вконтакте» есть ограничение по сбору количества участников сообщества в 1000 пользователей. Для того, чтобы собрать всех пользователей необходимо использовать дополнительные параметры, благодаря которым, происходит смещение и появляется возможность собирать данные о всех пользователях, подписанных на страницу группы Профбюро и ССУ физического факультета ПГНИУ.

Данные пользователей для удобства дальнейшего использования рекомендуется сохранять в разные папки, отдельно записи со страниц пользователей, поставленные лайки, связи между друзьями.

Для наглядного представления собранной информации о записях на страницах пользователей было принято решение кластеризовать посты. Таким образом, все участники сообщества будут собраны вокруг точек «контентных напряженностей», они и будут являться «лидерами мнений» (рис. 1).

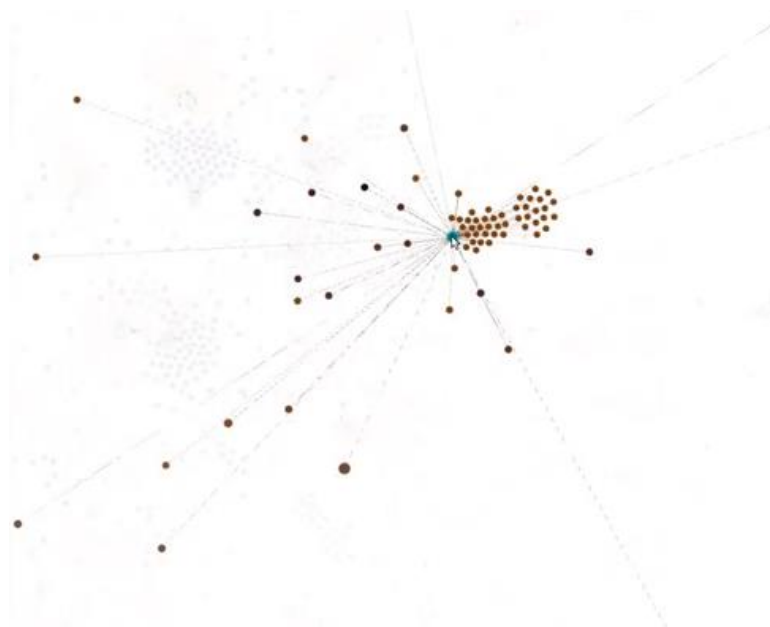


Рис. 1. Точка «контентной напряженности»

На данном участке графа видно, что вокруг точек «контентной напряженности» собраны пользователи, которые в постах на своих страницах использовали одни и те же фразы, что является распространением контента.

На рис. 2 выбран пользователь, который далек от таких точек, но при этом с его публикациями активно взаимодействуют пользователи (ставят лайки). Такие участники сообщества не подходят для поставленной цели, так как эта активность может оказаться ложной и не отображать настоящую активность пользователей.

Помимо того, были найдены «лидеры мнений» по контентным связям, необходимо отдельным методом собрать данные о количестве подписчиков всех пользователей. Проверить, действительно ли пользователи, у которых наибольшее количество подписчиков, являются самыми активными по взаимодействию с аудиторией.

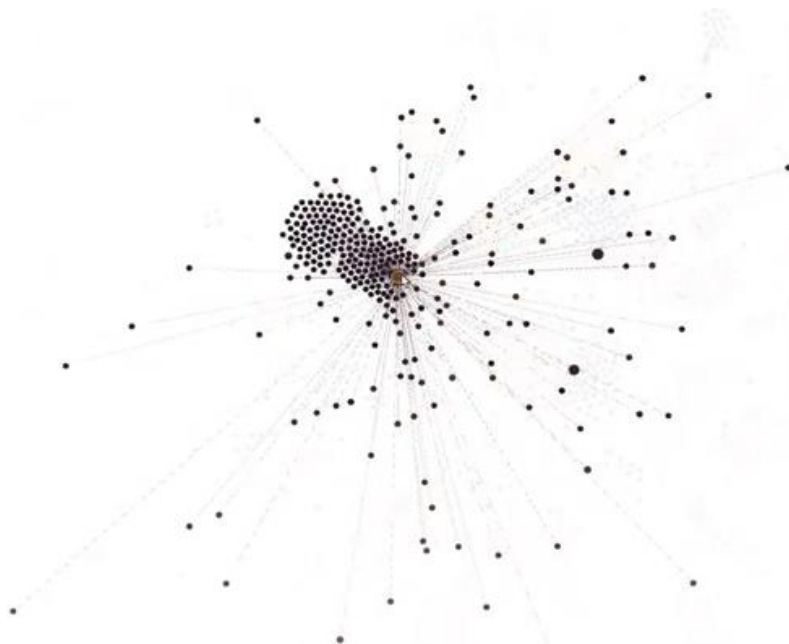


Рис. 2. Пользователь, который не является распространителем контента

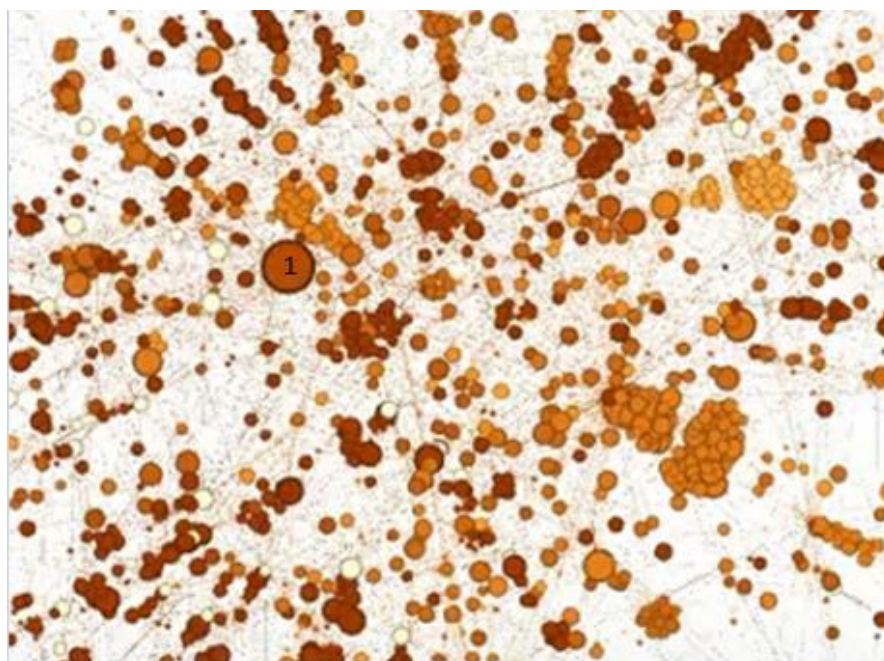


Рис. 3. Построенный граф по количеству подписчиков

На рис. 3 наглядно представлен фрагмент с пользователем, у которого большое количество подписчиков, но необходимо также учитывать то, сколько связей с другими пользователями у этого человека, потому что по цвету уже продемонстрирована не очень высокая активность. На рис. 4 показано количество связей у этого пользователя с его подписчиками и это не является достаточным количеством активности и данный блогер не подходит для поставленной цели.

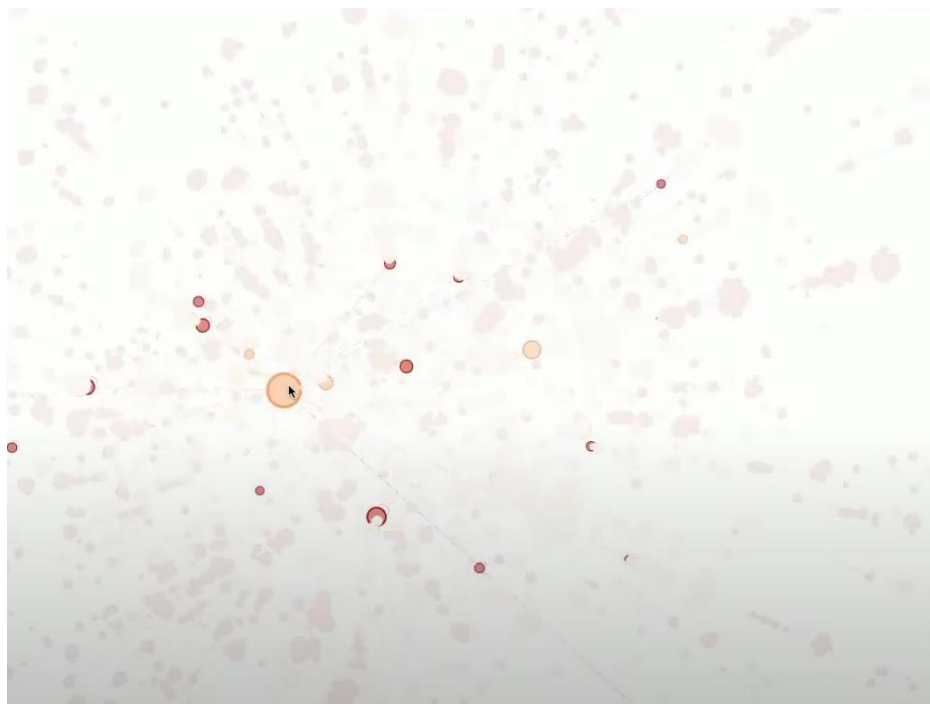


Рис. 4. Пользователь с максимальным количеством подписчиков

На основе собранных данных, рассчитывая гармоническую центральность для каждого пользователя, которая характеризует цвет точки, необходимо построить график, на котором представляется возможность увидеть количество подписчиков у пользователей и их активность аудитории (рис. 5).

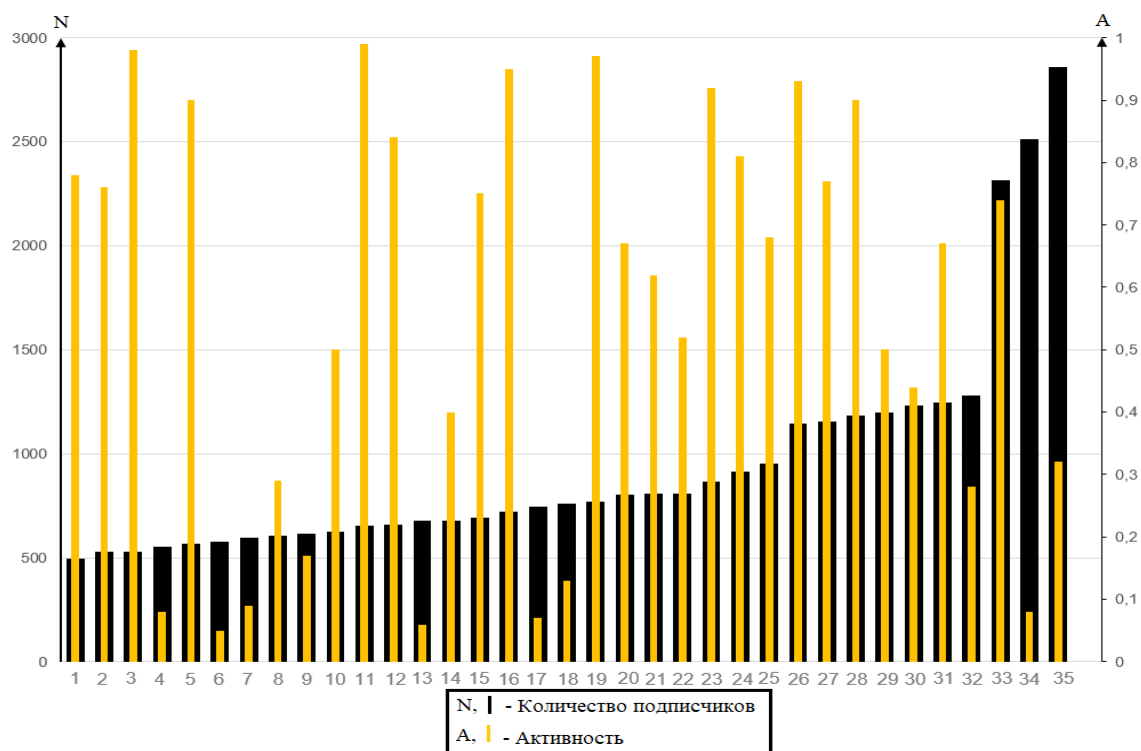


Рис. 5. График распределения количества подписчиков и их активности

Проанализировав данный график, видно, что у 10 пользователей количество подписчиков более 1000, что удовлетворяет поставленной цели, но при этом не у всех подходящая активность. Достаточная активность при достаточном количестве подписчиков наблюдается только у 6 пользователей, они и являются «лидерами мнений» и обладают высоким показателем по численности аудитории, они могут быть использованы в качестве распространителей рекламы.

Список литературы

1. *Борисенко О. В.* Анализ федерального закона № 152-ФЗ «о персональных данных» // Электронное приложение к Российскому юридическому журналу. 2012. №. 2. С. 26–30.

УМЕНЬШЕНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ ПОГРЕШНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Н. И. Опарин^{a,b}, С. С. Мушинский^b, И. Л. Вольхин^{a,b}

^aПермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

^bПАО Пермская научно-производственная приборостроительная компания,
614990, Пермь, 25 Октября, 106

Для уменьшения вибрационной погрешности волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) использована схема четырёхточечной вместо двухточечной модуляции. Проведено математическое моделирование и экспериментальное исследование погрешностей ВОГ. В пределах ошибок измерения результаты математического моделирования и эксперимента совпали. Установлено, что при четырёхточечной модуляции вибрационные ошибки уменьшаются на порядок.

Ключевые слова: гироскоп; волоконная оптика; вибрационная погрешность

REDUCING VIBRATION ERROR OF FIBER-OPTIC GYROSCOPE

N. I. Oparin^{a,b}, S.S. Mushinsky^b, I. L. Volkhin^{a,b}

^aPerm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

^bPAO Perm Scientific Production Instrument Company,
106 25 Oktyabrya St., 614990, Perm

To reduce the vibration error of the fiber-optic gyroscope, four-state modulation scheme was used instead of two-state modulation. Mathematical modeling and experimental study of gyroscopes have been done. Within the measurement errors, the results of mathematical modeling and experiment coincided. It has been established that with four-state modulation, vibration errors decrease by an order of magnitude.

Keywords: gyroscope; fiber optics; vibration error

ПАО «ПНППК» занимается разработкой и производством датчиков и систем для навигации, стабилизации и ориентации подвижных объектов. В том числе волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) различного класса точности. ВОГ широко используется в подвижных объектах морского, наземного, авиационного и ракетного типов. В области волоконно-оптической гироскопии непрерывно ведутся исследования и работы по модернизации и поиску новых решений для повышения технических и экономических характеристик ВОГ. Вопрос повышения точности, надежности, а также улучшения эксплуатационных качеств ВОГ стоит очень остро. Одной из важных задач является уменьшение погрешностей показаний ВОГ при вибрационных воздействиях.

В настоящее время за основу построения оптического блока принимают схему кольцевого интерферометра «с минимальной конфигурацией»,

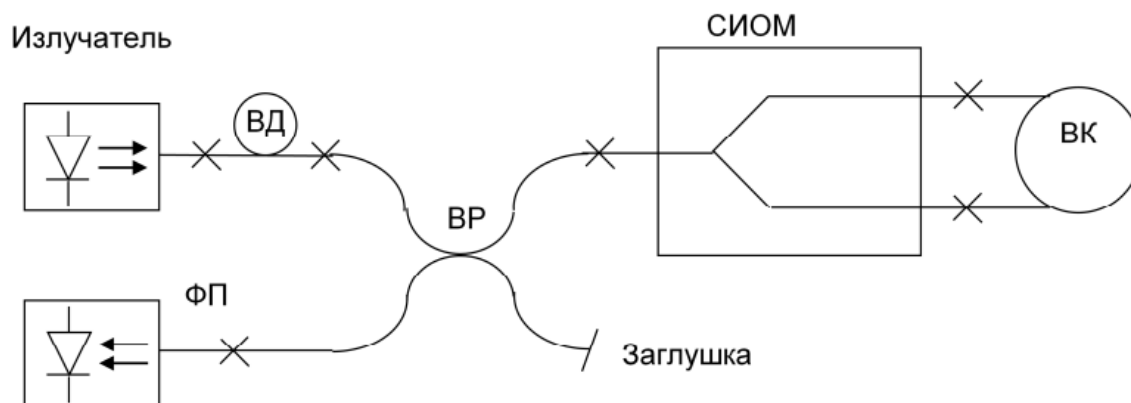


Рис. 1. Оптическая схема «с минимальной конфигурацией»

выполненную в соответствии с рис. 1, которая обеспечивает одинаковый оптический путь для двух световых лучей интерферометра, проходящих чувствительный контур в двух взаимно-противоположных направлениях, исключая тем самым паразитные фазовые подставки на выходе интерферометра из-за разности оптических путей.

Данная схема является закрытой, т.е. возникающий фазовый сдвиг Саньяка компенсируется, а по величине компенсации определяется скорость вращения. Схема интегрально-оптическая многофункциональная (СИОМ) содержит широкодиапазонный низковольтный модулятор, который и позволяет компенсировать разность фаз двух интерферирующих световых лучей. Для того чтобы ввести компенсирующий фазовый сдвиг между двумя оптическими лучами, используется СИОМ, состоящий из Y-делителя и выходных одномодовых интегрально-оптических волноводов, вдоль которых расположены полосковые электрические контакты. На полосковые электрические контакты фазового модулятора в противофазе подается напряжение, амплитуда которого пропорционально меняется от величины $\Delta\varphi$ и которое, в итоге, плавно возрастает или убывает во времени в зависимости от знака $\Delta\varphi$.

Точность ВОГ зависит от множества факторов. Подробная схема наиболее значимых механизмов возникновения погрешностей в ВОГ и вызывающих их причин представлена на рис. 2 [1]. Данные факторы влияют на три ключевых параметра ВОГ: стабильность его показаний, уровень шума в выходном сигнале и стабильность масштабного коэффициента. Основные источники оптических шумов ВОГ и методы борьбы с ними приведены в [1].

Создаваемый оптическими элементами шум приводит к увеличению дрейфа сигнала гироскопа и к ухудшению чувствительности. К основным электронным шумам относятся: дробовый шум фотодиода, тепловой шум усилителя сигнала ФПУ, шум АЦП и ЦАП. При правильно спроектированной электронной схеме обработки минимальный уровень шума в основном ограничивается первыми двумя [1].



Рис. 2. Возникновение ошибок в выходном сигнале ВОГ под действием различных факторов

Причинами вибрационной погрешности ВОГ могут быть изменение интенсивности источника излучения, упругие деформации в контуре ВОГ, модуль перегрузки, действующий перпендикулярно оси чувствительности ВОГ, параметры настройки ПИД-регулятора цепи обратной связи [2].

Было принято считать, что обратная связь обеспечивает линейность рабочей характеристики датчика, а учет нелинейности актуален только для датчика с открытым контуром. Однако в работе [2] описано влияние нелинейности рабочей характеристики интерферометра на работу ВОГ с замкнутым контуром обратной связи. Установлено, что погрешность вызвана второй степенью разложения нелинейной характеристики интерферометра в ряд Тейлора и работа ВОГ с замкнутой обратной связью не устраняет данную погрешность.

Существует три основных способа уменьшения вибрационной погрешности показаний ВОГ:

1. выбор оптимальной глубины модуляции;
2. выбор способа модуляции;
3. уменьшение периода регулирования ПИД-регулятора.

На ПАО «ПНППК» ведутся работы по всем трем способам уменьшения вибрационной погрешности, но в настоящей работе будет рассмотрен второй.

Погрешности ВОГ существенно зависят от выбранного способа модуляции оптического сигнала. Проведенные нами исследования показали, что наилучших результатов снижения вибрационных погрешностей можно добиться при использовании четырехточечной модуляции вместо двухточечной использовавшейся ранее. Графоаналитический метод анализа работы четырехточечной модуляции представлен на рис. 3. Из рисунка

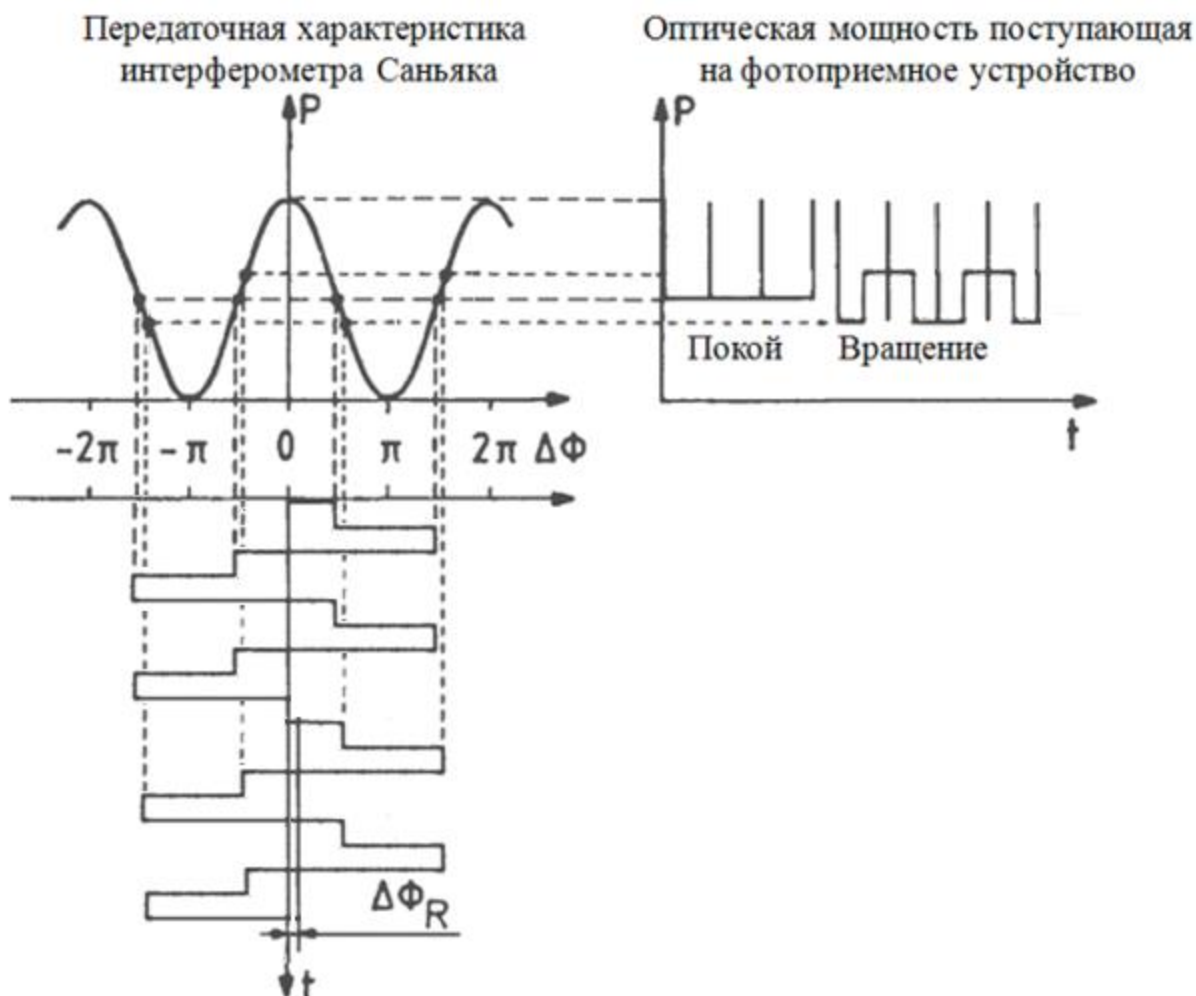


Рис. 3. Четырехточечная прямоугольная смещающая фазовая модуляция

видно, что вместо смещающей модуляции с двумя состояниями, при которой разность фаз интерферометра модулируется между $+\varphi_m$ и $-\varphi_m$, используются четыре состояния φ_m , $a\varphi_m$, $-\varphi_m$, $-a\varphi_m$, где коэффициент a находится из выражения: $\varphi_m + a\varphi_m = 2\pi$. Это достигается с помощью подачи прямоугольного сигнала фазовой модуляции $\pm\varphi_m/2$, $\pm a\varphi_m/2$ с длительностью равной $\tau_g/2$, для каждого состояния, в отличие от $\pm\varphi_m/2$ с длительностью τ_g применяемой в случае двухточечной модуляции.

При обоих описанных типах модуляции амплитуда выходного сигнала остается одинаковой, что позволяет уменьшить вибрационную погрешность при сохранении остальных параметров ВОГ. В зависимости от выбора глубины модуляции (положения рабочей точки) будут меняться основные характеристики, определяющие качество работы ВОГ. На ПАО «ПНППК» проведены исследования влияния глубины модуляции на характеристики гироскопа, результаты проведенных исследований представлены в таблице.

Случайное блуждание угла (Angle Random Walk (ARW)) – величина, используемая для характеристики белого шума гироскопа и практически представляет из себя спектральную плотность шума сигнала угловой скорости.

Таблица. Основные характеристики гироскопа

Параметр	$7\pi/8$	$3\pi/4$	$\pi/2$
Динамический диапазон измеряемых скоростей, °/ч	До 200-250	До 500	До 600
Нелинейность передаточной функции, %	~0.01	~0.007	~0.003
ARW-шумы гироскопа, °/√ч	0.00054	0.000626	0.001819

Как видно из таблицы, чем рабочая точка ближе к π , тем меньше шумовая составляющая. В формуле зависимости динамической ошибки $\omega_{др}$ на одном шаге модуляции $\Delta t_m = 4(t_2 - t_1)$

$$\omega_{др} = -\frac{1}{4} \operatorname{ctg} \varphi_m \cdot \frac{2\pi DL}{c\lambda} \varepsilon^2 (t_1^2 - t_2^2 - t_3^2 + t_4^2),$$

глубина модуляции φ_m стоит под знаком котангенса. Здесь D – диаметр волоконно-оптического контура, L – длина оптического волокна, ε – угловое ускорение. Это означает, что при рабочей точке $\pi/2$, влияние вибрационной погрешности на характеристики гироскопа будет минимальным. Таким образом, выбор между положением рабочей точки $7\pi/8$ и $\pi/2$ зависит от задачи минимизации либо шумовой составляющей показаний гироскопа, либо вибрационной погрешности. Проведено математическое моделирование зависимости вибрационной погрешности ВОГ от уровня вибрационного воздействия в точке $7\pi/8$. Результаты приведены на рис. 4.

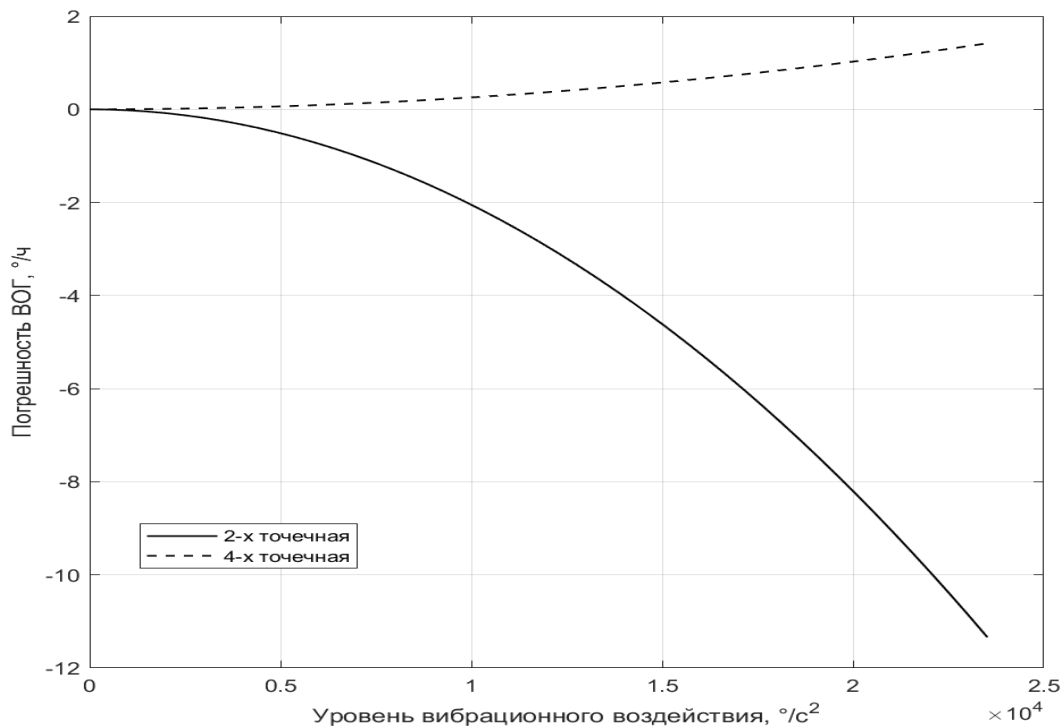


Рис. 4. Моделирование зависимости погрешности ВОГ от углового ускорения в рабочей точке $7\pi/8$

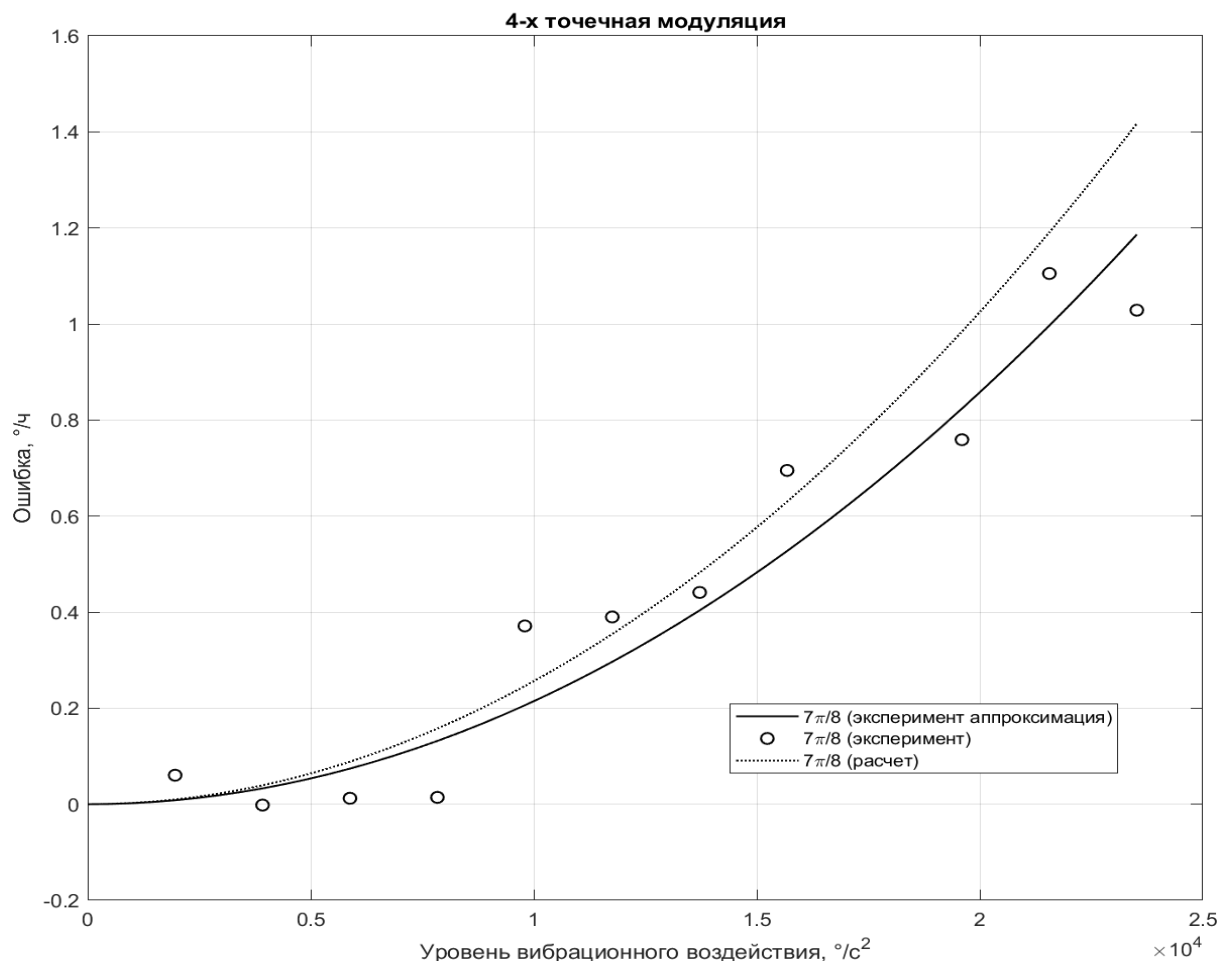


Рис. 5. Зависимости погрешности ВОГ от углового ускорения в рабочей точке $7\pi/8$ экспериментальная и расчётная

Из рис. 4 следует, что при величине вибрационного воздействия $8000^{\circ}/\text{с}^2$ при четырехточечной модуляции накопление ошибки составляет $0.164^{\circ}/\text{ч}$, а при двухточечной – $1.310^{\circ}/\text{ч}$. Улучшение динамической ошибки на порядок. Проведена экспериментальная проверка расчетных зависимостей. Результаты показаны на рис. 5. В пределах ошибок измерения результаты математического моделирования и эксперимента совпали.

Рекомендовано при изготовлении ВОГ использовать четырёхточечную модуляцию вместо двухточечной.

Список литературы

1. Алейник А. С. Исследование и повышение точностных параметров волоконно-оптических гироскопов: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.01. Университет ИТМО, СПб., 2012. 137 с.
2. Микляшев А. В. Погрешность волоконно-оптического гироскопа при угловых колебаниях // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62. №11. С. 982–988.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПЕРВИЧНОГО АНАЛИЗА ИНДУКТОРА ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ РАСХОДА ПРИМ

Е. С. Плотников, А. В. Манцулов

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

В работе рассматривается система первичного контроля проточных частей импульсного электромагнитного расходомера ПРИМ. Представлены сведения о разработке метода измерения параметров, процессе разработки прибора, и полученные в итоге разработки результаты.

Ключевые слова: расходомер; контроль брака

DEVELOPING SYSTEM OF IMPULSED ELECTROMAGNETIC FLOW CONVERTER PRIM FOR FIRST-CONTROLLING ANALYSIS

E. S. Plotnikov, A. V. Mantsurov

Perm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

The work considers the system of primary control of the flow parts of the pulse electromagnetic flowmeter PRIM. Information on the development of the method of measuring parameters, the process of developing the device, and the results obtained of development are presented.

Keywords: flowmeter; production defect

На пермском предприятии ОКБ «Маяк» производятся импульсные электромагнитные преобразователи расхода «ПРИМ». Выпускаемые устройства состоят из двух основных частей: проточной части и электронного блока. Проточная часть состоит из цилиндрического канала для потока жидкости, металлических электродов, вмонтированных в канал, электромагнитных катушек Гельмгольца и стального корпуса. При изготовлении проточной части может произойти отклонение электрических параметров катушек Гельмгольца от технологически заданных. Данная проблема может привести к некорректной работе преобразователя расхода. Решить проблему может разработанный прибор для первичного контроля электрических параметров преобразователя расхода: индуктивности и активного сопротивления катушек Гельмгольца.

Измерять индуктивность с помощью стандартных RLC-метров, которые основаны на гармонических колебаниях, не совсем корректно, так как частота, на которой производятся измерения, существенно влияет на измеряемые параметры.

Разработанный прибор основан на методе экспоненциального переходного процесса заряда-разряда катушки индуктивности, что позволяет

имитировать режим работы самого расходомера, который формирует прямоугольные импульсы для преобразования расхода жидкости. Данный метод позволяет получить выражения для измерения индуктивности с учётом активного сопротивления катушки (рис. 1).

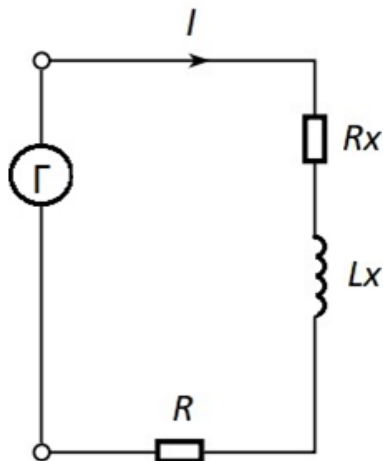


Рис. 1. Схема метода, основанная на переходном процессе [1]

Для математического описания данного метода используется уравнение Кирхгофа для контуров [2]:

$$U_{\text{вх}}(t) = U_L + U_R + U_{\text{вых}}(t).$$

После ряда преобразований получается дифференциальное уравнение:

$$U_{\text{вх}}(t) = \frac{L}{R} * \frac{dU_{\text{вых}}(t)}{dt} + \frac{r}{R} * U_{\text{вых}}(t) + U_{\text{вых}}(t).$$

При помощи преобразования Лапласа [3] получена передаточная характеристика системы:

$$W(p) = \frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{\frac{L}{R}}{p + \frac{R+r}{L}}.$$

Отклик системы на длинный видеоимпульс описывается следующим уравнением:

$$U_{\text{вых}}(t) = E \frac{R}{R+r} \left(1 - e^{-\frac{R+r}{L}t} \right).$$

На переходном процессе разрядки катушки выбраны две точки по напряжению на уровнях 90 и 10% от максимума напряжения на кривой (рис. 2) и записана система уравнений, которая после преобразований имеет следующий вид:

$$\frac{U_1}{U_2} = e^{\frac{R+r}{L}\Delta t},$$

где $\Delta t = t_2 - t_1$.

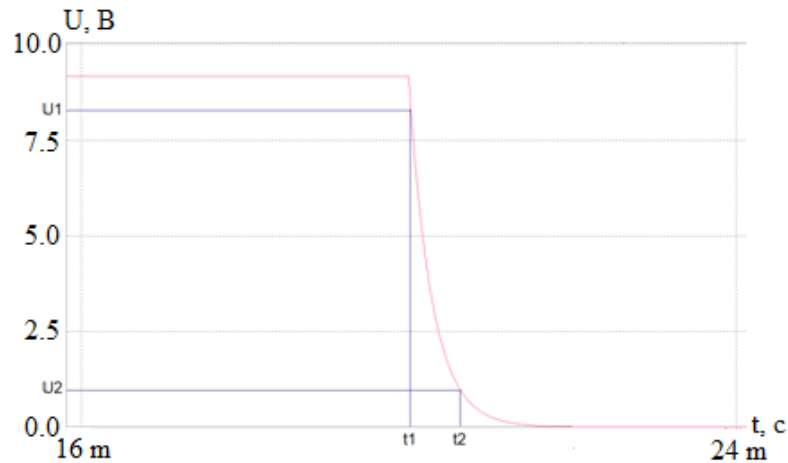


Рис. 2. Переходной процесс разряда катушки

Отсюда индуктивность катушки:

$$L = \frac{R + r}{\ln \frac{U_1}{U_2}} \Delta t.$$

Активное сопротивление рассчитано на постоянном токе через делитель напряжения во время того, как катушка находится в насыщении [4]:

$$r = R \left(\frac{U_A}{U_B} - 1 \right).$$

Аналогичный расчёт с учётом межвитковой ёмкости приводит к следующему уравнению:

$$U_{\text{вых}}(t) = E \left[\frac{R}{R+r} - \sigma(t) + \frac{1}{RC} \left(\frac{r}{L\beta} + e^{\frac{-\alpha}{2}t} * \left\{ \frac{\varepsilon(t)}{\rho(t)} \right\} \right) \right],$$

где $\sigma(t)$ – функция включения, α – коэффициент затухания. $\varepsilon(t)$ – функция экспоненциального затухания, $\rho(t)$ – функция экспоненциально-гармонического затухания.

В процессе решения с учётом межвитковой ёмкости полюсы передаточной характеристики могут быть как действительными, так и комплексными. В случае действительных полюсов процесс разрядки катушки чисто экспоненциальный. При комплексных полюсах у экспоненциального затухания возникает гармоническое заполнение, при котором рассмотренный выше метод не работает. Однако колебательный процесс может наступить только при достаточно больших значениях межвитковой ёмкости. В ходе экспериментов определено, что максимальное значение межвитковой ёмкости не превосходит 100 пкФ, что исключает возможность возникновения колебательного режима.

При сравнении двух откликов системы без учёта и с учётом межвитковой ёмкости (100 пкФ) на длинный видеоимпульс замечено, что они расходятся в значениях на величину меньше процента. Из вышеописанных рассуждений решено не учитывать межвитковую ёмкость.

Для измерения и преобразования сигналов использовался микроконтроллер STM32F103C8T6. Микроконтроллер управляет коммутатором тока, который формирует ток зарядки катушки индуктивности. Для фиксации двух точек на переходном процессе используются компараторы с разным напряжением срабатывания. Сигналы компараторов поступают на микроконтроллер, и запускают высокочастотные таймеры, измеряющие интервал времени Δt . Далее измеренные временной интервал и падение напряжения на индукторе позволяют вычислить индуктивность и активное сопротивление катушки.

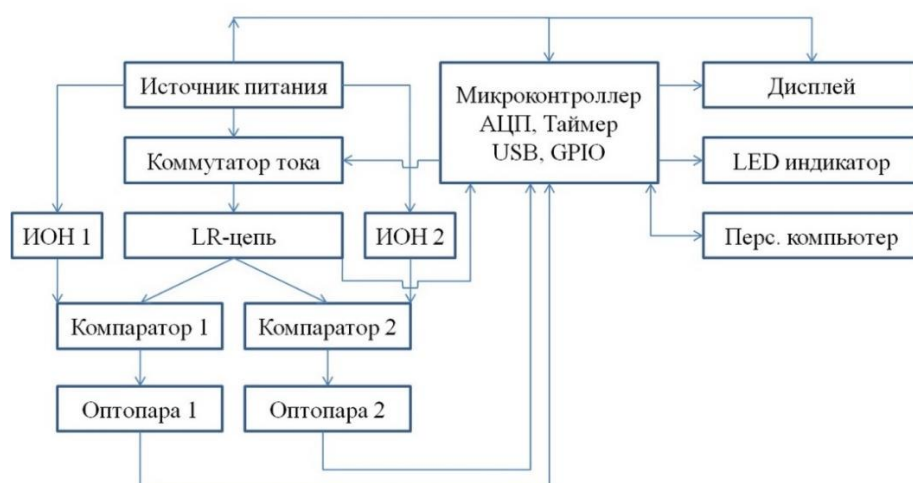


Рис. 3. Функциональная схема прибора

Преобразованные сигналы в виде индуктивности и активного сопротивления выводятся на символьный ЖК-дисплей. Источником питания данного устройства может выступать 5 В блок питания с запасом по току не менее 500 мА. На основе разработанной функциональной схемы (рис. 3) прибора построена принципиальная схема (рис. 4). Из неназванных ранее элементов, в ней присутствуют стабилизаторы напряжения, источники опорного напряжения для компараторов, блок логики для преобразования сигнала с компараторов.

После разработки макета проведены эксперименты с двумя типами проточных частей преобразователя расхода (рис. 5). В ходе эксперимента к разработанному макету подключался осциллограф. С помощью курсорных измерений производилось измерение электрических параметров расходомера.

Для работы макета разработан код для микроконтроллера. Готовый макет проверен на работоспособность. Проведенные измерения показали отклонения менее 1% от рассчитанных теоретически, что говорит его надежности и возможности использования на производстве. Разработанный прибор планируется использовать на предприятии ОКБ «Маяк» в качестве измерительного инструмента для контроля брака на производстве расходомеров «ПРИМ».

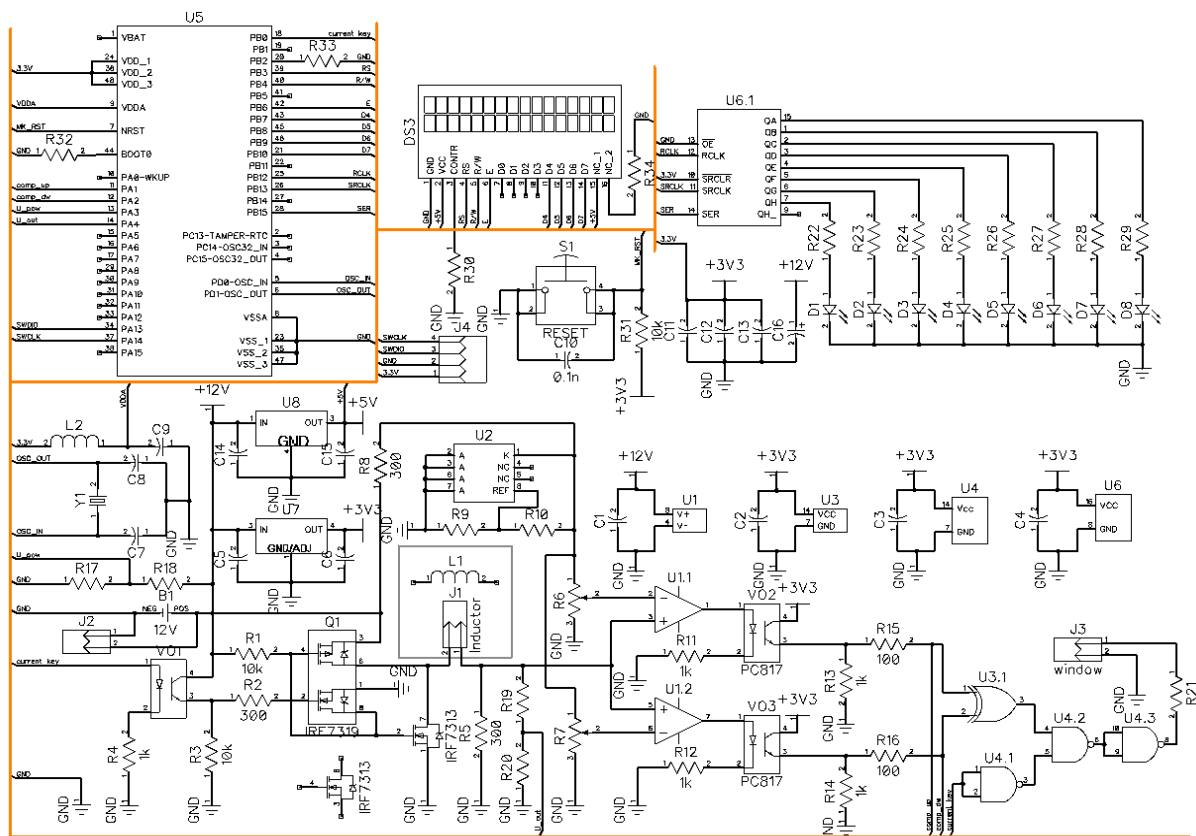


Рис. 4. Электрическая схема прибора

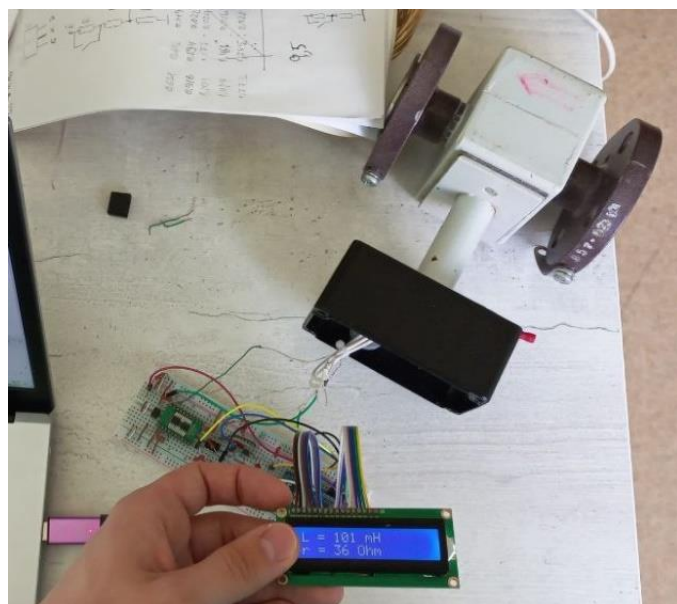


Рис. 5. Макет установки в рабочем состоянии

Таблица. Результаты измерений электрических параметров индуктора проточных частей

прибор	г, Ом	L посчитанное, мГн
Прот. часть 1	33	65
Прот. часть 2	33.3	110

Список литературы

1. *Попов В. С.* Электротехнические измерения и приборы: учебное пособие для техникумов. Москва, Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 1963. 544 с.
2. The Physics Hypertext book: Inductance [Электронный ресурс]. URL: <https://physics.info/inductance> (дата обращения: 27.05.2022).
3. *Лушин Е. В., Долгов А. Н.* Способы измерения индуктивности // Приволжский научный вестник. 2013. № 12-2 (28). С. 36–40.
4. *Бёрд Д.* Физика. От теории к практике. Книга 2: Электричество, магнетизм. Теория, методы расчета, практические устройства: Карманный справочник. М.: Издательский дом «Додэка–XXI», 2007. 560 с.

SAAS ПЛАТФОРМА ЭЛЕКТРОННОЙ КОММЕРЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ TELEGRAM БОТОВ

Д. А. Третьяков, И. П. Селетков

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

В статье представлено описание разработанной информационной системы, позволяющей упростить создание и поддержку Telegram ботов для электронной коммерции. Описаны этапы разработки платформы, выбор инструментов, принцип работы.

Ключевые слова: terraform; яндекс; облако; маркетплейсы; бот; telegram; SaaS; бессерверные вычисления; payg; оплата

SAAS PLATFORM FOR E-COMMERCE WITH TELEGRAM BOTS

D. A. Tretyakov, I. P. Seletkov

Perm State University, 15 Bukireva St., 614990, Perm

The article presents a description of the developed information system, which makes it possible to simplify the creation and support of Telegram bots for e-commerce. The stages of platform development, the choice of tools, the principle of operation are described.

Keywords: terraform; yandex; cloud; marketplaces; bot; telegram; SaaS; serverless computing; payg; payment

Электронная коммерция – это сфера цифровой экономики, которая включает в себя все финансовые и торговые транзакции, осуществляемые при помощи компьютерных сетей, и бизнес-процессы, связанные с проведением таких транзакций [1]. В настоящее время, с одной стороны приобретают популярность инструменты для ведения онлайн продаж в сети интернет, что связано с приходом на рынок больших компаний, например, Яндекс Маркет, Ozon, Wildberries. С другой стороны, все большее количество людей осуществляют покупки при помощи интернет-магазинов, что связано с качеством и удобством, предоставляемыми данными сервисами, в частности:

- выбор товара онлайн;
- заказ и оформление товара онлайн;
- доставка курьером или в пункт самовывоза.

Но за данные удобства приходится платить поставщикам товаров, это выражается в комиссии с продажи товаров, которую интернет агрегатор устанавливает в монопольном порядке. Также эти сервисы имеют и другие недостатки, в частности, не задействуют другие каналы продаж, например продажу товаров, через ботов в социальных сетях и системах обмена

сообщениями. В связи с этим было принято решение разработать платформу, позволяющую автоматизировать создание и управление дополнительными каналами продаж при помощи Telegram ботов.

Архитектура решения

Для разделения логики принято решение использовать микросервисную архитектуру, которая позволяет очертить границы логики каждого микросервиса, что позволяет:

- гибко модифицировать сервисы;
- реализовать горизонтальное автомасштабирование экземпляров приложения.

На рисунке 1 представлена архитектура решения, были выделены следующие компоненты:

- shop-manager – приложение, отвечающее за: создание, удаление, редактирование магазина;
- product-storage – приложение, отвечающее за хранение товаров;
- market-client-manager – приложение, отвечающее за хранение учетных записей пользователей агентов;
- order-manager – приложение, отвечающее за заказ товаров, корзину товаров, историю заказов;
- agent-manager – приложение, отвечающее за управление жизненным циклом Telegram бота;
- API GW – компонент является связующим звеном между ботом и остальной инфраструктурой SaaS платформой.
- Terraform Cloud – это бесплатное облачное решение для автоматизации создания ресурсов у облачных провайдеров.

Проект системы

Для построения эффективной системы и документирования её работы предварительно разработан проект системы в виде набора диаграмм на языке UML. На рисунке 2 в качестве примера представлена схема процесса добавления товара в корзину.

Telegram Бот

На рисунке 3 представлена схема работы Telegram бота. Функциональные возможности бота:

- отображение каталога;
- отображение товара;
- добавление, удаление, отображение товара в корзине;
- отображение заказа;
- отображение истории заказов;
- оплата товаров.

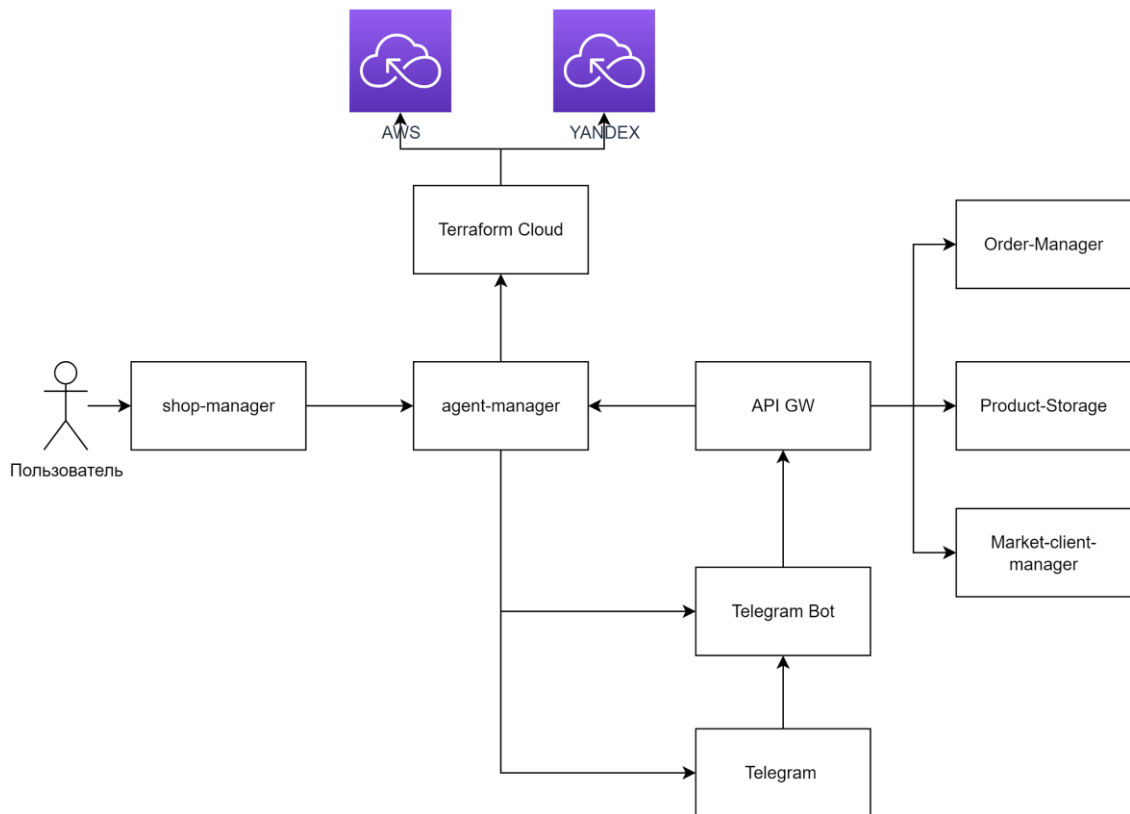


Рис. 1. Архитектура SaaS платформы электронной коммерции

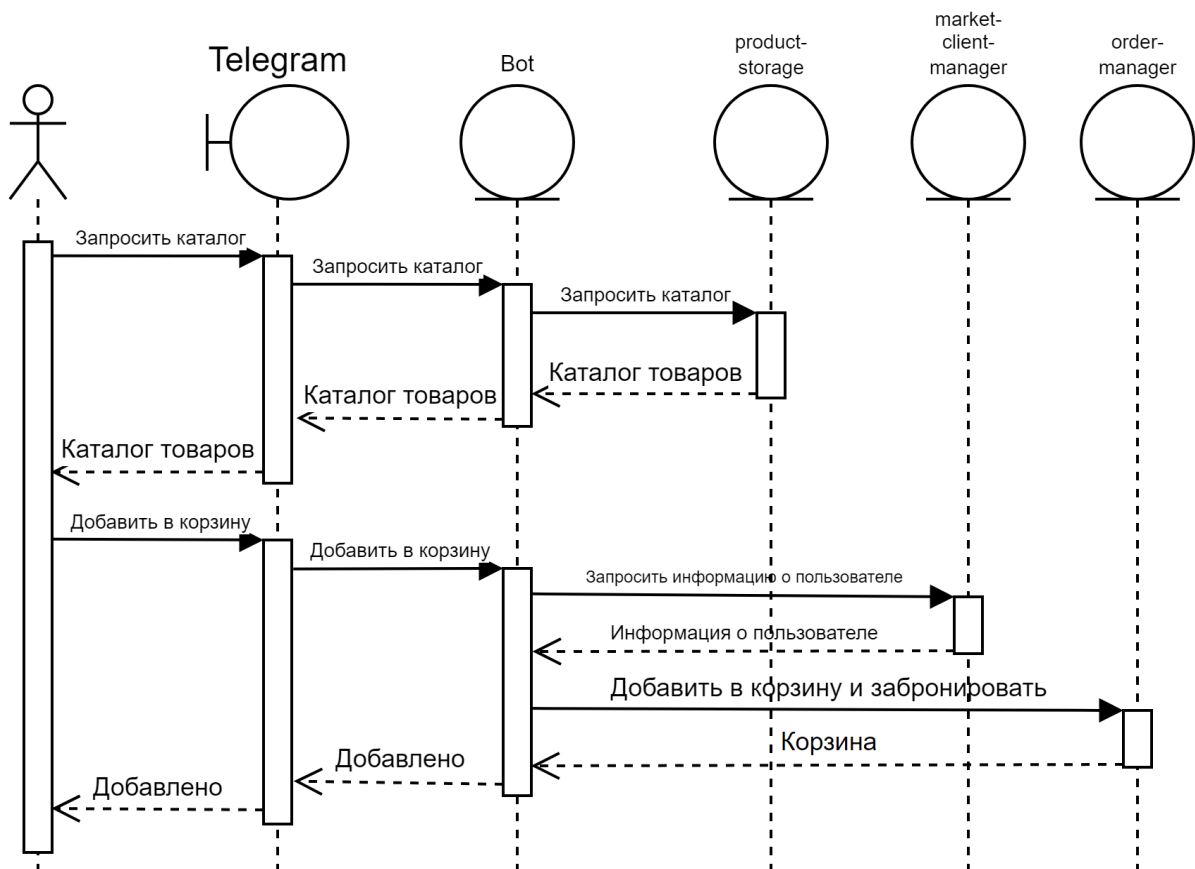


Рис. 2. Последовательность добавления товара в корзину

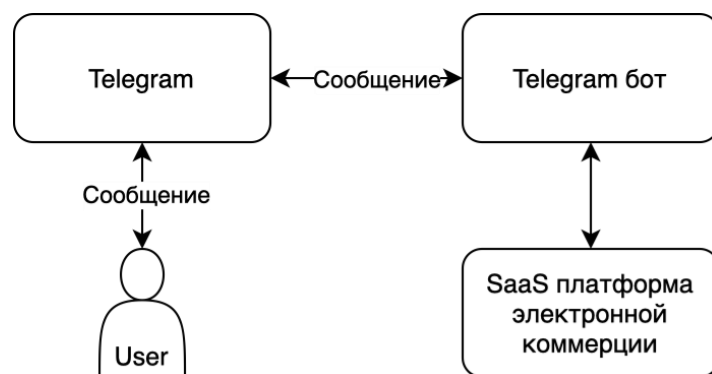


Рис. 3. Схема работы Telegram бота

Среда выполнения бота

Для работы ботов, была выбрана технология бессерверных вычислений (англ. serverless computing) – реализация шаблона «функция как услуга», при котором для выполнения каждого запроса (вызова функции) создаётся отдельный контейнер или виртуальная машина, уничтожающиеся после выполнения [2]). Это позволяет сократить стоимость работы бота, ведь в случае использования бессерверных вычислений, оплата рассчитывается только в зависимости от входящего трафика. В таблице 1 подробнее описаны разновидности такого подхода: serverless container, functions.

Табл. 1. Сравнение подходов к бессерверным вычислениям

	Serverless Container	Functions
Среда выполнения	Любая	Определяется провайдером
Тестирование	Доступны все виды тестирования	Ограничено Unit тестированием
Ограничение по времени сборки	Отсутствует	Определяется провайдером

Интеграция с банковскими системами

Для оплаты товаров, авторами был реализован функционал: хранения, добавления, удаления товаров в корзину, который находится на стороне SaaS платформы электронной коммерции. На рисунке 2 представлена диаграмма последовательности добавления товара в корзину.

Bot Payment API [3] – это API платформы Telegram, позволяющий интегрироваться с банковскими системами при помощи Telegram. В качестве платежного провайдера могут выступать все те платежные системы, которые

интегрированы с Bot Payment API. Тестирование оплаты проводилось с тестовым подключением платежной системы ПАО «Сбербанк», для полного функционирования оплаты, внешние провайдеры оплаты могут требовать подключения эквайринга.

Для интеграции с API необходимо:

1. зайти в настройки своего бота, в специальном боте предоставляемый самим Telegram – @BotFather;
2. перейти в настройки платежей;
3. выбрать одного из доступных провайдеров;
 - а. после выполнения 3-го пункта, будет выдан Provider Token, данные токен будет необходим при обращении к Telegram;
4. реализовать метод `sendInvoice` [4]. С помощью этого метода Telegram выставляется счет клиенту. Следующие поля обязательны к заполнению:
 - а. описание товара;
 - б. стоимость;
 - с. название;
 - д. токен провайдера оплаты;
 - е. Payload — используется для внутренних процессов;
5. после подтверждения оплаты, Telegram присылает сообщение `PreCheckoutQuery` [5], которое содержит информацию по платежу. На это сообщение необходимо ответить положительным ответом, для успешного завершения оплаты;
6. после успешного подтверждения, Telegram отправляет сообщение `SuccessfulPayment` в котором содержится информация о заказе и успешной оплате.

Благодаря API предоставляемым Telegram интеграция с системами оплаты получается достаточно надежной, за счет использования внешнего провайдера, а также достаточно легко реализуемой, ведь большая часть логики по оплате будет находиться на стороне провайдера.

Заключение

В итоге была разработана система, позволяющая автоматизировать процесс создания и обслуживания каналов продаж в сети интернет с использованием Telegram ботов. Данная система имеет огромный потенциал для дальнейшего развития, например, поддержка ботов в других мессенджерах. В данный момент система продолжает тестироваться и дорабатываться.

Список литературы

1. Электронная коммерция // Page Version ID: 123252314. [Электронный ресурс] URL:
<https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BC%D0%B5%D1%80%D1%86%D0>

- [%B8%D1%8F&oldid=123252314](#) (дата обращения: 22.06.2022).
2. Бессерверные вычисления (serverless computing) – что это такое и где используются [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cloud4y.ru/blog/what-is-serverless-computing/> (дата обращения: 22.06.2022).
 3. Bot Payments API [Электронный ресурс]. URL: <https://core.telegram.org/bots/payments> (дата обращения: 22.06.2022).
 4. Telegram Bot API – sendInvoice [Электронный ресурс]. URL: <https://core.telegram.org/bots/api#sendinvoice> (дата обращения: 22.06.2022).
 5. Telegram Bot API – preCheckoutQuery [Электронный ресурс]. URL: <https://core.telegram.org/bots/api#precheckoutquery> (дата обращения: 22.06.2022).

Научное издание

Физика для Пермского края

Материалы региональной научно-практической конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых

Выпуск 15

Издается в авторской редакции

Техническая подготовка и обработка материалов:
Н. Н. Картавых

Объем данных 20 Мб
Подписано к использованию 19.09.2022

Размещено в открытом доступе
на сайте www.psu.ru
в разделе НАУКА / Электронные публикации
и в электронной мультимедийной библиотеке ELiS

Издательский центр
Пермского государственного
национального исследовательского университета
614990, Пермь, ул. Букирева, 15