

**АКАДЕМИЯ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ
«ACADEMY OF NATURAL HISTORY»**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ
И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

**INTERNATIONAL
JOURNAL OF APPLIED
AND FUNDAMENTAL
RESEARCH**

Журнал основан в 2007 году
The journal is based in 2007
ISSN 1996-3955

Двухлетний импакт-фактор
РИНЦ = 0,564

Пятилетний импакт-фактор
РИНЦ = 0,312

№ 4 2022

Научный журнал
Scientific journal

Журнал International Journal of Applied and Fundamental Research (Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований) зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС 77-60735.

Подписной индекс по электронному каталогу «Почта России» – ПИ140

Электронная версия размещается на сайте www.rae.ru

The electronic version takes places on a site www.rae.ru

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

к.м.н. Н.Ю. Стукова

Ответственный секретарь

к.м.н. М.Н. Бизенкова

EDITOR

Natalia Stukova

Senior Director and Publisher

Maria Bizenkova

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.б.н., проф. Абдуллаев А. (Душанбе); к.б.н. Алиева К.Г. (Махачкала); д.х.н., к.ф.-м.н., проф. Алоев В.З. (Чегем-2); д.б.н., проф. Андреева А.В. (Уфа); к.географ.н., доцент Аничкина Н.В. (Липецк); к.ф.-м.н. Барановский Н.В. (Томск); д.б.н., доцент Белых О.А. (Иркутск); д.т.н., проф. Бурмистрова О.Н. (Ухта); д.т.н., доцент Быстров В.А. (Новокузнецк); д.м.н., проф. Гарбуз И.Ф. (Тирасполь); д.ф.-м.н., проф. Геворкян Э.А. (Москва); д.х.н., проф. Гурбанов Г.Р. (Баку); д.ветеринар.н., доцент Ермолина С.А. (Киров); к.т.н. Есенаманова М.С. (Атырау); к.ф.-м.н., д.п.н., проф. Ефремова Н.Ф. (Ростов-на-Дону); д.м.н. Жураковский И.П. (Новосибирск); д.т.н., доцент Ибраев И.К. (Темиртау); к.т.н., доцент Исмаилов З.И. (Баку); д.б.н., с.н.с. Кавцевич Н.Н. (Североморск); д.т.н., проф. Калмыков И.А. (Ставрополь); д.б.н. Кокорева И.И. (Алматы); д.г.-м.н., доцент Копылов И.С. (Пермь); к.б.н., доцент Коротченко И.С. (Красноярск); к.с.-х.н., доцент Кряжева В.Л. (Нижний Новгород); д.ф.-м.н., доцент Кульков В.Г. (Волжский); д.б.н. Ларионов М.В. (Балашов); д.б.н., к.с.-х.н., доцент Леонтьев Д.Ф. (Иркутск); д.географ.н., к.б.н., проф. Луговской А.М. (Москва); д.г.-м.н., с.н.с. Мельников А.И. (Иркутск); д.т.н., проф. Несветаев Г.В. (Ростов-на-Дону); д.с.-х.н. Никитин С.Н. (п. Тимирязевский); д.фарм.н., доцент Олешко О.А. (Пермь); д.с.-х.н., с.н.с., проф. Партоев К. (Душанбе); к.п.н., доцент Попова И.Н. (Москва); д.т.н., проф. Рогачев А.Ф. (Волгоград); д.м.н., с.н.с., доцент Розыходжаева Г.А. (Ташкент); д.г.-м.н. Сакиев К.С. (Бишкек); д.т.н., проф. Сугак Е.В. (Красноярск); д.ветеринар.н., проф. Трефилов Б.Б. (Санкт-Петербург); д.м.н., проф. Чарышкин А.Л. (Ульяновск); д.географ.н., проф. Чодураев Т.М. (Бишкек); д.б.н., проф. Шалпыков К.Т. (Бишкек); к.х.н. Шарифуллина Л.Р. (Москва); д.п.н., проф. Щирин Д.В. (Санкт-Петербург)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ
И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED
AND FUNDAMENTAL RESEARCH

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ.

Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals directory» в целях информирования мировой научной общественности.

Журнал представлен в ведущих библиотеках страны и является рецензируемым.

Журнал представлен в НАУЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ БИБЛИОТЕКЕ (НЭБ) –
головном исполнителе проекта по созданию Российского индекса научного
цитирования (РИНЦ) и имеет импакт-фактор Российского индекса научного
цитирования (ИФ РИНЦ).

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,564.

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,312.

Учредитель, издательство и редакция:
ООО НИЦ «Академия Естествознания»

Почтовый адрес: 105037, г. Москва, а/я 47

Адрес редакции и издателя: 410056, г. Саратов, ул. им. Чапаева В.И., д. 56

ISSN 1996-3955

Тел. редакции – 8-(499)-704-13-41

Факс (845-2)-47-76-77

E-mail: edition@rae.ru

Зав. редакцией Т.В. Шнуровозова

Техническое редактирование и верстка Е.Н. Доронкина

Корректор Е.С. Галенкина, Н.А. Дудкина

Подписано в печать – 29.04.2022

Дата выхода номера – 31.05.2022

Формат 60x90 1/8

Типография

ООО НИЦ «Академия Естествознания»

410035, Саратовская область, г. Саратов, ул. Мамонтовой, д. 5

Распространение по свободной цене

Усл. печ. л. 7

Тираж 500 экз.

Заказ МЖПиФИ 2022/4

© ООО НИЦ «Академия Естествознания»

СОДЕРЖАНИЕ

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

СТАТЬИ

- КЛЕЩЕВОЙ РИККЕТСИОЗ В АТ-БАШИНСКОМ РАЙОНЕ
Джумагулова А.Ш., Муканбеткеримова Г.М., Абдикеримов М.М., Бейшеналиев И.А. 5
- АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ,
 СОПУТСТВУЮЩИХ МЫСЛЕННОМУ ПРЕДСТАВЛЕНИЮ ДВИЖЕНИЯ
*Трошина Е.М., Машеров Е.Л., Сазонова О.Б., Кулева А.Ю.,
 Каверина М.Ю., Кроткова О.А., Шарова Е.В.* 10

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬИ

- ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ВОДОРОДА КАК ТОПЛИВА
 ДЛЯ БУДУЩЕЙ РАБОТЫ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ
Алфаяд А.Г.Х. 18
- РАЗРАБОТКА ПОЛИМЕРНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КОМПОЗИЦИИ
 С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
Павлычева Е.А. 25

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬИ

- АЛГОРИТМ И ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЛИНЕЙНОЙ СИНГУЛЯРНО-
 ВОЗМУЩЕННОЙ ДИСКРЕТНОЙ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ
Аширбаев Б.Ы., Алтымышова Ж.А. 30
- ВЗАИМОСВЯЗЬ ТЕСТА ПРОСТОТЫ ФЕРМА
 И ТЕОРЕМЫ ВИЛЬСОНА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРОСТЫХ ЧИСЕЛ
Приходько А.А. 39

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬЯ

- ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
 НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА
 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО ПОДВОДНОГО
 РАЗРЯДА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ФОТОВОЛЬТАИКЕ
Сироткин Н.А. 45

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬЯ

- РАЗВИТИЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА
 В ЦИФРОВОЙ СРЕДЕ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
Тимиргалеева Р.Р., Вердыш М.В., Попова А.А. 51

CONTENTS
MEDICAL SCIENCES
ARTICLES

TICK-BORN RICKETTSIOSIS IN AT-BASHI

Dzhumagulova A.Sh., Mucanbetkerimova G.M., Abdikerimov M.M., Beyshenaliev I.A. 5

 ANALYSIS OF CHANGES IN NEUROPHYSIOLOGICAL INDICATORS
 ACCOMPANYING THE MENTAL REPRESENTATION OF MOVEMENT

*Troshina E.M., Masherov E.L., Sazonova O.B., Kuleva A.Yu.,
 Kaverina M.Yu., Krotkova O.A., Sharova E.V.* 10

TECHNICAL SCIENCES
ARTICLES

 POSSIBILITY OF USE OF HYDROGEN AS A FUEL
 FOR FUTURE OPERATION OF A GAS TURBINE

Alfayyad A.G.Kh. 18

 DEVELOPMENT OF POLYMER DIELECTRIC COMPOSITION
 WITH ENHANCED PERFORMANCE CHARACTERISTICS

Pavlycheva E.A. 25

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES
ARTICLES

 ALGORITHM AND NUMERICAL SOLUTION OF A LINEAR SINGULARLY
 PERTURBED DISCRETE OPTIMAL CONTROL PROBLEM

Ashirbaev B.Y., Altymyshova Zh.A. 30

 THE RELATIONSHIP OF FERMAT'S SIMPLICITY TEST
 AND WILSON'S THEOREM IN DETERMINING PRIME NUMBERS

Prikhodko A.A. 39

CHEMICAL SCIENCES
ARTICLE

 CREATION OF POLYVINYL ALCOHOL-BASED POLYMERIC
 COMPOSITE NANOMATERIALS USING PULSED UNDERWATER
 DISCHARGE PLASMA AND THEIR APPLICATION IN PHOTOVOLTAIC

Sirotkin N.A. 45

ECONOMIC SCIENCES
ARTICLE

 DEVELOPMENT OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX IN THE DIGITAL
 ENVIRONMENT ON THE BASIS OF INTEGRATION PROCESSES

Timirgaleeva R.R., Verdysh M.V., Popova A.A. 51

СТАТЬИ

УДК 616.98-002

КЛЕЩЕВОЙ РИККЕТСИОЗ В АТ-БАШИНСКОМ РАЙОНЕ

^{1,2}Джумагулова А.Ш., ¹Муканбеткеримова Г.М.,

¹Абдикеримов М.М., ³Бейшеналиев И.А.

¹Кыргызская государственная медицинская академия им. И.К. Ахунбаева, Бишкек,
e-mail: gulbarchyn.mukanbetkerimova@mail.ru, tamazia_061002@mail.ru;

²НПО «Профилактическая медицина» МЗ КР, Бишкек; e-mail: djumagulova_anara@mail.ru;

³Ат-Башинская территориальная больница, Бишкек, e-mail: ilim74@mail.ru

В последнее время отмечается распространённость риккетсиозов группы клещевой пятнистой лихорадки и вызываемых ими инфекций в Нарынской области Кыргызской Республики, так как ландшафтно-климатические условия и животноводческая деятельность с обширными пастбищами и сельскохозяйственными угодьями в Нарынской области создают благоприятные условия для поддержания популяции клещей и формирования очагов клещевых инфекций. За последние пять лет по Нарынской области наблюдается увеличение числа лиц, пострадавших от укусов клещей. При этом большинство подвергшихся укусам клещей и заболевших клещевыми инфекциями составили жители Ат-Башинского района (58,4%). В статье приведена клинико-эпидемиологическая характеристика 108 случаев клещевого риккетсиоза по материалам Ат-Башинской территориальной больницы за 2016–2019 гг. Отмечается стабильный рост случаев заболевания среди детей (62,9%) и взрослых (37,1%) с пиком в апреле (54,6%) и мае (32,4%). По частоте нападения клещей и числу заболевших наиболее неблагоприятными зонами были окрестности сел Ат-Башы (28,7%), Ак-Жар (13%), Талды-Суу (10,2%), Баш-Кайынды (8,3%) и Арча-Кайынды (7,8%). Клещевой риккетсиоз протекает в среднетяжелой форме с первичным аффектом, экзантемой и региональным лимфаденитом без значимых достоверных различий среди детей и взрослых. Внедрение современных методов лабораторной диагностики (ПЦР) позволит улучшить мероприятия по диагностике и профилактике клещевого риккетсиоза в республике.

Ключевые слова: клещевой риккетсиоз, Ат-Башы, укус клеща, первичный аффект, экзантема

TICK-BORN RICKETTSIOSIS IN AT-BASHI

^{1,2}Dzhumagulova A.Sh., ¹Mucanbetkerimova G.M.,

¹Abdikerimov M.M., ³Beyshenaliev I.A.

¹Kyrgyz State Medical Academy named I.K. Akhunbaev, Bishkek,

e-mail: gulbarchyn.mukanbetkerimova@mail.ru, mamazia_061002@mail.ru;

²Scientific and Production Centre for Preventive Medicine, Bishkek,

e-mail: djumagulova_anara@mail.ru;

³At-Bashi territorial hospital, Bishkek, e-mail: ilim74@mail.ru

Recently, the prevalence of rickettsiosis of the tick-borne spotted fever group and the infections caused by them in the Naryn region of the Kyrgyz Republic has been noted. Since the landscape and climatic conditions and livestock activities with extensive pastures and agricultural land in the Naryn region create favorable conditions for maintaining the tick population and the formation of foci of tick infections. Over the past 5 years, there has been an increase in the number of people affected by tick bites in the Naryn region. At the same time, many of those who were bitten by ticks and fell ill with tick-borne infections were residents of At-Bashi district (58.4%). The article presents the clinical and epidemiological characteristics of 108 cases of tick-borne rickettsiosis based on the materials of the At-Bashi Territorial Hospital since 2016 to 2019. There is a steady increase in cases among children (62.9%) and adults (37.1%), with a peak in April (54.6%) and May (32.4%) months. In terms of the frequency of tick attacks and the number of cases, the most disadvantaged areas were the neighborhoods of the villages of At-Bashi (28.7%), Ak-Zhar (13%), Taldy-Suu (10.2%), Bash-Kaiydy (8.3%) and Archa-Kaiydy (7.8%). Tick-borne rickettsiosis occurs in a moderate form with primary affect, exanthema and regional lymphadenitis without significant differences among children and adults. The introduction of modern methods of laboratory diagnostics (PCR) will improve the measures for the diagnosis and prevention of tick-borne rickettsiosis in the country.

Keywords: tick-borne rickettsiosis, At-Bashi, tick bite, primary affect, exanthema

Природные условия Ат-Башинского района Нарынской области, как и хозяйственная деятельность с преобладанием животноводства, обуславливают высокую численность популяций клещей и обеспечивают стойкую напряженность природных очагов клещевых инфекций, таких как клещевой энцефалит, клещевой риккетсиоз.

С 2015 г. в Ат-Башинском районе начали регистрировать клещевой риккет-

сиоз группы пятнистой лихорадки [1, 2]. Но из-за отсутствия ранней регистрации данные не отражают фактического состояния заболеваемости клещевым риккетсиозом в данном регионе, так как природные очаги с резервуарами инфекции существовали и продолжают действовать [3]. При этом за последние годы на фоне снижения заболеваемости клещевым энцефалитом отмечается значительный

рост числа случаев клещевого риккетсиоза (в 5,8 раз).

Поэтому изучение эпидемиологических закономерностей клещевого риккетсиоза в Ат-Башинском районе, а также необходимость решения вопросов по своевременной диагностике и профилактике определили актуальность настоящего исследования.

Целью исследования является анализ эпидемиологических и клинико-лабораторных особенностей клещевого риккетсиоза в природно-очаговой зоне Ат-Баши.

Материалы и методы исследования

При анализе эпидемиологической ситуации по клещевым инфекциям в Ат-Башинском районе использовались статистические данные отчетных форм областной СЭС г. Нарын по учету клещей, учету пострадавших лиц от укусов клещей, заболеваемости клещевыми инфекциями в регионе.

Клинико-лабораторный анализ проведен при изучении 108 историй болезни пациентов с диагнозом североазиатский клещевой риккетсиоз, госпитализированных в Ат-Башинскую территориальную больницу за период с 2016 по 2019 г. Верификация диагноза осуществлялась методом ПЦР.

Проводилась статистическая обработка с помощью программы SPSS.

Результаты исследования и их обсуждение

Ат-Башинский район является самым крупным регионом в Нарынской области (более 15 тыс. км²) и отличается своим горным ландшафтом, ограниченным хребтом Атбаши на севере и горной грядой Какшаал-Тоо на юге. Перепад абсолютных отметок в горной зоне варьирует от 3000 до 5982 м (пик Данкова), долиной – от 2000 до 3800 м [4].

Высокогорный тундровый и альпийский лугово-степной, среднегорный хвойно-лесной, предгорно-низкогорный полупустынный и сухостепной пояс сменяется луговым, лесолуговым, тугайным, степным поясами.

Климат Ат-Башинского района характеризуется резкой континентальностью и засушливостью, а также большими суточными и годовыми амплитудами температур воздуха (от -45 °С до +30 °С). В долиненной зоне наиболее теплый период со среднесуточной температурой воздуха выше +10 °С продолжается около 130 дней. Среднегодовое количество осадков выпадает от 300 мм в долиненной части до 600 мм в горной зоне.

Статистический анализ метеорологических наблюдений показал, что за последние десятилетия в Ат-Башинском регионе наблюдается рост среднегодовых температур воздуха на 1,2–2,1 °С и незначительный рост годового количества осадков [6].

Таким образом, ландшафтно-климатические условия Ат-Башинского района создают благоприятные условия для размножения и поддержания популяции иксодовых клещей. Свою лепту в эпидемиологическую ситуацию вносят и социальные факторы, то есть близость населенных пунктов к природным очагам клещевых инфекций и занятие жителей животноводством с обширными пастбищами и сельскохозяйственными угодьями.

На территории района расположено 19 населенных пунктов, относящихся к 11 аильным аймакам: Ак-Джарский, Ак-Моюнский, Ак-Музский, Ак-Талинский, Ат-Башинский, Арча-Каиндинский, Баш-Каиндийский, Казыбекский, Кара-Коюнский, Кара-Сууйский, Талды-Сууйский. Это может создавать условия для формирования также антропоургических очагов клещевых инфекций.

По данным СЭС Нарынской области ежегодно у 31,3% обследованных сельскохозяйственных животных обнаруживаются клещи, при этом среднее количество клещей на одном животном составляет 4,6. Видовой состав популяции клещей представлен в основном пастбищными клещами рода *Ixodes*. За наблюдаемый период отмечается стабильный рост числа лиц, пострадавших от укусов клещей (в 2,9–3,5 раза), что указывает на увеличение численности и активности клещей. При этом большинство лиц, подвергших укусу клещей, составили жители Ат-Башинского района (58,4%).

По Нарынской области за 2016–2019 гг. было зарегистрировано 24 случая клещевого энцефалита и 163 случая клещевого (североазиатский) риккетсиоза. Динамика заболеваемости клещевыми инфекциями характеризуется тенденцией к снижению числа клещевого энцефалита и стабильному росту случаев клещевого риккетсиоза. При этом 66,3% всех случаев клещевого риккетсиоза зарегистрировано в Ат-Башинском районе и выявлялись во всех аильных аймаках. Однако по частоте нападения клещей и числу заболевших наиболее неблагоприятными зонами оказались окрестности сел Ат-Баши (28,7%), Ак-Жар (13%), Талды-Суу (10,2%), Баш-Кайынды (8,3%) и Арча-Кайынды (7,8%) (рис. 1).

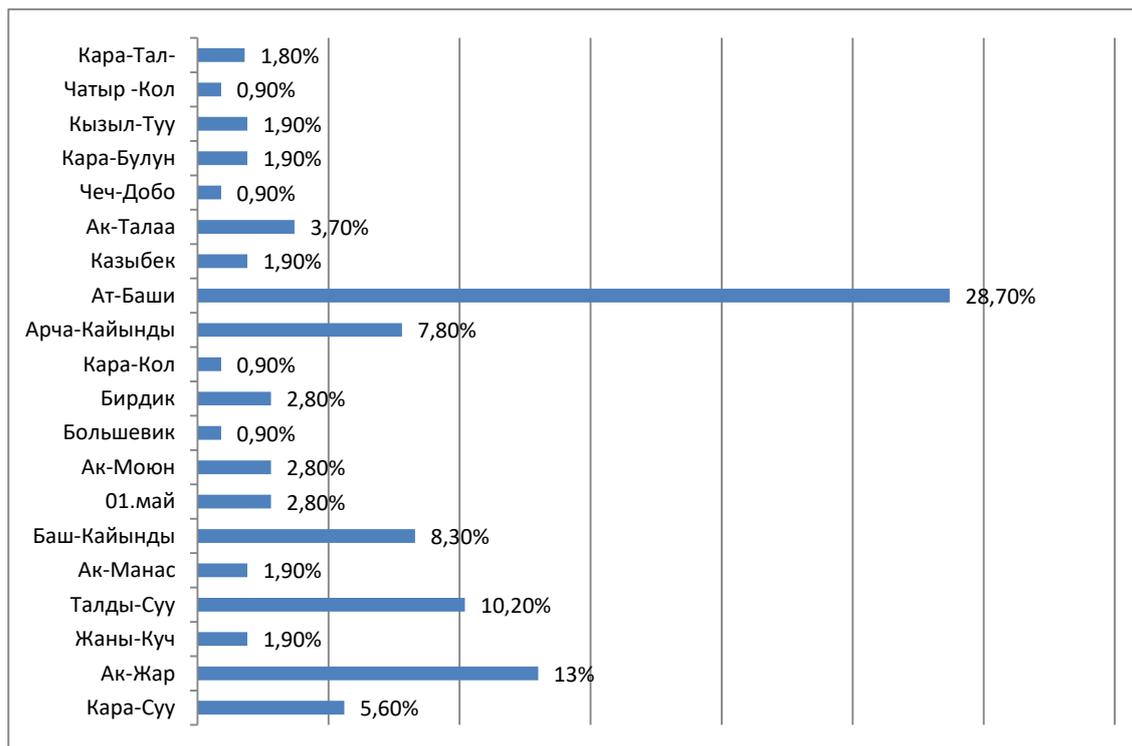


Рис. 1. Заболеваемость клещевым риккетсиозом по данным Ат-Башинской территориальной больницы за 2016–2019 гг.

По материалам Ат-Башинской территориальной больницы за 2016–2019 гг. зарегистрировано 108 случаев клещевого риккетсиоза, среди которых 68 детей и 40 взрослых (62,9% и 37,1% соответственно).

Значительный удельный вес среди заболевших составили дети от 4 до 9 лет (64,7%), которые подвергались укусу клещей в основном на приусадебных участках. Среди взрослых 45,9% случаев приходится на лиц в возрасте от 41 до 60 лет и в 24,3% – старше 60 лет.

Различия по половому признаку среди детей и взрослых оказались незначительными. Так, среди детского населения 52,9% составили женский пол и 47,1% – мужской пол, тогда как среди взрослых доля мужчин составила 52,5%, а женщин – 47,5% ($p > 0,005$).

Незанятое население (безработные и пенсионеры), составило существенную часть взрослого контингента – 66,7%. В этой социальной группе больных клещевым риккетсиозом преобладали мужчины, которые чаще подвергались укусу при выпасе скота, при выполнении полевых работ, в процессе заготовки сена, работы на приусадебных участках.

Заболеваемость клещевым риккетсиозом совпадает с периодом нападения клещей

и выглядит в виде одноволновой кривой с пиками максимальной заболеваемости в апреле (54,6%) и мае (32,4%) (рис. 2). Корреляционная связь между частотой укусов и заболеваемостью составляет $r = 0,027$.

Такая ранняя сезонность может быть объяснена тенденцией к потеплению климата, вызывающей увеличение численности клещей и удлинению периода их активности, а также с передачей инфекции во время настрига шерсти овец и коз, которая начинается в регионе в апреле.

Продолжительность инкубационного периода устанавливалась при указании точной даты присасывания клеща и в наших наблюдениях в среднем составила $10,4 \pm 3$ дня.

В первые три дня болезни обратились за медицинской помощью 57,4% больных, на 4–7 день – 34,3% больных, и в 8,3% случаев – в более поздние сроки болезни (8–14-й день). Анализ первичных диагнозов показал, что среди взрослых клещевой риккетсиоз заподозрен был в 45% случаев, у детей – в 22,1% случаев. Первоначально болезнь у детей расценивали как клещевой энцефалит (11,8%), ОРВИ (4,5%), аллергический дерматит (2,9%), а также корь, рожистое воспаление.

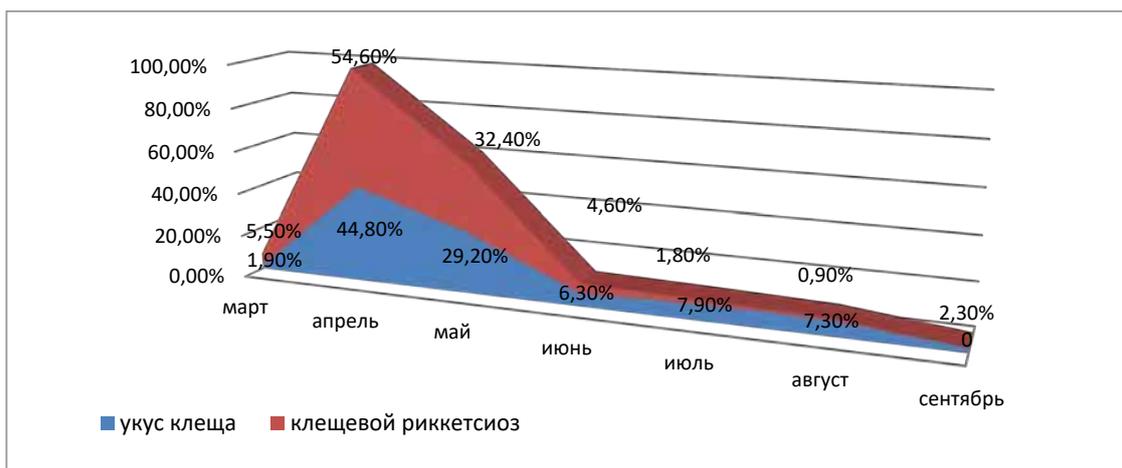


Рис. 2. Длительность эпидемического сезона при укусе клещей и клещевом риккетсиозе за период 2016–2019 г. (%) [7]

Причиной поздней обращаемости и поздней диагностики является низкая информированность населения и медицинского персонала о клинических проявлениях клещевого риккетсиоза.

В большинстве случаев клещевой риккетсиоз протекал в среднетяжелой форме как у взрослых, так и у детей. Тяжелые формы отмечены лишь у детей в 2,9% случаев. Тяжесть течения заболевания определялась выраженностью синдрома интоксикации, высотой и длительностью лихорадки, характером сыпи.

У всех больных заболевание начиналось остро с повышения температуры тела. Лихорадка достигала максимального уровня

в первые два дня болезни в пределах 37,8–39,5°C, при этом у детей в среднем составила 38,9±0,8 °С, у взрослых – 38,1±0,7 °С. Продолжительность лихорадочного периода колебалась от 2 до 11 дней, в среднем 3,8 ± 1,8 дней у детей, 2,7 ± 1,7 дня у взрослых (таблица).

Достоверных различий в проявлении интоксикационного синдрома среди детей и взрослых не выявлено ($p > 0,05$). В большинстве случаев отмечалась слабость, головная боль, отсутствие аппетита, тошнота, рвота, головокружение, нарушение сна. Вегетативные расстройства наблюдались в виде гиперемии лица и склер, потливости, тахикардии.

Клиническая характеристика клещевого риккетсиоза

Симптомы	Дети (n = 68)		Взрослые (n = 40)	
	абс	%	абс	%
Температура	67	98,5%	40	100%
Головная боль	53	77,9%	33	82,5%
Головокружение	16	23,5%	14	35%
Слабость	57	83,8%	39	97,5%
Нарушение сна	8	11,8%	8	20%
Снижение аппетита	43	63,2%	22	55%
Тошнота	7	10,3%	5	12,5%
Рвота	6	8,8%	2	5%
Гиперемия лица	37	39,7%	18	45%
Гиперемия зева	20	29,4%	11	27,5%
Склерит, конъюнктивит	13	19,1%	9	22,5%
Первичный аффект	64	94,1%	35	87,5%
Лимфоаденопатия	24	35,3%	19	47,5%
Сыпь	68	100%	40	100%

В разгар болезни у всех больных обнаруживалась сыпь, розеолезно-папулезного или геморрагического характера, локализующаяся чаще на нижних конечностях (64,8%) и туловище (38,9%). Продолжительность визуализации сыпи составила в среднем $4,3 \pm 0,8$ дня.

У 91,7% больных выявлен первичный аффект в виде корочки с инфильтратом на месте укуса клеща. Локализация первичного аффекта была довольно разнообразной. Большинство первичных аффектов в месте присасывания клеща было обнаружено на голове, шее (38,9%) и верхних конечностях (35,2%), реже выявлялись на туловище (7,4%), нижних конечностях (13%) и животе (5,6%). Необходимо отметить, что у детей первичные аффекты обнаруживались чаще в области головы и шеи, чем у взрослых (42,6 и 32,5%). А у взрослых частота присасывания клещей к нижним конечностям (20 и 8,8%) и к животу (7,5% и 4,4%) была выше, чем у детей. У 15,7% больных имелись следы множественных укусов клещей. Длительность существования первичного аффекта составила в среднем $6,4 \pm 0,8$ дней.

Регионарная лимфаденопатия была сопряжена с местом укуса клеща и чаще выявлялась у взрослых (52,5%), чем у детей (35,3%). Лимфатические узлы были умеренно увеличены, малоблезненные, не спаяны с окружающей тканью и исчезали быстрее, чем первичный аффект.

При анализе гемограммы у обследованных обнаружены следующие изменения: у 19,4% больных имел место умеренно выраженный лейкоцитоз (до $13,1 \times 10^9/\text{л}$), причем у детей в 22,1% случаев, а у взрослых в 15%. Лейкопения отмечена у 9,3% больных, при этом у взрослых наблюдалось чаще (17,5%), чем у детей (4,4%). Тромбоцитопения встречалась редко, в 5,9% случаях у детей и в 15% у взрослых. У одной трети больных (36,1%) имела место умеренно повышенная СОЭ. Из 14 проведенных исследований ПЦР на выявление ДНК *R. sibirica* в 6 случаях выявлен положительный результат.

В большинстве случаев антибактериальная терапия проводилась доксициклином и цефтриаксоном, продолжительностью $4,8 \pm 1,7$ дня. Среднее пребывание больных в стационаре составило $6,2 \pm 1,8$ дней.

Выводы

1. На территории Ат-Башинского района существуют активные природные очаги клещевого риккетсиоза, обеспечивающие стабильный рост заболеваемости. Наиболее неблагоприятными зонами являются окрестности сел Ат-Баши (28,7%), Ак-Жар (13%), Талды-Суу (10,2%), Баш-Кайынды (8,3%) и Арча-Кайынды (7,8%).

2. Клещевой риккетсиоз чаще встречается у детей (62,3%) в возрасте 4–9 лет (64,7%), среди взрослых – в возрасте 41–60 лет (45,9%), с одноволновым пиком заболеваемости в апреле (54,6%), характеризуется типичными клиническими проявлениями с благоприятным исходом.

Список литературы

1. Егембердиева Р.А. Клещевой риккетсиоз в Северо-Казахстанской области // Медицинский журнал Западного Казахстана. 2010. № 3. С. 39–42.
2. Джумагулова А.Ш., Абдикеримов М.М., Мукамбеткеримова Г.М. Клещевые инфекции Нарынской области // Современные проблемы науки и образования. 2020. № 2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=29762> (дата обращения: 26.03.2022).
3. Джумагулова А.Ш., Мукамбеткеримова Г.М. Северо-азиатский клещевой риккетсиоз в Кыргызской Республике // Общество. 2019. № 1(12). С. 82–86.
4. Жумалиева А.С., Сыромятина М.В., Чистяков К.В., Курочкин Ю.Н. Высотная ландшафтная поясность и режимы природопользования хребта Ат-Баши (внутренний Тянь-Шань) // Общество. Среда. Развитие. 2017. № 1. С. 101–108.
5. Астанова С.У. Развитие предпринимательства в сельскохозяйственном секторе экономики Кыргызстана // Актуальные вопросы современной экономики. 2020. № 1. С. 726–731.
6. Рудаков Н.В., Самойленко И.В. Диагностика риккетсиозов группы клещевой пятнистой лихорадки в России // Клиническая лабораторная диагностика. 2015. № 1. Т. 60. С. 50–52.
7. Рудаков Н.В., Абрамова Н.В., Штрек С.В., Шаламова Е.В., Пеневская Н.А., Рудакова С.А., Самойленко И.Е., Березкина Г.В., Зеликман С.Ю., Кумпан Л.В., Матушенко Е.В., Наумкина Е.В. Клинико-лабораторная диагностика клещевых риккетсиозов на территориях низкого риска инфицирования *Rickettsia sibirica* // Клиническая лабораторная диагностика. 2018. Т. 63. № 11. С. 717–721.

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, СОПУТСТВУЮЩИХ МЫСЛЕННОМУ ПРЕДСТАВЛЕНИЮ ДВИЖЕНИЯ

¹Трошина Е.М., ¹Машеров Е.Л., ¹Сазонова О.Б., ²Кулева А.Ю.,

¹Каверина М.Ю., ¹Кроткова О.А., ²Шарова Е.В.

¹ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии
имени академика Н.Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, e-mail: ETroshina@nsi.ru;

²ФГБУН Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва

В рамках разработки программы тренинга для реабилитации пациентов со сниженным уровнем спонтанности, для выявления объективных показателей процесса представления движения, проведено исследование на группе здоровых испытуемых с целью апробации методики. Анализировали изменения нейрофизиологических показателей, сопутствующих мысленному представлению движения. Регистрировали медленный негативный потенциал (МНП) при мысленном представлении движения (ПД) рукой в ответ на короткий звуковой сигнал (серия 1) и при предъявлении оценочного сигнала биообратной связи (БОС) как показателя эффективности выполнения задания ПД (серия 2). Проводился опрос испытуемых о тактике процесса мысленного представления движения с оценкой преобладающей модальности ощущений при реализации задачи ПД. Анализировали значения амплитудно-временных параметров МНП, длительность интервала между «стартовым» звуковым сигналом и началом медленного потенциала, факт наличия ЭМГ-активности при ПД. Нейрофизиологические показатели сопоставлялись с данными опроса испытуемых. Выявлены корреляции между направленностью изменений нейрофизиологических показателей и тактикой процесса мысленного представления движения. Показано, что анализ изменений нейрофизиологических показателей, сопутствующих мысленному представлению движения, наиболее эффективен при их комплексной оценке в сопоставлении с индивидуальными особенностями тактики выполнения задания.

Ключевые слова: мысленное представление движения, медленный негативный потенциал, биологическая обратная связь (БОС)

ANALYSIS OF CHANGES IN NEUROPHYSIOLOGICAL INDICATORS ACCOMPANYING THE MENTAL REPRESENTATION OF MOVEMENT

¹Troshina E.M., ¹Mashеров E.L., ¹Sazonova O.B., ²Kuleva A.Yu.,

¹Kaverina M.Yu., ¹Krotkova O.A., ²Sharova E.V.

¹N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Health
of the Russian Federation, Moscow, e-mail: ETroshina@nsi.ru;

²Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of RAS, Moscow

As part of the development of a training program for the rehabilitation of patients with a reduced level of spontaneity, in order to identify objective indicators of the process of representing movement, a study was conducted on a group of healthy subjects in order to test the technique. Changes in neurophysiological indicators accompanying the mental representation of movement were analyzed. A slow negative potential (SNP) was recorded when mentally representing the movement (RM) of the hand in response to a short sound signal (series 1) and when presenting an estimated biofeedback signal as an indicator of the effectiveness of the RM task (series 2). A survey of subjects was conducted on the tactics of the process of mental representation of movement with an assessment of the prevailing modality of sensations in the implementation of the RM task. The values of the amplitude-time parameters of the SNP, the duration of the interval between the "starting" sound signal and the beginning of the slow potential, the fact of the presence of EMG activity in RM, neurophysiological indicators were compared with the survey data of the subjects. Correlations between the direction of changes in neurophysiological indicators and the tactics of the process of mental representation of movement are revealed. It is shown that the analysis of changes in neurophysiological indicators accompanying the mental representation of movement is most effective in their comprehensive assessment in comparison with the individual characteristics of the tactics of the task.

Keywords: mental representation of movement, slow negative potential, biofeedback (BFB)

Электрографическим эквивалентом процесса формирования моторной программы при реализации произвольного движения является «потенциал готовности» (ПГ), который выделяется в структуре «связанных с движением потенциалов мозга» (СДПМ) [1–3]. В нашей ранее опубликованной статье [4] было показано, что при совершении заданного движения по звуковому сигна-

лу регистрируется медленный негативный потенциал (МНП), по физиологическому смыслу сходный с потенциалом готовности (ПГ). Данная работа являлась *первым этапом* разработки программы тренинга для реабилитации пациентов со сниженным уровнем спонтанности, поскольку такие пациенты не могут самостоятельно включиться в выполнение какой-либо деятельности,

в частности совершать произвольные движения, для этого им необходим внешний побудительный стимул.

Однако неизвестно, формируется ли у таких пациентов мысленное представление о движении, которое необходимо совершить, поэтому важно выявить объективные показатели процесса представления. Мы полагаем, что такими объективными показателями могут быть некоторые нейрофизиологические феномены, проявляющиеся в процессе мысленного представления движения, а использование сигналов биообратной связи (БОС) может способствовать повышению эффективности выполнения задачи представления и проявляться в изменении параметров нейрофизиологических показателей.

Для этого *вторым этапом* работы была разработка и апробация на группе здоровых людей методики с использованием звукового стимула в качестве «стартового» сигнала для реализации задачи мысленного представления движения и использование БОС-сигнала для оценки эффективности ее выполнения. Разработка методики осуществлялась нами при участии отечественной фирмы МБН практически «с нуля» и фактически является пилотным исследованием.

Целью данной работы было исследовать возможность использования модифицированной методики регистрации ПГ для выявления и анализа объективных нейрофизиологических показателей, сопутствующих мысленному представлению движения и оценить возможность применения, в качестве показателя эффективности выполнения задачи мысленного представления движения, амплитудного параметра МНП как БОС-сигнала.

Материалы и методы исследования

Обследована группа здоровых испытуемых в возрастном диапазоне 21–32 года (21 чел., добровольцы, правши). Регистрировали МНП при мысленном представлении движения (ПД) рукой (сжатие эспандера) в ответ на короткий звуковой сигнал (*серия 1*). Исследуемому объясняли, что реально выполнять движение не следует, а надо по сигналу, как можно более отчетливо, представлять кинестетические и двигательные ощущения так, как это было бы при выполнении реального движения. Сразу за воображаемым сжатием надо представить расслабление руки.

В *серии 2* (ПД-БОС) в качестве показателя эффективности представления движения (БОС-сигнал) предъявлялись два вида оценочного звукового сигнала: высокого тона – «сигнал успеха», низкого тона – «сиг-

нал неуспеха». Предъявление звукового сигнала соответствующего тона на каждой эпохе анализа было задано программой – увеличение амплитуды МНП не менее чем на 1 мкВ сопровождалось «сигналом успеха», соответственно при отсутствии повышения амплитуды предъявлялся «сигнал неуспеха». В программе имелся специальный функционал формирования отчета («Отчеты по БОС») по каждой эпохе анализа об успешности и неуспешности представления движения. Проводился опрос испытуемых о тактике процесса мысленного представления движения с оценкой преобладающей модальности ощущений при реализации задачи «представление движения».

Для выделения МНП осуществлялась монополярная запись биопотенциалов от электродов, расположенных на скальпе (С3, С4, F3, F4, Cz, Fz), референтные электроды – на мочках ушей (А1 и А2), четные отведения справа, нечетные – слева, частотная полоса максимально расширена в область медленных ритмов (до 0,01 Гц), ограничение частотной полосы частых ритмов – 20–30 Гц. Длительность анализируемой эпохи 5 с (2 с до и 3 с после «стартового» стимула), количество усредняемых эпох не менее 30. Усреднение отрезков ЭЭГ осуществлялось методом «скользящего окна», изменение амплитуды МНП оценивалось по сумме пяти последовательно выделяемых эпох. «Стартовым» стимулом для начала представления движения был звуковой сигнал, он же являлся опорным стимулом, запускающим усреднение. Длительность МНП (в мс) определялась от момента стабильного нарастания восходящего фронта потенциала до точки с максимальной амплитудой, амплитуда (в мкВ) – от начала подъема негативной фазы волны до ее максимума. Пробы проводились для правой руки, с целью контроля мышечной активности регистрировалась электромиограмма (ЭМГ) от *m. extensor carpi radialis longus*.

Для оценки пространственной представленности максимума активности (МНП) по областям головного мозга в процессе выполнения задачи представления движения было проведено топографическое картирование полной мощности исследуемой активности в пределах определенного временного интервала. Полная мощность МНП является обобщенной амплитудной характеристикой, представляющей собой средний квадрат амплитуды ответа на заданном временном отрезке и численно равной суммарной мощности по всем представленным в ответе частотным диапазонам. Для оценки мощности сигнала использовалось быстрое преобразование Фурье, реализованное

в программе «МБН-Нейрокартограф», выбирался временной интервал 2 с до и 3 с после опорного стимула, запускающего усреднение. Суммировалась мощность в полосе 1–35 Гц, усредняясь делением на ширину полосы.

Результаты исследования и их обсуждение

При представлении движения (ПД) и при представлении движения с БОС-сигналом (ПД-БОС) выделяется МНП в исследуемых скальповых отведениях, амплитудно-временные параметры потенциала представлены в табл. 1, соответственно часть А и часть Б.

Можно отметить, что средние значения анализируемых параметров МНП как в исследуемых отведениях, так и в полушариях контралатеральном и ипсилатеральном, относительно «работающей» руки, в сериях

ПД и ПД-БОС по группе испытуемых существенно не отличаются, статистическая значимая разница на уровне $p < 0,05$ не выявлена. Однако анализ временных и амплитудных параметров МНП по каждому испытуемому индивидуально позволил выявить тенденцию изменений (по числу исследуемых) в процентном отношении к общему количеству испытуемых (табл. 2).

Изменение параметров МНП при ПД-БОС в лобных и центральных областях как контралатерального, так и ипсилатерального полушария по отношению к «работающей» руке, в виде сокращения длительности и увеличение амплитуды потенциала, причем с некоторым преобладанием ипсилатерально, можно расценивать как тенденцию, а при учете количества испытуемых и процентного их соотношения данная тенденция проявляется достаточно отчетливо.

Таблица 1

Временные и амплитудные параметры МНП при представлении движения (А) и при представлении движения с БОС-сигналом (Б) в контралатеральном и ипсилатеральном полушариях (средние значения по группе испытуемых)

Отведения ЭЭГ	Отведения контралатерального полушария			Отведения ипсилатерального полушария		
	F3-A1	C3-A1	Cz-A1	F4-A2	C4-A2	Fz-A2
А – представление движения (серия ПД)						
Длительность МНП (мс)	1144	1180,5	1106,6	1142,2	1181,8	1102,7
Амплитуда МНП (мкВ)	6,4	7,3	2,8	6,5	7,7	2,9
Б – представление движения с БОС-сигналом (серия ПД-БОС)						
Длительность МНП (мс)	1145,9	1144,3	1084,4	1148,3	1144,8	1085
Амплитуда МНП (мкВ)	7,2	6,8	2,9	7,6	6,8	3,1

Таблица 2

Сокращение длительности и увеличение амплитуды МНП при представлении движения с БОС-сигналом (серия 2) (количество и процент испытуемых относительно общего числа исследованных)

Отведения ЭЭГ	Отведения контралатерального полушария			Отведения ипсилатерального полушария		
	F3-A1	C3-A1	Cz-A1	F4-A2	C4-A2	Fz-A2
Сокращение длительности МНП в серии 2	13 (61,9%)	12 (57,1%)	10 (47,6%)	14 (66,7%)	13 (61,9%)	10 (47,6%)
Без существенного изменения длительности МНП в серии 2	8 (38,1%)	9 (42,9%)	11 (52,4%)	7 (33,3%)	8 (38,1%)	11 (52,4%)
Увеличение амплитуды МНП в серии 2	12 (57,1%)	11 (52,4%)	12 (57,1%)	13 (61,9%)	14 (66,7%)	12 (57,1%)
Без существенного изменения амплитуды МНП в серии 2	9 (42,9%)	10 (47,6%)	9 (42,9%)	8 (38,1%)	7 (33,3%)	9 (42,9%)

В обеих сериях отмечено, что негативное отклонение медленного потенциала начинается после «стартового» сигнала и проявляется в широком временном диапазоне (для серии ПД 103,2–1368,2 мс, для серии ПД-БОС 109–1352,5 мс). Было сделано предположение, что временные параметры интервала (Т) между «стартовым» сигналом и началом МНП могут быть достаточно информативной составляющей в структуре процесса подготовки к реализации задачи представления движения. Достаточно большим разбросом временных параметров указанного интервала (Т) была обусловлена целесообразность разделения испытуемых на подгруппы.

По результатам 1-й серии (ПД) определились три подгруппы: 1 – минимальные значения временного интервала 103,2–358,5 мс (у 5 чел.), 2 – максимальные значения 1271,5–1368,2 мс (у 3 чел.), 3 – средние значения у большинства испытуемых (13 чел.) в диапазоне 371,4–846,5 мс.

При сопоставлении с отчетами о тактике представления движения было отмечено, что у испытуемых 1-й подгруппы (5 чел. – 23,8%) представление формировалось в виде образов на основе одновременного сочетания в различных вариантах ощущений нескольких модальностей (кинестетическая + тактильная + зрительная, зрительная + тактильная + вербальная команда, тактильная + зрительная + кинестетическая). В качестве преобладающей модальности у трех человек указывалась зрительная, у двух кинестетическая и у одного тактильная. У некоторых испытуемых (3 чел.) фиксировалось появление после «стартового» сигнала низкоамплитудной ЭМГ-активности. Длительность МНП отмечалась в пределах среднегрупповых значений или несколько меньше (736,5–1144,3 мс), а значения амплитуды представлены в достаточно широком диапазоне 6,4 мкВ–20,5 мкВ (10,2 мкВ среднее значение).

В отчетах испытуемых 2-й подгруппы (3 чел. – 14,3%) не было четко сформулированной тактики представления движения, в двух случаях указывалось на кинестетические ощущения. Длительность МНП значительно превышала среднегрупповые значения (1658,7 мс, 1443,5 мс, 1983,5 мс – значения по испытуемым), амплитуда также по испытуемым – 6,2; 5,4; 1,3 мкВ (среднее значение 4,3 мкВ).

Представление движения у испытуемых 3-й подгруппы (13 чел. – 61,9%) сопровождалось формированием образа двигательной реакции на основе сочетания ощущений нескольких модальностей в разных комбинациях, преимущественно попарно с разной степенью преобладания одной из них: кинестетическая + зрительная, тактильная

+ кинестетическая, зрительная + вербальная команда, зрительная + тактильная. В качестве доминирующей модальности у шести человек указывалась зрительная, у пяти кинестетическая и у двух тактильная. Наряду с этим у шести испытуемых после «стартового» сигнала отмечалась низкоамплитудная ЭМГ-активность. Длительность МНП определялась в диапазоне 1268,4–1457,8 мс, значения амплитуды имели достаточно широкий разброс – 3,2–23,1 мкВ (6,1 мкВ среднее значение). Убедительных корреляций между изменениями амплитудно-временных параметров МНП, порядком сочетанности и доминирования модальностей ощущений отмечено не было.

Наличие ЭМГ-активности после «стартового» сигнала свидетельствует о «включении» моторного компонента при выполнении задачи и, по-видимому, является дополнительным фактором, способствующим четкости образа представляемого движения.

При сопоставлении значений временного интервала (Т) от «стартового» сигнала до начала МНП, изменений амплитудно-временных параметров МНП и при учете тактики мысленного представления движения испытуемыми, прослеживались определенные корреляции, которые из-за количественного различия подгрупп на данном этапе работы можно расценивать не как определенный вывод, а лишь как тенденцию (табл. 3).

Преобладание амплитуды и меньшие значения длительности МНП отмечались в тех наблюдениях, когда у испытуемых достаточно четко формировался образ представляемого движения и выявлялись наименьшие временные значения интервала (Т) между «стартовым» сигналом и началом МНП.

По результатам 2-й серии (ПД-БОС) испытуемые также были разделены на подгруппы. У испытуемых 1-й подгруппы (9 человек – 42,9%) длительность временного интервала (Т) между «стартовым» стимулом и началом МНП определялась в диапазоне 109–379,5 мс, длительность МНП в достаточно широких пределах (722–1398,2 мс) и амплитуда в диапазоне 5,7–25,8 мкВ (10,9 мкВ среднее значение). При сопоставлении с отчетами о тактике представления движения в данную подгруппу вошли испытуемые, у которых достаточно четко формировался образ движения на основе одновременного сочетания ощущений нескольких модальностей или сочетания двух модальностей без убедительного преобладания их сочетанности. ЭМГ-активность после «стартового» сигнала отмечалась у 8 чел. Данную подгруппу составили испытуемые 1-й подгруппы и часть испытуемых (4 чел.) из 3-й подгруппы серии ПД.

Таблица 3

Сопоставление значений временного интервала (Т)
от «стартового» сигнала, амплитудно-временных параметров МНП
и тактики мысленного представления движения (серия ПД)

	Длительность интервала Т (мс)	Длительность МНП (мс)	Амплитуда МНП (мкВ)	Тактика мысленного представления движения
1-я подгруппа (5 чел.)	103,2–358,5	736,5–1144,3	6,4–20,5 (10,2)	Формирование образа движения на основе одновременного сочетания ощущений нескольких модальностей
2-я подгруппа (3 чел.)	1271,5–1368,2	1443,5–1983,5	1,3–6,2 (4,3)	Без четко сформулированной тактики представления движения или отсутствие четкого образа движения
3-я подгруппа (13 чел.)	371,4–846,5	1268,4–1457,8	3,2–23,1 (6,1)	Формирование образа движения на основе сочетания ощущений двух модальностей

Таблица 4

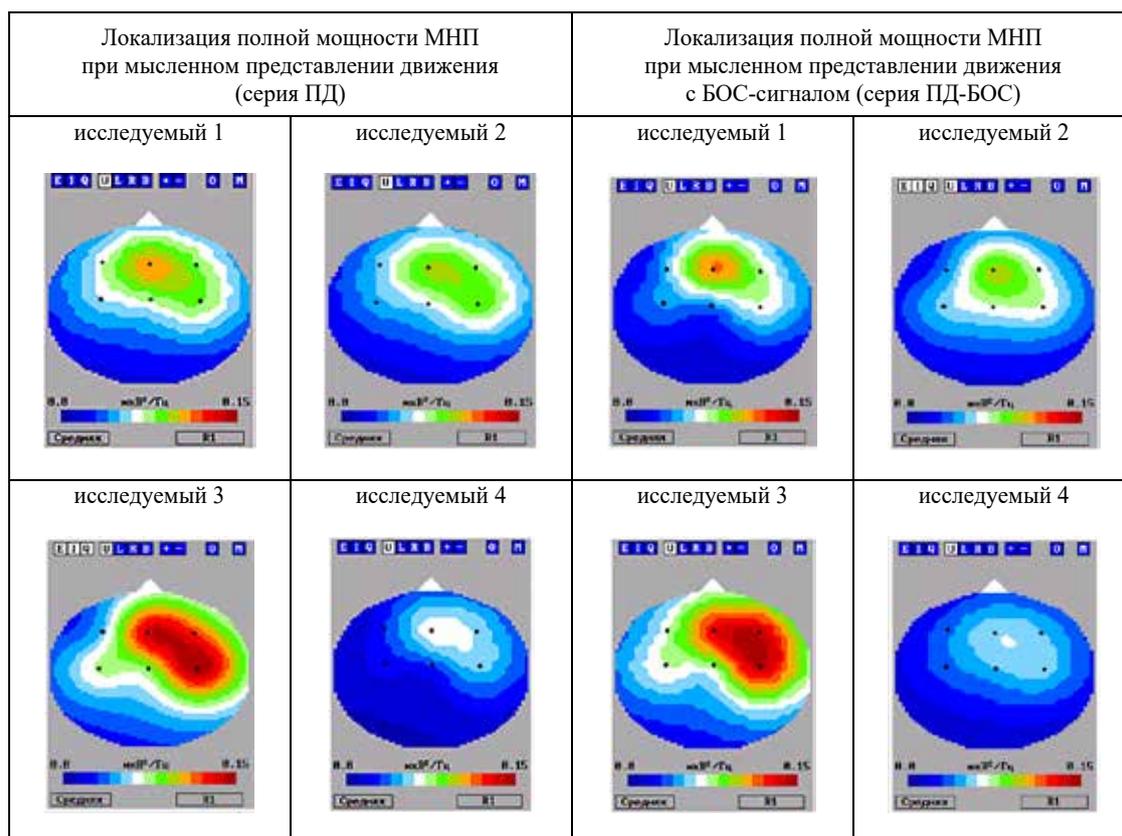
Сопоставление значений временного интервала (Т)
от «стартового» сигнала, амплитудно-временных параметров МНП
и тактики мысленного представления движения (серия ПД-БОС)

	Длительность интервала Т (мс)	Длительность МНП (мс)	Амплитуда МНП (мкВ)	Тактика мысленного представления движения
1-я подгруппа (9 чел.)	109–379,5	722–1398,2	5,7–25,8 (10,9)	Формирование образа движения на основе одновременного сочетания ощущений нескольких модальностей (преимущественно) и сочетания ощущений двух модальностей
2-я подгруппа (12 чел.)	435–1352,7	1372,6–1516	1,3–18,2 (7,4)	Формирование образа движения на основе сочетания ощущений двух модальностей и нечеткого определения образа движения

У испытуемых 2-й подгруппы (12 чел. – 57,1%) длительность временного интервала (Т) между «стартовым» стимулом и началом МНП определялась в диапазоне 435–1352,7 мс, длительность МНП имела разброс 1372,6–1516 мс и амплитуда – 1,3–18,2 мкВ (7,4 мкВ среднее значение). По отчетам испытуемых, представление движения у большинства из них сопровождалось формированием образа двигательной реакции на основе сочетания ощущений двух модальностей с разной степенью преобладания либо определение тактики представления движения давалось нечетко. В данную группу вошло большинство испытуемых (9 чел.) 3-й подгруппы и все испытуемые 2-й подгруппы серии ПД (табл. 4). Также отмечено, что у нескольких испытуемых (4 чел.) после «стартового» сигнала появилась низкоамплитудная ЭМГ-активность.

Отмечено, что средние по группе значения амплитудных параметров МНП имеют тенденцию к увеличению в серии ПД-БОС по сравнению с серией ПД, но значительно вариативны у разных испытуемых, что, по-видимому, обусловлено разной выраженностью реакции на оценочный звуковой «сигнал успеха» в качестве БОС-сигнала и индивидуальными особенностями тактики мысленного представления движения.

В целом в сериях ПД и ПД-БОС при сопоставлении исследуемых временных параметров (длительность интервала Т и МНП) по группам, выявляются сходные результаты, а некоторое количественное изменение состава подгрупп, вероятно, можно объяснить тем, что серии проводились последовательно с незначительной временной паузой (не больше 5 мин) и в серии ПД-БОС проявлялся эффект обучения/тренировки.



Примеры карт полной мощности МНП при мысленном представлении движения (серия ПД) и при мысленном представлении движения с БОС-сигналом (серия ПД-БОС)

Интервал (Т) между «стартовым» сигналом и началом МНП, по-видимому, можно рассматривать как электрографический эквивалент времени реакции. Значительно короче этот интервал был в тех случаях, когда представление движения сопровождалось формированием четкого образа на основе одновременного сочетания ощущений как нескольких модальностей (преимущественно), так и при попарном сочетании модальностей. «Включение» моторного компонента (ЭМГ-активность после «стартового» сигнала) было в этих случаях дополнительным фактором, «усиливающим» четкость образа представляемого движения.

Проведен анализ МНП, индивидуально по испытуемым, с помощью топографического картирования его полной мощности, сопоставлены карты мощности медленного потенциала, зарегистрированного в 1-й (ПД) и 2-й (ПД_БОС) сериях. У разных испытуемых отмечалась разная степень выраженности максимальной мощности, однако представленность по отведениям у большинства испытуемых была идентичной. Выявились преобладание МНП, зарегистрированных

в обеих сериях, в лобно-сагиттальном отведении, а также в лобном и центральном отведениях в полушарии ипсилатеральном по отношению к «работающей» руке. Примеры карт полной мощности МНП представлены на рисунке.

Заключение

Изучение электрографических коррелятов мысленно представляемых движений, в большинстве известных из литературных источников исследований, основывается на анализе изменений суммарной биоэлектрической активности мозга (ЭЭГ) с оценкой частотных составляющих ЭЭГ [5, 6], выявлением характерных паттернов активности [7, 8], специфичности пространственной организации биопотенциалов, анализом функционального взаимодействия структур мозга и сопоставлений изменений ЭЭГ с данными нейровизуализационных методов (фМРТ) [9–11], в отдельных исследованиях изучались электрографические характеристики потенциалов мозга, связанных с движением при мысленном представлении движения [12].

Настоящее исследование проводилось с целью апробации на группе здоровых людей разработанной нами методики и основывалось на комплексном анализе нейрофизиологических показателей, сопутствующих мысленному представлению движения, в сопоставлении с индивидуальными особенностями тактики представления движения.

Показано, что при представлении движения после «стартового» звукового сигнала формируется МНП в лобных, лобно-сагиттальных и центральных областях полушарий. При анализе длительности и амплитуды медленного потенциала, в сопоставлении с картированием его мощности, выявляется преимущественная выраженность МНП по амплитуде в полушарии ипсилатеральном по отношению к «работающей» руке. Данный факт согласуется с литературными данными, полученными на основе анализа ЭЭГ и фМРТ-ответов мозга здорового человека, где показано нарастание активации лобных отделов и структур ипсилатерального полушария при воображаемом движении руки [11], выраженная ипсилатеральная активация во фронто-париетальной области коры при представлении движения [7, 8], отмечена не только контралатеральная, но и ипсилатеральная представленность СДПМ при мысленных движениях руками [12].

Выявленный в нашем исследовании достаточно большой разброс значений амплитудно-временных параметров МНП у испытуемых дает основание полагать их зависимость от тактики мысленного представления движений на основе индивидуальной значимости ощущений разных модальностей. В отдельных работах, на основании анализа ЭЭГ, отмечалась значимость зрительных, моторных и кинестетических образов при представлении движения [13, 14]. Нами показано, что при представлении движения наименьшая длительность и преобладание амплитуды МНП коррелировали с формированием образов на основе одновременного сочетания ощущений нескольких модальностей. Важным фактором, способствующим четкости образа представляемого движения, было наличие ЭМГ-активности как показателя «включения» моторного компонента при выполнении задачи.

Временной интервал между «стартовым» сигналом и началом МНП рассматривался нами как электрографический эквивалент времени реакции, который необходимо учитывать при анализе процесса подготовки к реализации задачи представления движения.

Таким образом, исследованные нейрофизиологические феномены, проявляющиеся в процессе мысленного представления движения, могут рассматриваться в качестве объективных показателей процесса представления движения.

Показано, что анализ нейрофизиологических показателей, сопутствующих мысленному представлению движения, наиболее эффективен при их комплексной оценке и в сопоставлении с индивидуальными особенностями тактики представления движения.

Увеличение амплитуды МНП при предъявлении звукового «сигнала успеха», по полученным нами в настоящем исследовании результатам, можно оценивать лишь как тенденцию, эффективность использования параметров амплитуды МНП в качестве БОС-сигнала нельзя считать однозначно доказанной. Значения амплитудных параметров МНП вариативны у разных испытуемых, что может быть обусловлено как разной выраженностью индивидуальной реакции на оценочный сигнал, так и индивидуальной значимостью модальности сигнала. Для получения наиболее четкого обоснования и доказательности сделанных предположений мы планируем продолжить исследование при количественном увеличении групп испытуемых с более детальной оценкой индивидуальных особенностей решения предложенной задачи мысленного представления движения на основе расширенного опроса испытуемых.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-29-01002 мк.

Список литературы

1. Синицкая Е.Ю., Грибанов А.В. Потенциалы мозга, связанные с движением // Экология человека. 2014. № 1. С. 49–59.
2. Brunia C.H.M., van Boxtel G.J.M., Bocker K.B.E. Negative slow waves as indices of anticipation: the Bereitschaftspotential, the Contingent negative variation, and the stimulus-preceding negativity. The Oxford Handbook of Event-Related Potential Components. Oxford Library of Psychology. Steven J. Luck, Emily S. Kappenman. Oxford University Press. 2011. P. 189–208. DOI: 10.1093/oxfordhb/9780195374148.013.0108.
3. Трошина Е.М., Сазонова О.Б., Кроткова О.А., Шарова Е.В., Каверина М.Ю., Болдырева Г.Н., Жаворонкова Л.А. Связанные с движением потенциалы мозга человека как электрографический коррелят подготовки и реализации произвольного двигательного акта // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 5. С. 57–62. DOI: 10.17513/mjprfi.13068.
4. Трошина Е.М., Сазонова О.Б., Кроткова О.А., Шарова Е.В., Каверина М.Ю., Суханова А.В. Исследование медленных преддвигательных потенциалов мозга человека (модификация методики регистрации потенциала готовности) // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. №10. С. 61–66. DOI:10.17513/mjprfi.13293.

5. Кирой В.Н., Владимирский Б.М., Асланян Е.В., Бахтин О.М., Миняева Н.Р. Электрографические корреляты реальных и мысленных движений: спектральный анализ // Журнал высшей нервной деятельности. 2010. Т. 60. № 5. С. 525–533.
6. Smith M.M., Weaver K.E., Grabowski T.J., Rao R.P., Darvas F. Non-invasive detection of high gamma band activity during motor imagery. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2014. Vol. 8. Article 817. DOI: 10.3389/fnhum.2014.00817.
7. Васильев А.Н., Либукрина С.П., Калан А.Я. Латерализация паттернов ЭЭГ у человека при представлении движения руками в интерфейсе мозг-компьютер // Журнал высшей нервной деятельности. 2016. Т. 66. № 3. С. 302–312.
8. Paek A.Y., Agashe H.F., Contreras-Vidal J.L. Decoding repetitive finger movements with brain activity acquired via non-invasive electroencephalography. *Frontiers in Neuroengineering*. 2014. №7. P. 3. DOI: 10.3389/fneng.2014.00003.
9. Berman B.D., Horovitz S.G., Venkataraman G., Hallett M. Selfmodulation of primary motor cortex activity with motor and motor imagery tasks using real-time fMRI-based neurofeedback. *Neuroimage*. 2012. № 59 (2). P. 917–925.
10. Болдырева Г.Н., Шарова Е.В., Жаворонкова Л.А., Челяпина М.В., Дубровская Л.П., Смирнова О.А., Фадеева Л.М., Пронин И.Н., Корниенко В.Н. Структурно-функциональные особенности мозга при выполнении и представлении двигательных нагрузок у здоровых людей (ЭЭГ и фМРТ исследования) // Физиология высшей нервной (психической) деятельности человека. 2013. Т. 63. № 3. С. 316–327.
11. Болдырева Г.Н., Шарова Е.В., Жаворонкова Л.А., Челяпина М.В., Дубровская Л.П., Смирнов А.С., Трошина Е.М., Пронин И.Н., Корниенко В.Н. Сопоставление фМРТ-реакций мозга здоровых людей при активных, пассивных и воображаемых движениях рукой // Медицинская визуализация. 2015. № 5. С. 100–112.
12. Лазуренко Д.М., Кирой В.Н., Асланян Е.В., Шепелев И.Е., Бахтин О.М., Миняева Н.Р. Электрографические характеристики связанных с движением потенциалов // Журнал высшей нервной деятельности. 2017. Т. 67. № 4. С. 430–444.
13. Neuper C., Scherer R., Reiner M., Pfurtscheller G. Imagery of motor actions: differential effects of kinesthetic and visual motor mode of imagery in single trial EEG. *Brain. Res. Cogn. Brain. Res.* 2005. №25(3). P. 668–677. DOI: 10.1016/j.cogbrainres.2005.08.014.
14. Bouchra H.H., Ahmad D., Aya K., Ahmad R.S. Electroencephalography Measurement to Compare Visual and Kinesthetic Motor Imagery of Squat Vertical Jump. *Int. J. Phys. Med. Rehabil.* 2016. № 4(323). P. 2.

СТАТЬИ

УДК 621.438

**ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ВОДОРОДА КАК ТОПЛИВА
ДЛЯ БУДУЩЕЙ РАБОТЫ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ****Алфаяд А.Г.Х.***ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»,
Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казань, e-mail: assemalfayad@gmail.com*

Для повышения гибкости топлива водород представляет собой возможное альтернативное топливо для газовых турбин в рамках будущего производства электроэнергии с низким уровнем выбросов, в случае производства водорода с использованием возобновляемых источников энергии. При разработке водородных газовых турбин ключевой технологией является стабильное сжигание водорода с низким содержанием оксида азота (NOx), в частности сжигание водорода с низким уровнем выбросов. Применение водорода как топлива для газовой турбины позволяет избежать различных выбросов негативных веществ, которые применяются в настоящее время, таких как природный газ. Целью данной работы является рассмотрение возможности применения водорода в качестве топлива для газовой турбины. В работе будет проведен теоретический анализ и будут обсуждаться приведенные результаты испытания газовой турбины, работающей на водороде. Также будет представлено сравнение теплоты сгорания различных видов топлива. Таким образом, разработка технологий сжигания водорода с низким уровнем выбросов является важной и сложной задачей для будущих газовых турбин, работающих на водороде. И, чтобы достигнуть максимальной эффективности от сжигания водорода, необходим тщательный выбор оборудованной турбинной установки, а именно камера сгорания.

Ключевые слова: водородная энергетика, выбросы газовых турбин, газотурбинная установка, тяжелые углеводороды, газообразное топливо, теплота

**POSSIBILITY OF USE OF HYDROGEN AS A FUEL
FOR FUTURE OPERATION OF A GAS TURBINE****Alfayyad A.G.Kh.***Kazan (Volga Region) Federal University, Institute of Geology and Oil and Gas Technologies,
Kazan, e-mail: assemalfayad@gmail.com*

To increase fuel flexibility, hydrogen is a possible alternative fuel for gas turbines in the framework of future low-emission electricity generation, in the case of hydrogen production using renewable energy sources. In the development of hydrogen gas turbines, the stable combustion of hydrogen with low nitrogen oxide (NOx) content, in particular low emission hydrogen combustion, is a key technology. The use of hydrogen as a fuel for gas turbines makes it possible to avoid various emissions of negative substances that are currently used as natural gas. The purpose of this work is to consider the possibility of using hydrogen as a fuel for a gas turbine. The paper will conduct a theoretical analysis and discuss the results of the tests on the application of a gas turbine powered by hydrogen. Comparisons of heat of combustion between different fuels will also be presented. Thus, the development of low emission hydrogen combustion technologies is an important and challenging task for future hydrogen gas turbines. And in order to achieve maximum efficiency from hydrogen combustion, a careful choice of an equipped turbine plant, namely a combustion chamber, is necessary.

Keywords: hydrogen energy, gas turbine emissions, gas turbine plant, heavy hydrocarbons, gaseous fuel, heat

Объем применения водорода разнообразен – в частности, его используют в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания и в камерах сгорания электростанций.

Одним из важных преимуществ водородной энергетики является разнообразие способов получения водорода. Существует несколько способов получения водорода:

- 1) паровая конверсия метана;
- 2) газификация угля;
- 3) электролиз воды;
- 4) пиролиз;
- 5) частичное окисление;
- 6) биотехнология [1].

За последнее десятилетие глобальный спрос на возобновляемую энергию быстро увеличился, что ставит новые задачи перед традиционными системами произ-

водства электроэнергии. Атомным и угольным электростанциям в будущем будет очень трудно участвовать в производстве электроэнергии, особенно в Европе. В случае преодоления новых вызовов газотурбинная технология имеет реальные шансы закрепиться и расширить свою роль в будущем производстве электроэнергии.

В прошлом «эффективность» была единственным ключевым фактором развития газовых турбин. В настоящее время гибкие системы производства электроэнергии и системы хранения энергии становятся все более важными для выполнения требований рынка возобновляемых источников энергии [2].

Использование водорода в качестве авиационного топлива имеет огромные эко-

логические преимущества по сравнению с существующими системами за счет устранения монооксида углерода (CO), диоксида углерода (CO₂), оксидов серы (SO_x), несгоревших углеводородов и дыма. Выбросы водородных двигателей относительно невелики и состоят из воды и оксидов азота (NO_x), каждый из которых оказывает некоторое воздействие на окружающую среду, однако в целом значительно меньше, чем у обычных современных двигателей. Воздействие NO_x как парникового газа хорошо известно, и можно предпринять шаги для минимизации этих выбросов в водородных газотурбинных двигателях. В результате, судя по выбросам двигателей, водород является экологически безопасным вариантом для использования в будущих силовых установках [3].

Таким образом, газовая турбина в будущем должна предлагать больше эксплуатационных возможностей, таких как большее количество пусков, более низкие выбросы при частичной нагрузке, возможность горячего пуска, короткое время пуска, низкие эксплуатационные расходы и гибкость в отношении топлива для удовлетворения требований рынка возобновляемых источников энергии.

Общие сведения о применении ГТУ, работающей на водороде

Ключевая технология, необходимая для масштабного использования водорода в газовой электроэнергетике, – водородная турбина. По оценке компании Mitsubishi Hitachi Power Systems (MHPs), на существующих газотурбинных установках можно увеличить долю водорода до 20% в смеси его с природным газом без существенных изменений в конструкции. MHPs успешно испытала в Японии сверхмощную газовую турбину серии J в работе на топливной смеси из природного газа (70%) и водорода (30%). Испытания были проведены на заводе в Такасаго на парогазовой установке мощностью 700 МВт (КПД – 63% с температурой газов после камеры сгорания ГТУ – 1600 °C). Для сжигания топлива использовались горелки с вихревым перемешиванием. Благодаря водороду выбросы CO₂ сократились на 10%, а выбросы оксидов азота, по мнению компании, «остались на удовлетворительном уровне» [4].

Из-за больших различий в физических свойствах водорода по сравнению с другими видами топлива, такими как природный газ, сжигание водородных газов является очень сложной задачей, особенно для сжигания с низким уровнем выбросов. Компания Kawasaki Heavy Industries разработала три

различных варианта системы сжигания H₂, которые показаны на рис. 1.

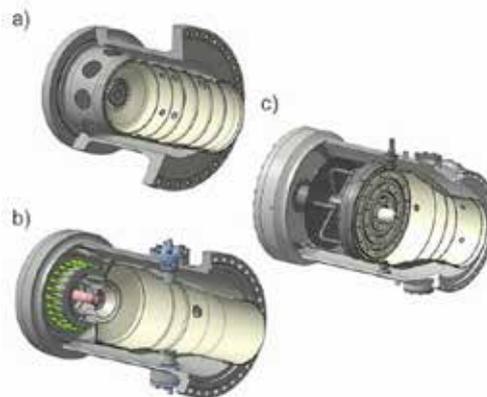


Рис. 1. Различные системы сжигания водорода: а) диффузионное пламя, б) дополнительная горелка, в) горелка микро-микс [2]

Диффузионная пламенная камера сгорания на рис. 1а, может работать на 100% водороде и 100% природном газе, а также на их смесях. Впрыск воды используется для достижения низкого уровня выбросов.

Первая газовая турбина с такой диффузионно-пламенной камерой сгорания была использована в проекте «Разработка технологии «умного» сообщества путем использования водородных систем». Этот проект субсидируется NEDO (Организация по развитию новых энергетических и промышленных технологий). Успешный ввод в эксплуатацию состоялся 19 и 20 апреля 2018 г. на демонстрационном заводе в Кобе. На рис. 2 показан интерфейс управления технологическим процессом во время режима работы на 100% водородном топливе. Выходная электрическая мощность составляет около 1,5 МВт.

Количество измеренных выбросов NO_x при 100% сгорании водорода составляет 50 ppm (16% об. O₂) [2].

Горение водорода

Газообразный водород обладает высокой реакционной способностью и поэтому имеет очень высокую скорость ламинарного горения. При добавлении к топливам с более медленным горением водород расширяет пределы воспламеняемости и увеличивает распространение пламени. Это может привести к более эффективному сгоранию и снижению выбросов опасных загрязнителей воздуха и парниковых газов [5]. Показано [6], что водород увеличивает скорость ламинарного пламени за счет кинетических, тепловых и диффузионных эффектов.

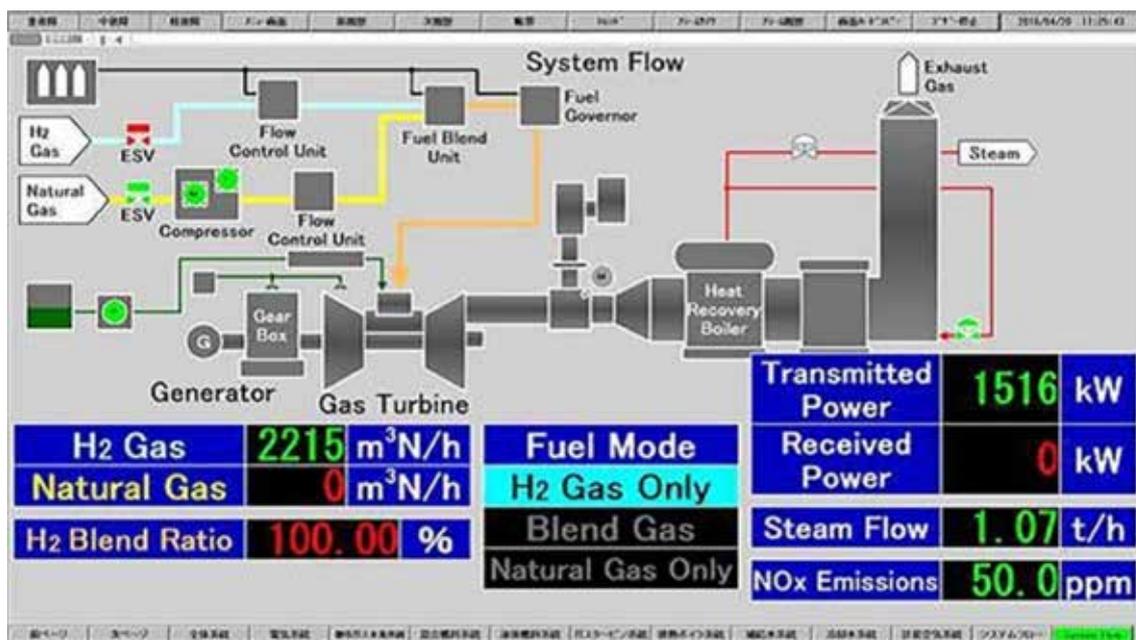


Рис. 2. Интерфейс управления технологическим процессом на заводе в Кобе [2]

Кинетический эффект вносит наибольший вклад в увеличение скорости пламени, в то время как диффузионные эффекты настолько малы, что ими можно пренебречь [6].

Несмотря на то, что все производители газовых турбин предприняли значительные усилия, чтобы более четко определить, какое количество водорода может быть допустимо для существующих продуктов газовых турбин, какие вредные последствия могут быть вызваны (например, более высокие выбросы NO_x, сокращение срока службы компонентов тракта горячего газа) и какие – немедленные и долгосрочные – меры могут быть предприняты для решения проблем, предстоит еще большая работа по подготовке газовых турбин для работы с газообразным топливом с высоким содержанием водорода (в основном водород, смешанный с природным газом). Большой опыт работы с топливом с высоким содержанием водорода был накоплен с продуктами для газовых турбин, разработанными для сжигания синтез-газа (полученного в результате газификации ископаемого топлива или биомассы) с концентрацией H₂ в диапазоне от 30 до 60% об. H₂ в зависимости от используемого сырья и технологии газификации (остальным топливным компонентом является в основном монооксид углерода CO). Чтобы справиться с растущим количеством водорода (в результате электролиза воды), подмешиваемого к природному газу, не-

обходимо пересмотреть и адаптировать опыт, накопленный в отношении синтез-газа. Соответственно, большинство OEM-производителей газовых турбин могут предложить специализированные продукты для газовых турбин (первоначально разработанные для применения в синтез-газе), которые также могут работать на смесях природного газа и водорода со значительно высоким содержанием H₂ (около 60% по объему, в некоторых случаях даже до 100% H₂). Эти газотурбинные двигатели, тем не менее, требуют специальной технологии сгорания (диффузионная горелка, разбавление азотом и/или паром, впрыск воды), чтобы справиться со сложными свойствами высокореактивных топливных смесей, и чаще всего все еще не работают, обеспечивают такие же низкие значения выбросов NO_x (25 ppm), которые гарантируют газовые турбины, работающие на природном газе [7].

Теплота сгорания

При сгорании топлива выделяется тепло. Количество тепла, выделяемое различными видами топлива при сгорании, выражается в теплотворной способности [8]. Под теплотой сгорания понимают количество тепла в кДж, которое выделяет при полном сгорании 1 кг твердого или жидкого топлива, или 1 м³ газообразного топлива при нормальных физических условиях. Различают высшую и низшую теплоту сгорания [8].

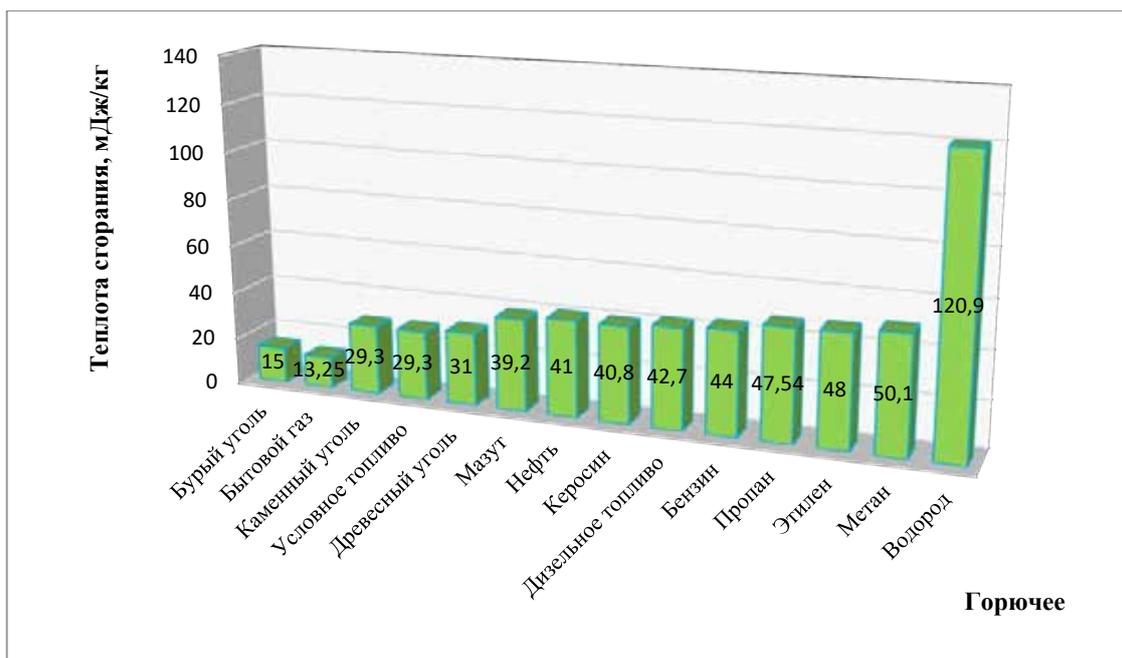


Рис. 3. Удельная теплота сгорания веществ

В газообразных продуктах сгорания любого топлива содержатся водяные пары, образующиеся в результате сгорания водорода и испарения влаги топлива. Если продукты сгорания охладить до конденсации водяных паров, в них содержащихся, то освободится тепло, затраченное на парообразование влаги.

В промышленных установках, сжигающих топливо, в тепловых двигателях различного типа газообразные продукты сгорания выбрасываются в атмосферу при таких, как правило, температурах, при которых конденсации водяных паров не происходит и, следовательно, теплота их конденсации не высвобождается для использования. Теплотехнические расчеты в подобных случаях производят по нижней теплоте сгорания.

Если процессы теплообмена между газообразными продуктами сгорания и контактируемой с ними жидкостью (контактные водонагреватели) протекают, как правило, с настолько глубоким охлаждением, что водяные пары, содержащиеся в газах, конденсируются. Высвобождаемая при этом теплота используется на подогрев жидкости в аппарате. В этих и подобных случаях теплотехнические расчёты следует вести по высшей теплоте сгорания [9]. Теплоты сгорания индивидуальных веществ представлены на рис. 3 физико-химических величин.

Обзор результатов по применению ГТУ, работающей на водороде

Предыдущие исследования, о которых сообщалось в литературе по изучению роли водорода в энергетической системе, включали: подробные исследования горения для изучения влияния на стабильность пламени; исследования технических последствий подмешивания водорода в процесс сгорания в газовых турбинах; и исследования роли водорода в будущих энергетических системах в целом. Добавление водорода в газовые турбины влияет на стабильность пламени, поскольку водород изменяет химический состав горения [10]. Влияние на стабильность пламени было изучено несколькими группами, подчеркнувшими важность этого фактора. В работе [11] пришли к выводу, что метан, обогащенный водородом, значительно влияет на пределы обратного воспламенения, особенно для так называемого П-образного пламени. В работе [12] исследовали стабильность пламени при изменении формы пламени для различных долей водорода и пришли к выводу, что срыв пламени представляет собой риск при переходе между формами пламени. В работе [13] исследовали стабильность пламени синтез-газа, обогащенного водородом, и обнаружили пониженную стабильность пламени при 50 об. % водорода. В работе [14] изучили влияние термоакустической нестабильности сме-

сей водорода и метана и пришли к выводу, что большинство экспериментальных измерений указывают на нестабильность при соотношении компонентов смеси выше 25 об.% водорода. Тем не менее в работе [15], смоделировав концепцию ступенчатого сжигания, пришли к выводу, что 50 об.% водорода можно смешать с метаном без снижения выходной мощности. В отдельном исследовании [16] подтвердили результаты работы [15] в испытательном центре и пришли к выводу, что стабильное горение может быть достигнуто при содержании водорода до 70 об.% с использованием ступенчатого сжигания, а при уровнях > 70 об.% ожидается лишь незначительное снижение выходной мощности. Аналогичные результаты были получены в работе [17], которые успешно провели испытание с полной газовой турбиной («испытание полного двигателя») с 60% водорода при сохранении стабильного горения и оксида азота (NOx) выбросы на уровне < 25 частей на миллион (ppm). Кроме того, поставщики газовых турбин заявили, что в некоторых из их газовых турбин в настоящее время возможно соотношение смешивания до 60%, а некоторые поставщики стремятся увеличить это до 100% объединение производителей турбин [18]. Процесс горения и стабильность пламени

необходимы для работы газовой турбины. Следовательно, необходимы более детальные исследования, чтобы понять полностью обогащенное водородом горение. Несмотря на заявления производителей о соотношениях смешивания от 60% до 100% по объему, фактический опыт использования водорода в газовых турбинах с обычными камерами сгорания с предварительным смешиванием в течение более длительных периодов времени до сих пор ограничивался более низкими долями водорода [10], например 12% водорода, который подается в газовую турбину в течение 18 000 эквивалентных часов работы, как сообщают в работе [19].

В работе [20] исследовали возможности применения водорода и различных видов топлива в качестве основного топлива для минимизации выбросов и улучшения характеристик работы газотурбинной установки. По их результатам исследования получены основные характеристики двигателя ГТУ при работе на разных видах топлива, представлено на рис. 4. Авторы пришли к выводу, что применение водорода в качестве топлива для газовых турбин позволяет сократить не только расходы на топливоподготовку, но и минимизировать выбросы и улучшить характеристики работы газотурбинной установки.

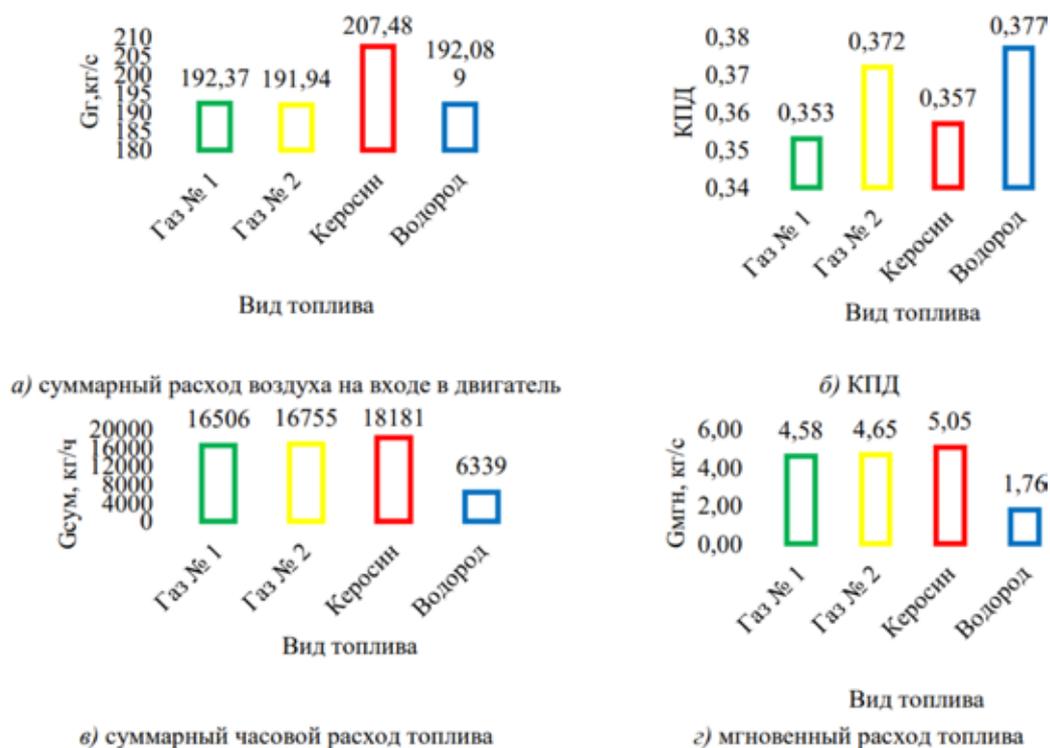


Рис. 4. Основные характеристики двигателя при работе на разных видах топлива [20]

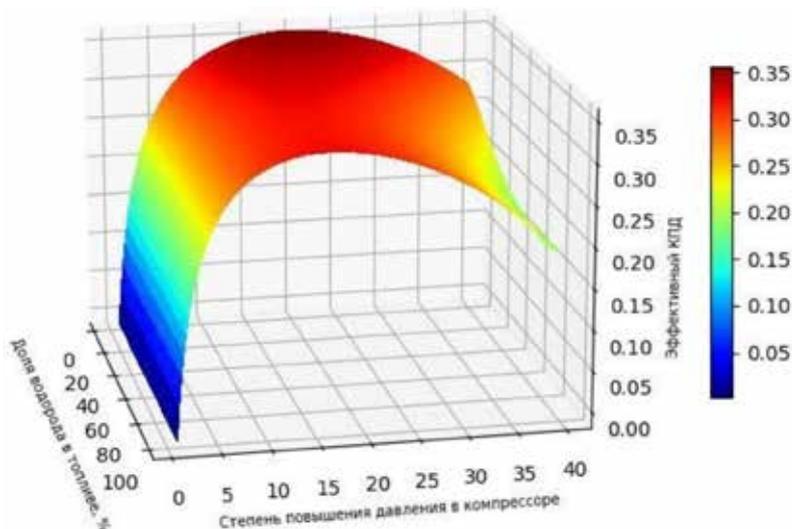


Рис. 5. Графики зависимостей эффективного КПД от степени повышения давления и доли водорода в топливе при $T^* = 1100 \text{ K}$ [21]

В работе [21] исследовали влияние водорода в топливе на эффективные показатели ГТУ при различном содержании водорода в смеси с природным газом. Их результаты показывают, что низшая теплота сгорания уменьшается по мере увеличения доли водорода. Это связано с тем, что основными элементами топлива, которые выделяют больше нижней теплоты сгорания, являются углеводороды. Несмотря на то, что высшая теплота сгорания водорода выше, чем у метана, при сгорании водорода образуется большое количество воды, поэтому часть теплоты, выделившаяся при его горении, уходит на ее испарение, поэтому по сравнению с углеводородами он имеет меньшую низшую теплоту сгорания, а следовательно, при сжигании топлива выделяется меньше теплоты. На рис. 5 представлены графики зависимости эффективного КПД, как можно видеть из графиков, при повышении доли водорода происходит снижение КПД, а максимум находится при его содержании равном 0%. Это происходит из-за сильного увеличения относительного расхода топлива.

Исходя из вышеописанных исследований, промышленных заявлений и опыта, мы предполагаем, что газовые турбины разрабатываемой в настоящее время технологии смогут использовать для топлива с высокой долей водорода или даже 100% водорода.

В сочетании с использованием возобновляемых источников энергии для его производства водород представляет собой возможное альтернативное топливо для газовых

турбин в рамках будущего производства электроэнергии с низким уровнем выбросов.

Ввод в эксплуатацию первой в мире диффузионно-пламенной камеры сгорания с газовой турбиной, работающей на 100% водороде, был успешно проведен в Кобе, Япония.

Кроме того, испытательная горелка микро-микс (Micro-Mix) с низким уровнем выбросов, работающая на водороде, прошла успешные испытания в атмосферных условиях и под давлением и доказала свою способность работать с низким содержанием NO_x в сухом состоянии в широком рабочем диапазоне.

Таким образом, газовая турбина в будущем должна предлагать больше эксплуатационных возможностей, таких как большее количество пусков, более низкие выбросы при частичной нагрузке, возможность горячего пуска, короткое время пуска, низкие эксплуатационные расходы и гибкость в отношении топлива для удовлетворения требований рынка возобновляемых источников энергии.

Список литературы

1. Marin G.E., Mendeleev D.I., Osipov B.M. A study on the operation of a gas turbine unit using hydrogen as fuel. Journal of Physics: Conference Series. 2021. No 1891 (1). P. 012055. DOI: 10.1088/1742-6596/1891/1/012055.
2. Nurettin T.M., Ashikaga A.H., Harald F. Enhancement of fuel flexibility of industrial gas turbines by development of innovative hydrogen combustion systems. Gas for energy. 2018. Vol. 1. P. 1–5.
3. Marek C.J., Timothy D.S., Rishna K. Low-Emission Hydrogen Combustors for Gas Turbines Using Lean Direct Injection, NASA Glenn Research Center, Cleveland, Ohio 44135, 41 AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit AIAA–2005–3776, Tucson, Arizona, July 10–13, 2005.

4. Гриб Н. Водородная энергетика: мифы и реальность // Национальный отраслевой журнал 2019. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ngv.ru/upload/iblock/224/224b8a5647503ebe18e4180a43431d41.pdf> (дата обращения: 21.03.2022).
5. Nilsson E.H., Larfeldt J., Author V.K. Hydrogen gas as fuel in gas turbines. 2015. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/EF2015-121+Hydrogen+fuel+gas+turbines.pdf> (дата обращения: 21.03.2022).
6. Tang C.L., Huang Z.H., Law C.K. Determination, correlation, and mechanistic interpretation of effects of hydrogen addition on laminar flame speeds of hydrocarbon-air mixtures. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2011. Vol. 33. P. 921–928.
7. Etn. global. Hydrogen Gas Turbines. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://etn.global/wp-content/uploads/2020/01/ETN-Hydrogen-Gas-Turbines-report.pdf> (дата обращения: 21.03.2022).
8. Arun A.C., Mahesh V.M., Sanith P., David S., Rajesh K.P. Comparison of Calorific Values of Various Fuels from Different Petrol Stations. *International Refereed Journal of Engineering and Science*. 2017. Vol. 6. P. 26–29.
9. Рудаченко А.В., Чухарева Н.В., Байкин С.С. Газотурбинные установки для транспорта природного газа: учебное пособие. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2008. 139 с.
10. Simon O., Mikael O., Filip J. Exploring the competitiveness of hydrogen-fueled gas turbines in future energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47. P. 624–644.
11. Liu X., Michael B., Arman A.S., Senbin Y., Robert Z.S., Zhongshan L., Per P., Xue S.B., Marcus A., Daniel L. Investigation of turbulent premixed methane/air and hydrogen-enriched methane/air flames in a laboratory-scale gas turbine model combustor. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46 (24). P. 13377–13388.
12. An Q., Sina K., Jeffrey B., Sangsig Y. Flame stabilization mechanisms and shape transitions in a 3D printed, hydrogen enriched, methane/air low-swirl burner. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46 (27). P. 14764–14779.
13. Li H., Li G., Jiang Y. Laminar burning velocities and flame instabilities of diluted H₂/CO/air mixtures under different hydrogen fractions. *Int J Hydrogen Energy*. 2018. Vol. 43 (33). P. 16344–16354.
14. Zhang J., Ratner A. Experimental study on the excitation of thermoacoustic instability of hydrogen-methane/air premixed flames under atmospheric and elevated pressure conditions. *Int J Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44 (39). P. 21324–21335.
15. Ciani A., Fru G., Wood J.P. Superior fuel and operation flexibility of sequential combustion in Ansaldo Energia gas turbines. In: *Proceedings of Global Power and Propulsion Society*. 2019. [Электронный ресурс]. URL: http://gpps.global/wp-content/uploads/2021/02/GPPS-TC-2019_paper_32.pdf (дата обращения: 21.03.2022).
16. Bothien M.R., Ciani A., Wood J.P., Fruechtel G. Toward decarbonized power generation with gas turbines by using sequential combustion for burning hydrogen. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2019. Vol. 141. P. GTP-1 – GTP-27.
17. Magnusson R., Andersson M. Operation of SGT-600 (24 MW) DLE Gas Turbine With Over 60% H₂ in Natural Gas. In: *Proceedings of ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. 2020.
18. ETN. Hydrogen gas turbines – the path towards a zero-carbon gas turbine. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://etnglobal/wp-content/uploads/2020/02/ETN-Hydrogen-Gas-Turbines-report.pdf> (дата обращения: 21.03.2022).
19. Bonzani F. V94.3 – a Special application: fuelling hydrogen enriched natural gas. *Proc. PowerGen*, 2008.
20. Марьян Г.Е., Осипов Б.М., Ахметшин А.Р. Исследование применения водорода в качестве топлива для улучшения энергетических и экологических показателей работы газотурбинных установок // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2021. № 2 (23). С. 84–92.
21. Балакин А.М., Бадамшин А.Р., Матвеев Ю.В., Лаптев М.А., Барсков В.В. Особенности работы газотурбинной установки на смеси водорода и природного газа // Санкт-Петербургский политехнический университет. 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://eaf.etu.ru/assets/files/eaf21/papers/53-57.pdf> (дата обращения: 21.03.2022).

УДК 678

РАЗРАБОТКА ПОЛИМЕРНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КОМПОЗИЦИИ С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Павлычева Е.А.

*ФГБОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина»,
Москва, e-mail: pavlychevaliza@mail.ru*

Результаты данного исследования заключаются в разработке эпоксидной композиции для изготовления материалов, обладающих повышенной термостойкостью и уменьшенными величинами диэлектрической проницаемости и водопоглощения. Данная композиция может применяться для производства электроизоляционных и радиопрозрачных изделий и покрытий при изготовлении приемно-передающих устройств и комплексов для различной техники, в электронной, радиотехнической и электротехнической отраслях промышленного производства. В составе разработанной диэлектрической композиции для возможности отверждения эпоксидной смолы при комнатной температуре используется полиэтиленполиамин, в качестве модификатора эпоксидной смолы применяется фенилэтоксисилан, а наполнение полимерной матрицы проведено частицами оксида алюминия и полыми керамическими микросферами. Все добавки-модификаторы позволяют повысить термостойкость и снизить диэлектрическую проницаемость получаемого материала. Кроме того, оксид алюминия и фенилэтоксисилан также позволяют повысить изотропию свойств материала, в частности равномерность распределения поля диэлектрической проницаемости, а фенилэтоксисилан дополнительно способствует гидрофобизации поверхности материала, что снижает его водопоглощение. Выполненные исследования показали, что полученный материал сравним с известным и сходным по составу материалом, а использование разработанной эпоксидной композиции может эффективно расширить сферу практического применения диэлектрических покрытий и изделий на основе эпоксидной смолы.

Ключевые слова: диэлектрическое покрытие, эпоксидановая смола, фенилэтоксисилан, полые керамические микросферы, оксид алюминия, диэлектрическая проницаемость, водопоглощение

DEVELOPMENT OF POLYMER DIELECTRIC COMPOSITION WITH ENHANCED PERFORMANCE CHARACTERISTICS

Pavlycheva E.A.

*Federal State Educational Institution of Higher Education Russian state university of Oil and Gas
a name of I.M. Gubkin, Moscow, e-mail: pavlychevaliza@mail.ru*

The results of this research consist in the development of an epoxy composition for the manufacture of materials with increased heat resistance and reduced values of dielectric permeability and water absorption. This composition can be used for the production of electrical insulating and radio-transparent products and coatings in the manufacture of receiving and transmitting devices and complexes for various equipment, in electronic, radio engineering and electrical industries of industrial production. As part of the developed dielectric composition, polyethylene polymer is used for the possibility of curing epoxy resin at room temperature, phenylethoxysilane is used as an epoxy resin modifier, and the filling of the polymer matrix is carried out with aluminum oxide particles and hollow ceramic microspheres. All modifier additives allow to increase the heat resistance and reduce the dielectric permittivity of the resulting material. In addition, aluminum oxide and phenylethoxysilane also allow to increase the isotropy of the material properties, in particular, the uniformity of the distribution of the permittivity field, and phenylethoxysilane additionally contributes to the hydrophobization of the material surface, which reduces its water absorption. The performed studies have shown that the obtained material is comparable to the known and similar in composition material, and the use of the developed epoxy composition can effectively expand the scope of practical application of dielectric coatings and products based on epoxy resin.

Keywords: dielectric coating, epoxy resin, phenylethoxysilane, hollow ceramic microspheres, aluminum oxide, permittivity, water absorption

Полимеры и материалы на их основе являются на сегодняшний день одними из самых распространенных, практически повсеместно применяются, а объемы их производства и потребления только увеличиваются. Это связано со множеством преимуществ полимеров и полимерных основ, для большинства из которых характерно сочетание таких показателей, как легкость, прочность, электроизоляционные свойства, низкая теплопроводность, водостойкость и химическая инертность [1-3]. Основным

недостатком полимерных материалов является эффект старения полимеров под действием света, воды, температуры, кислорода, озона, механического нагружения и совместного влияния этих факторов. В результате старения происходит деструкция полимерных материалов, сопровождающаяся разрывом связей в полимерных молекулах и снижением величин всех свойств [4; 5]. Однако при отсутствии длительного влияния негативных для полимеров факторов или при их незначительном воздействии

эти материалы отличаются долговечностью и сохраняют свои свойства практически неизменными на весь период эксплуатации. Следовательно, применение данных материалов является актуальным, и для них, как и для других материалов, следует подбирать соответствующие условия эксплуатации и области применения в зависимости от свойств и состава каждого конкретного полимера или сополимера.

Одной из перспективных областей применения полимерных материалов является создание покрытий для защиты и придания эстетичного внешнего вида различным внешним поверхностям, соединениям и изделиям из различных материалов [6; 7]. Покрытия могут быть получены при помощи непосредственного нанесения путем напыления, окрашивания и т.д., могут представлять собой отдельный слой в составе многослойной конструкции или быть образованы в результате производства композиционного материала. Сами покрытия также могут состоять как из одного материала, среди которых наряду с полимерами наиболее распространены металлы и сплавы, стекло и керамика, так и представлять собой композиционный материал, в котором перечисленные материалы могут являться как связующими, так и наполнителями [3; 8; 9].

При создании защитных полимерных покрытий наиболее широко применяются термореактивные олигомеры и сополимеры [10; 11], среди которых наиболее распространены материалы на основе эпоксидной смолы [12; 13]. Эти материалы отличаются высокой технологичностью, хорошей смачивающей способностью, высокими показателями адгезионной и когезионной прочности, малой усадкой при отверждении без выделения побочных продуктов, стабильностью физико-механических свойств. Недостатками композиций на основе эпоксидных смол являются невысокая термостойкость, что значительно уменьшает диапазон их практического применения, особенно в электротехнике, а также нестабильность диэлектрических характеристик, связанная с наличием достаточно большого количества имеющихся у них полярных групп, что в свою очередь приводит к определенной гидрофильности получаемого материала. Для повышения термостойкости эпоксидные композиции нередко модифицируют кремнийорганическими соединениями, при этом дополнительно достигаются стабильность диэлектрических характеристик и снижение гидрофильности [7; 11; 14].

Целью данного исследования является получение высоких эксплуатационных ха-

рактеристик покрытий и изделий на основе эпоксидной диэлектрической композиции, модифицированной полиметилфенилсилоксаном, а также наполненной частицами оксида алюминия и полыми керамическими микросферами.

Материалы и методы исследования

Главным компонентом полимерной композиции являлась эпоксидная смола марки ЭД-20 по ГОСТ 10587-84 с содержанием эпоксидных групп 20-22,5% и динамической вязкостью 13-20 Па·с при температуре $25 \pm 0,1$ °С.

Для холодного отверждения эпоксидной смолы применялся полиэтиленполиамин (ПЭПА) по ТУ 2413-214-00203312-2002. Для модификации эпоксидной смолы был использован фенилэтоксисилан (ФЭС) марки ФЭС-50 по ТУ 2257-441-05763441-2005 с содержанием этоксильных групп -27,0 -40,0% и кинематической вязкостью 25-150 мм²/с при температуре 20 °С. Для наполнения эпоксидной композиции использованы полые керамические микросферы (ПКМ), образовавшиеся в результате флотационной обработки дымовых выбросов теплоэлектростанций, и оксид алюминия (Al₂O₃) марки ГК-2 по ГОСТ 30559-98. Полые керамические микросферы состояли на 57% из оксида кремния и на 28% из оксида алюминия, а также содержали оксиды кальция, магния, натрия и железа (III).

Для получения образцов диэлектрического материала в эпоксидную смолу последовательно вводили все компоненты в заданных экспериментом количествах, а после тщательно перемешивали и заливали в форму. Отверждение образцов материала происходило в течение 24 часов при комнатной температуре. После этого образцы вынимались из формы и на трое суток оставались при комнатной температуре для кондиционирования.

После завершения кондиционирования у образцов с помощью термогравиметрического анализа определялась термостойкость. Для этого использовались термовесы TGA-400. Водопоглощение образцов определяли по разнице масс до насыщения водой и после насыщения водой в закрытом эксикаторе в течение суток при комнатной температуре 25 °С. Диэлектрическую проницаемость определяли волноводным методом на измерительном комплексе, состоящем из прецизионной измерительной линии Р1-20, перестраиваемого генератора М31102-1 на диоде Ганна (8-11 ГГц), ферритового вентиля и отрезка волновода стандартного сечения 10x23 мм.

**Результаты исследования
и их обсуждение**

В данной работе представлены результаты исследований по определению основных эксплуатационных свойств у образцов, полученных при использовании составов композиций, представленных в таблице 1.

Интервалы, указанные в данной таблице, были ограничены в ходе предварительных экспериментов. Было выявлено, что введение полых керамических микросфер, частиц оксида алюминия и фенилэтоксисилана в количествах, которые меньше указанных в таблице 1, практически не меняет свойств образцов и не позволяет использовать данные компоненты как модифицирующие добавки. В то же время введение полых керамических микросфер в количестве более 40 мас.ч. или введение частиц оксида алюминия в количестве более 15 мас.ч. приводит к такому повышению вязкости композиции, которое затрудняет гомогенное перемешивание, заливку в форму, является причиной низких эксплуатационных свойств и анизотропии показателей материала. Введение фенилэтоксисилана в количестве свыше 60 мас.ч. практически не приводит к дальнейшей модификации свойств и является нерациональным.

Эксплуатационные свойства образцов, полученных на основе эпоксидных композиций, показаны в таблице 2.

Из полученных данных следует, что наполнение композиции полыми керамическими микросферами позволяет повысить диэлектрические показатели образцов путем

снижения диэлектрической проницаемости. Кроме того, данный компонент способствует росту термостойкости. В свою очередь, из полученных данных видно, что применение частиц алюминия для наполнения эпоксидной композиции также уменьшает величину диэлектрической проницаемости и электрические потери, способствует изотропии диэлектрических показателей и дополнительно повышает термостойкость.

Такое влияние полых керамических микросфер и оксида алюминия связано с тем, что данные материалы являются диэлектриками и отличаются высокими температурами плавления.

Кроме того, по данным таблицы 2 можно сделать вывод о том, что добавление фенилэтоксисилана способствует гомогенности при перемешивании, позволяя равномерно распределить частицы наполнителей в объеме эпоксидной композиции, что в свою очередь повышает изотропию свойств образца и равномерно распределяет поле диэлектрической проницаемости. Фенилэтоксисилан также повышает термостойкость и снижает диэлектрическую проницаемость за счет содержания в своем составе SiO_2 , который, как и применяемые наполнители, характеризуется высокими электроизоляционными свойствами и высокой температурой плавления. Помимо этого, данная добавка уменьшает водопоглощение за счет ориентации неполярных углеводородных сегментов молекул кремнийорганического соединения в стороны от образца, что приводит к гидрофобизации поверхности образца.

Таблица 1

Составы эпоксидных композиций

№ состава	Содержание компонентов, мас. ч.				
	ЭД-20	ПЭПА	ПКМ	Al_2O_3	ФЭС
1	100	10	10	5	10
2	100	10	40	10	60
3	100	10	20	15	10

Таблица 2

Эксплуатационные свойства образцов

№ образца	Водопоглощение за 24 часа, %	Термостойкость, потеря массы при 150 °С, %	Диэлектрическая проницаемость на частоте 10^{10} Гц
1	0,62	2,0	2,24
2	0,41	1,4	2,07
3	0,59	1,8	2,14

Сравнительная оценка свойств известного и разработанного диэлектрических материалов

Наименование показателя	Значение	
	Известный материал	Разработанный материал
Водопоглощение через месяц после отверждения за 24 часа, %	0,65	0,41-0,62
Термостойкость, потеря массы при 150 °С, %	2,4	1,4-2,0
Диэлектрическая проницаемость на частоте 10 ¹⁰ Гц	2,64	2,07-2,24

Для оценки перспективности применения покрытий и изделий на основе исследуемых эпоксидных композиций было проведено сравнение свойств образцов со свойствами образцов на основе известной и схожей по составу эпоксидной композиции, также отверждаемой полиэтиленполиамином и включающей в виде добавок полиметилфенилсилоксан и полые стеклянные микросферы [15]. Сравнение свойств представлено в таблице 3.

Из данных таблицы видно, что у разработанного материала основные для диэлектрика показатели несколько ниже, чем у известного материала, что позволяет судить о потенциальной эффективности его практического применения.

Заключение

В итоге данной работы был получен состав на основе 100 мас.ч. эпоксидной смолы, для отверждения которой при комнатной температуре применяется 8 мас.ч. полиэтиленполиамины. Для повышения диэлектрических показателей, снижения водопоглощения и повышения термостойкости в композицию вводят полые керамические микросферы, частицы оксида алюминия и фенилэтоксисилан.

Исследования показывают, что все вводимые в композицию добавки-модификаторы способствуют снижению диэлектрической проницаемости и повышению термостойкости получаемого после отверждения материала. Кроме того, частицы оксида алюминия способствуют изотропии свойств и поля диэлектрической проницаемости, а фенилэтоксисилан повышает гомогенность композиции и снижает водопоглощение получаемого материала за счет повышения гидрофобности его поверхности.

Эксперименты позволяют сделать вывод о том, что наиболее высокие эксплуатационные характеристики могут быть получены при введении в состав эпоксидной композиции 10-40 мас.ч. полых керамиче-

ских микросфер, 5-15 мас.ч. оксида алюминия и 10-60 мас.ч. фенилэтоксисилана.

По итогам сравнения образцов материала на основе разработанного состава композиции с известной эпоксидной композицией, также отверждаемой полиэтиленполиамином, к тому же дополнительно содержащей полиметилфенилсилоксан и полые стеклянные микросферы, можно заключить, что разработанная композиция позволяет получить сравнимый по всем показателям материал. Таким образом, применение разработанной эпоксидной композиции обоснованно.

Применение данной композиции возможно для получения электроизоляционных и радиопрозрачных изделий и покрытий при изготовлении приемопередаточных комплексов для различной техники, в электронной, радиотехнической и электротехнической отраслях промышленного производства.

Список литературы

1. Ткачук А.И., Гребенева Т.А., Чурсова Л.В., Панина Н.Н. Термопластичные связующие. Настоящее и будущее // Труды ВИАМ. 2013. № 11. С. 7.
2. Колосова А.С., Пикалов Е.С. Современные газонаполненные полимерные материалы и изделия // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 10. С. 54-67.
3. Павлычева Е.А., Пикалов Е.С. Современные энергоэффективные конструкционные и облицовочные материалы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 7. С. 76-87.
4. Перовская К.А., Петрина Д.Е., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г. Применение полимерных отходов для повышения энергоэффективности стеновой керамики // Экология промышленного производства. 2019. № 1. С. 7-11.
5. Богданов Д.А., Субботин Е.В., Ершов С.В., Казаков А.В. Исследование теплового старения полимеров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2014. № 9. С. 57-65.
6. Чухланов В.Ю., Усачева Ю.В., Селиванов О.Г., Ширкин Л.А. Новые лакокрасочные материалы на основе модифицированных пипериленистирольных связующих с использованием гальваношлама в качестве наполнителя // Лакокрасочные материалы и их применение. 2012. № 12. С. 52-55.

7. Chen X., Wen S.F., Liu Z.Q., Yue Z.F. Hybrid siloxane-epoxy coating reinforced by worm-like graphene oxide with improved mechanical properties and corrosion resistance. *Materials & Design*. 2021. Vol. 207. Article 109852.
8. Торлова А.С., Виткалова И.А., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г. Разработка энергоэффективной облицовочной керамики на основе местного сырья и стекольного боя // *Экология промышленного производства*. 2019. № 3. С. 22-26.
9. Лобанов М.Л., Кардонина Н.И., Россина Н.Г., Юровских А.С. Защитные покрытия: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 200 с.
10. Чухланов В.Ю., Селиванов О.Г. Модификация полиорганосилоксаном связующего на основе полиуретана // *Пластические массы*. 2013. № 9. С. 8-10.
11. Павлычева Е.А. Разработка композиционного термостойкого полимерного диэлектрического материала // *Инженерный вестник Дона*. 2020. № 7. С. 288-298.
12. Aparna A., Sethulekshmi A.S., Saritha A., Joseph K. Recent advances in superhydrophobic epoxy based nanocomposite coatings and their applications. *Progress in Organic Coatings*. 2022. Vol. 166. Article 106819.
13. Zhou S., Wu Y., Zhao W., Yu J., Jiang F., Wu Y., Ma L. Designing reduced graphene oxide/zinc rich epoxy composite coatings for improving the anticorrosion performance of carbon steel substrate. *Materials & Design*. 2019. Vol. 169. Article 107694.
14. Elzaabalawy A., Meguid S.A. Development of novel superhydrophobic coatings using siloxane-modified epoxy nanocomposites. *Chemical Engineering Journal*. 2020. Vol. 398. Article 125403.
15. Чухланов В.Ю., Селиванов О.Г., Киреева Ю.Г., Чухланова Н.В. Состав для термостойкой диэлектрической полимерной композиции. Патент РФ № 2670840. Оубл. 25.10.18. Бюл. № 30.

СТАТЬИ

УДК 519.111.8:517.977.55

**АЛГОРИТМ И ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЛИНЕЙНОЙ
СИНГУЛЯРНО-ВОЗМУЩЕННОЙ ДИСКРЕТНОЙ ЗАДАЧИ
ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ****Аширбаев Б.Ы., Алтымышова Ж.А.***Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры
им. Н. Исанова, Бишкек, e-mail: ashirbaev-58@mail.ru, jaltymyshova@gmail.com*

В данной статье построен алгоритм приближенного решения линейной стационарной сингулярно-возмущенной дискретной задачи оптимального управления. Так как движения рассмотренной системы являются разнотемповыми, то для построения решений исходной задачи необходимо выбрать управляющую функцию, в которой подсистемы, описывающие медленные и быстрые движения, решались бы независимо друг от друга. В работе такой подход осуществляется с помощью замены переменных в исходной системе. Однако в этом случае вытекает необходимость нахождения решений матричных уравнений Риккати и Ляпунова, которые в работе определяются с помощью степенных рядов путем приравнивания коэффициентов при одинаковых степенях малого параметра. Полученная система полностью заменяет исходную систему, выполняет условия управляемости и зависит от решений уравнений Риккати и Ляпунова, которые появились в процессе разделения данной системы. Построения оптимального управления производятся в медленной и быстрой подсистемах независимо друг от друга, с учетом соблюдения условия, указанного в работе, то есть исходное оптимальное управление выражается через обратную матрицу и возникает требование ее существования при построении алгоритма решений задачи. Этот факт также подтверждается рассмотренным в работе примером. Предложенный алгоритм решений линейной сингулярно-возмущенной дискретной задачи оптимального управления может эффективно применяться при исследовании задач оптимального управления с дискретными и цифровыми системами управления, такие свойства, как управляемость, наблюдаемость и стабилизируемость системы, а также при построении приближенного решения алгебраических матричных уравнений Риккати и Ляпунова.

Ключевые слова: управляемость системы, разнотемповые движения системы, цифровые системы управления, с уравнения Риккати и Ляпунова, обственные значения матрицы, матрицы простой структуры

**ALGORITHM AND NUMERICAL SOLUTION OF A LINEAR SINGULARLY
PERTURBED DISCRETE OPTIMAL CONTROL PROBLEM****Ashirbaev B.Y., Altymyshova Zh.A.***N. Isanov Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture, Bishkek,
e-mail: ashirbaev-58@mail.ru, jaltymyshova@gmail.com*

In this article, an algorithm for the approximate solution of a linear stationary singularly perturbed discrete optimal control problem is constructed. Since the motions of the considered system are of different tempos, in order to construct solutions to the original problem, it is necessary to choose a control function in which the subsystems describing slow and fast motions were solved independently of each other. In this paper, this approach is carried out by changing variables in the original system. However, in this case it is necessary to find solutions to the matrix equations of Riccati and Lyapunov, which are determined in the work using power series by equating the coefficients at the same powers of a small parameter. The resulting system completely replaces the original system, the controllability conditions are satisfied, and it depends on the solutions of the Riccati and Lyapunov equations that appeared in the process of separating this system. The construction of the optimal control is carried out in the slow and fast subsystems independently of each other, taking into account the observance of the conditions specified in the work, that is, the initial optimal control is expressed through the inverse matrix and the requirement arises for its existence when constructing an algorithm for solving the problem. This fact is also confirmed by the example considered in the work. The proposed algorithm for solving a linear singularly perturbed discrete optimal control problem can be effectively used in the study of optimal control problems with discrete and digital control systems, such properties as controllability, observability and stabilizability of the system, as well as in constructing an approximate solution of the Riccati and Lyapunov algebraic matrix equations.

Keywords: controllability of the system, multi-tempo motions of the system, Riccati and Lyapunov equations, digital control systems, matrix eigenvalues, matrices of simple structure

Дискретные динамические модели образуются при моделировании дискретных процессов [1] или при дискретизации непрерывных моделей [2], а также при моделировании многих технических, экономических задач и задач автоматического управления, в которых используются дискретные модели оптимального управления [3–5].

Такая необходимость вытекает из всеобщей цифровизации общества. Это означает, что цифровые устройства, информацию получают или передают в дискретные моменты времени. В связи со сложностью построения аналитических решений дискретных задач оптимального управления, широко используется асимптотический метод построения решений таких задач [6, 7].

Цель данной работы состоит в построении асимптотического алгоритма решений линейной сингулярно-возмущенной дискретной задачи оптимального управления с малым шагом. Сингулярно-возмущенные системы дифференциальных уравнений в настоящее время активно развиваются и применяются для решения широкого круга задач в различных отраслях науки [8–10]. Такие системы появляются естественным образом в процессе моделирования и исследования объектов различной природы, способных одновременно совершать быстрые и медленные движения [8–10]. В связи с этим актуальной является задача разделения медленных и быстрых движений системы. Построению оптимальных решений в задачах с разнотемповыми динамическими системами с разделением движений посвящено множество работ, а именно в сингулярно-возмущенных системах [8–11] и в дискретных задачах оптимального управления [12–14]. Данная работа является продолжением исследований дискретной задачи оптимального управления.

1. Алгоритм решений задачи

В этом разделе вводим разностное сингулярно-возмущенное уравнение с постоянными матрицами. Сначала формулируется условие, необходимое для выполнения исследуемой системы.

1.1. Постановка задачи

Объект управления описывается разностным уравнением

$$y(t+T) = Ay(t) + Bu(t), \quad (1)$$

где

$y(t) = (x(t)z(t))'$, $x(t) \in R^n$, $z(t) \in R^m$ – векторы переменных состояния,

$$A(\mu) = \begin{pmatrix} A_1 & A_2 \\ \frac{1}{\mu}A_3 & \frac{1}{\mu}A_4 \end{pmatrix}, B(\mu) = \begin{pmatrix} B_1 \\ \frac{1}{\mu}B_2 \end{pmatrix},$$

$A_1 - (n \times n)$, $A_2 - (n \times m)$, $A_3 - (m \times n)$,

$A_4 - (m \times m)$, $B_1 - (n \times r)$, $B_2 - (m \times r)$ –

постоянные матрицы, $u(t) \in R^r$ – вектор управления, $t = kT, k = 0, 1, \dots, M-1$, $M = \frac{1}{T}, T$ – малый шаг, $0 \leq T \leq 1$, μ – малый параметр, $0 < \mu < 1$, штрих обозначает транспонирование.

Систему (1) перепишем в виде

$$x(t+T) = A_1x(t) + A_2z(t) + B_1u(t), \quad (2)$$

$$\mu z(t+T) = A_3x(t) + A_4z(t) + B_2u(t).$$

Для системы (1) заданы начальные и конечные состояния:

$$y(0) = y_0 = (x(0)z(0))' = (x_0 z_0)', \quad (3)$$

$$y(MT) = y(1) = y_M = \begin{pmatrix} 1 & 1 \end{pmatrix},$$

$$= (x(1)z(1))' = (x_M, z_M)'. \quad (4)$$

Предположим выполнения для системы (1).

Условие 1. Собственные значения матрицы A_4 удовлетворяют неравенству

$$|Re\lambda_j| \leq \gamma < 1, j = \overline{1, m},$$

где γ – некоторая постоянная.

При выполнении условия (1), рассмотрим задачу минимизации функционала

$$J = \sum_{i=0}^{M-1} u'(iT)u(iT) \quad (5)$$

при ограничениях (2)–(4).

Как показано в [10, 13, 14], используя замены

$$x(t, \mu) = \tilde{x}(t, \mu) - \mu N\tilde{z}(t, \mu), \quad (6)$$

$$z(t, \mu) = \tilde{z}(t, \mu) + Hx(t, \mu), \quad (7)$$

из системы (2) получаем

$$\tilde{x}(t+T) = \tilde{A}_1\tilde{x}(t) + \tilde{B}_1u(t), \quad (8)$$

$$\mu\tilde{z}(t+T) = \tilde{A}_4\tilde{z}(t) + \tilde{B}_2u(t). \quad (9)$$

где

$$\tilde{A}_1 = A_1 + A_2H, \tilde{A}_4 = A_4 - \mu HA_2, \quad (10)$$

$$\tilde{B}_1 = B_1 + N\tilde{B}_2, \tilde{B}_2 = B_2 - \mu HB_1.$$

Матрицы H и N имеют размерности $m \times n$ и $n \times m$ соответственно и удовлетворяют следующим матричным уравнениям Риккати и Ляпунова [8, 10, 14]:

$$\mu HA_1 + \mu HA_2H = A_3 + A_4H, \quad (11)$$

$$\mu\tilde{A}_1N - N\tilde{A}_4 - A_2 = 0. \quad (12)$$

Уравнения (11), (12) имеют решения в виде равномерно сходящихся степенных рядов [8, 10, 14]:

$$H(\mu) = \sum_{i=0}^{\infty} H_i\mu^i, N(\mu) = \sum_{k=0}^{\infty} N_k\mu^k. \quad (13)$$

Матрицы $H_i(\mu)$ и $N_k(\mu)$ ($i, k = 0, 1, \dots$) определяются путем приравнивания коэффициентов при одинаковых степенях μ в уравнениях (11), (12). В результате имеем [8, 10, 14]:

$$H_0 = -A_4^{-1}A_3, \quad H_1 = A_4^{-1}(H_0A_1 + H_0A_2H_0), \dots, \quad (14)$$

$$H_i = A_4^{-1} \left(H_{i-1}A_1 + \sum_{j=0}^{i-1} H_j A_2 H_{v-1} \right), \quad i = 1, 2, \dots, v = i, i-1, i-2, \dots,$$

$$N_0 = -A_2A_4^{-1}, \quad N_1 = (A_1N_0 + A_2H_0N_0 + N_0H_0A_2)A_4^{-1}, \dots, \quad (15)$$

$$N_k = \left[A_1N_{k-1} + A_2 \left(\sum_{j=0}^{k-1} H_j N_{s-1} \right) + \left(\sum_{j=0}^{k-1} N_j H_{s-1} \right) A_2 \right] A_4^{-1}, \quad k = 1, 2, \dots, s = i, i-1, i-2, \dots.$$

Граничные условия системы (8) и (9) определяются соотношениями

$$\tilde{x}(0) = \tilde{x}_0, \quad \tilde{z}(0) = \tilde{z}_0, \quad (16)$$

$$\tilde{x}(M) = \tilde{x}_M, \quad \tilde{z}(M) = \tilde{z}_M, \quad (17)$$

где

$$\tilde{x}_0(\mu) = x_0 + \mu N_0 \tilde{z}_0, \quad \tilde{z}_0 = z_0 - H_0 x_0, \quad (18)$$

$$\tilde{x}_M(\mu) = x_M + \mu N_M \tilde{z}_M,$$

$$\tilde{z}_M = z_M - H_M x_M, \quad \tilde{z}_M^* = \mu^M \cdot \tilde{z}_M. \quad (19)$$

В результате получили систему, состоящую из двух уравнений (8) и (9), которые решаются независимо друг от друга.

1.2. Вывод формулы задачи

Теперь рассмотрим задачу (5), (8)–(10), (16)–(19). Для системы (8), (9) предположим выполнение следующих условий:

Условие 2. Матрицы \tilde{A}_1 и \tilde{A}_4 являются матрицами простой структуры и не имеют нулевых собственных значений λ_s ($s = \overline{1, n}$), γ_k ($k = \overline{1, m}$) соответственно.

Условие 3. Для собственных значений λ_s ($s = \overline{1, n}$), γ_k ($k = \overline{1, m}$) матрицы \tilde{A}_1 и \tilde{A}_4 выполняются следующие ограничения:

$$|\lambda_s| \leq q_1 < 1, |\gamma_k| \leq q_2 < 1.$$

По второму условию матрицы \tilde{A}_1 и \tilde{A}_4 не имеют нулевых собственных значений, тогда собственные значения матрицы \tilde{A}_1^{-1} , \tilde{A}_4^{-1} соответственно равны $\lambda_1^{-1}, \lambda_2^{-1}, \dots, \lambda_s^{-1}, \gamma_1^{-1}, \gamma_2^{-1}, \dots, \gamma_k^{-1}$, а соответствующие их собственные векторы совпадают с собственными векторами

$$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_s \text{ и } \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_k.$$

Решения системы (8), (9) с начальными условиями (16), (18) представим в виде

$$\tilde{x}(kT) = \tilde{A}_1^k \tilde{x}_0 + \sum_{i=0}^{k-1} \tilde{A}_1^{k-i-1} \tilde{B}_1 u(iT), \quad (20)$$

$$\tilde{z}(kT) = \mu^{-k} \tilde{A}_4^k \tilde{z}_0 + \mu^{-k} \sum_{i=0}^{k-1} \tilde{A}_4^{k-i-1} \tilde{B}_2 u(iT). \quad (21)$$

С учетом конечных условий (17), (19) из (20) и (21) имеем

$$\sum_{i=0}^{M-1} \tilde{A}_1^{M-i-1} \tilde{B}_1 u(iT) = \alpha_{1M},$$

$$\alpha_{1M} = \tilde{x}_M(\mu) - \tilde{A}_1^M \tilde{x}_0. \quad (22)$$

$$\sum_{i=0}^{M-1} \tilde{A}_4^{M-i-1} \tilde{B}_2 u(iT) = \alpha_{2M},$$

$$\alpha_{2M} = \tilde{z}_M^* - \tilde{A}_4^M \tilde{z}_0. \quad (23)$$

На основании теории проблемы моментов [8, 15] соотношения (22) и (23) выражают необходимые и достаточные условия, которые должны удовлетворять функция $u(kT)$, $k = 0, 1, \dots, M-1$, чтобы системы (8), (9) переводились из заданного начального состояния (16) в заданное конечное состояние (17) [8, 15]. Кроме того, функция $u(kT)$ должна доставлять минимум функционалу (5). Однако движения системы (8) и (9) являются разнотемповыми. В связи с этим совместное решение уравнений (22) и (23) не является возможным [8, 15]. Так как для того, чтобы быструю подсистему (9) переводить из заданного начального состояния (16) в конечное состояние (17), необходимо найти функцию $u(kT)$, удовлетворяющую уравнению (23), а также найденная функция $u(kT)$ выражается через обратную матрицу и возникает требование ее существования при $\mu \rightarrow 0$ [8, 15].

Поэтому для подпространства переменных состояния \tilde{x} и \tilde{z} необходимо выбрать оптимальное управление, в котором каждое уравнение (22) и (23) решается независимо друг от друга относительно неизвестных параметров.

Исходя из этих требований оптимальное управление будем искать в виде

$$u(iT) = \begin{cases} \tilde{B}_1'(\tilde{A}_1)^{M-i-1} C_1, & \text{для } \tilde{x} \in [\tilde{x}_0, \tilde{x}_M] \subset R^n, \\ \tilde{B}_2'(\tilde{A}_4)^{M-i-1} C_2, & \text{для } \tilde{z} \in [\tilde{z}_0, \tilde{z}_M] \subset R^m. \end{cases} \quad (24)$$

Подставляя (24) в (22) и (23), получаем уравнения

$$W_1 \cdot C_1 = \alpha_{1M}, \quad (25)$$

$$W_2 \cdot C_2 = \alpha_{2M}, \quad (26)$$

где

$$W_1 = \sum_{i=0}^{M-1} \tilde{A}_1^{M-i-1} \tilde{B}_1 \tilde{B}_1' (\tilde{A}_1)^{M-i-1},$$

$$W_2 = \sum_{i=0}^{M-1} \tilde{A}_4^{M-i-1} \tilde{B}_2 \tilde{B}_2' (\tilde{A}_4)^{M-i-1}. \quad (27)$$

Матрицы W_1 и W_2 положительно определенные [8, 10], следовательно, оптимальные управления и соответствующие оптимальные траектории для системы (8) и (9) определяются в формах

$$u(kT, \tilde{x}_0, \tilde{x}_M) = \tilde{B}_1'(\tilde{A}_1)^{M-k-1} \cdot W_1^{-1} \alpha_{1M}, \quad (28)$$

$$u(kT, \tilde{z}_0, \tilde{z}_M^*) = \tilde{B}_2'(\tilde{A}_4)^{M-k-1} \cdot W_2^{-1} \alpha_{2M}, \quad (29)$$

$$\tilde{x}(kT) = \tilde{A}_1^k \tilde{x}_0 + \sum_{i=0}^{k-1} \tilde{A}_1^{k-i-1} \tilde{B}_1 \tilde{B}_1' (\tilde{A}_1)^{k-i-1} \cdot W_1^{-1} \alpha_{1M}, \quad (30)$$

$$\tilde{z}(kT) = \mu^{-k} \cdot \tilde{A}_4^k \tilde{z}_0 + \mu^{-k} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \tilde{A}_4^{k-i-1} \tilde{B}_2 \tilde{B}_2' (\tilde{A}_4)^{k-i-1} \cdot W_2^{-1} \alpha_{2M}. \quad (31)$$

1.3. Алгоритм решений задачи

Исходя из полученных формул алгоритм решений задачи (1)–(5) состоит в следующем:

1) вводится массив исходных данных системы (1): матрицы A_i ($i = \overline{1,4}$), B_j ($j = \overline{1,2}$), начальные и конечные условия x_0, x_M, z_0, z_M , период квантования T , количество шагов M , μ – малый шаг;

2) проверяется выполнения условий 1. Если условие 1 выполняется переход осуществляется к пункту 3, иначе к пункту 1;

3) по формулам (13)–(15) определяются матрицы H и N ;

4) проверяются подстановкой матриц H и N в уравнения (11) и (12) соответственно.

Если матрицы H и N удовлетворяют уравнения (11) и (12), то переход осуществляется к пункту 5, иначе к пункту 3;

5) по формулам (10) определяются матрицы: $\tilde{A}_1, \tilde{A}_4, \tilde{B}_2$ и \tilde{B}_1 ;

6) проверяется выполнения условий 3 для матрицы \tilde{A}_1 и \tilde{A}_4 . Если условие 3 выполняется, переход осуществляется к пункту 7, иначе к пункту 3;

7) по формулам (18), (19) определяются начальные \tilde{x}_0, \tilde{z}_0 и конечные условия $\tilde{x}_M, \tilde{z}_M^*, \tilde{z}_M$;

8) по формулам (22) и (23) определяют матрицы: α_{1M} и α_{2M} ;

9) по формулам (27) определяются матрицы: $W_1, W_2, W_1^{-1}, W_2^{-1}$;

10) по формулам (28) и (29) определяются оптимальные управления $u(kT, \tilde{x}_0, \tilde{x}_M)$ и $u(kT, \tilde{z}_0, \tilde{z}_M^*)$;

11) по формулам (30) и (31) определяются оптимальные траектории $\tilde{x}(kT)$ и $\tilde{z}(kT)$.

2. Численное моделирование

В этом разделе рассмотрим задачу (1)–(5) для конкретных значений параметров системы (1), где матрицы A и B имеют вид:

$$A = \begin{pmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix},$$

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0.52 & 0.2 & -0.1 & 0.3 & -0.01 \\ 0.4 & -0.6 & -0.3 & 0.2 & 0.2 \\ -0.15 & -0.1 & 0 & -0.25 & 0.2 \\ 0.12 & -0.1 & 0 & -0.25 & 0.2 \\ 0.2 & 0.6 & 0.4 & 0 & 0.1 \end{pmatrix},$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$A_3 = \begin{pmatrix} 0.1760 & 0 & 0 & -0.8526 & -0.2560 \\ 0 & -0.1346 & -0.1106 & 0 & 0 \\ 0 & -0.6900 & 0.1017 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1990 & -0.2930 & 0 & 0 \\ -0.3660 & 0 & 0 & -0.5286 & -0.1680 \\ 0.6020 & 0 & 0 & -0.8540 & -0.1884 \end{pmatrix},$$

$$A_4 = \begin{pmatrix} 0 & -0.0610 & -0.1880 & 0 & -0.1130 & -0.0770 \\ -0.2400 & 0 & 0 & 0.0200 & 0 & 0 \\ 0.6900 & 0 & 0 & 0.3040 & 0 & 0 \\ -0.1990 & 0 & 0 & -0.8760 & 0.2000 & 0 \\ 0 & -0.3660 & 0.2360 & -0.1167 & -0.7000 & -0.0050 \\ 0 & 6.1000 & -0.1880 & 0 & -0.1130 & -0.3880 \end{pmatrix},$$

$B_1 = (0; 0; 0; 0; 0)'$, $B_2 = (-7.280; 0; 0; 0; -0.478; -7.280)'$; малый параметр – $\mu = 0.0003$;
начальные и конечные условия – $x_0 = (1; 1; 1; 1; 1)'$, $z_0 = (1; 1; 1; 1; 1)'$.

Далее по алгоритму решений задачи (п. 1.3) производятся численные расчеты:

1. Вычисление собственных значений матрицы A_4 показывает, что условие 1 выполняется:

$$(eig(A_4)) = (0.1149 + 0.4959i; 0.1149 - 0.4959i; -0.7882 + 0.1497i; -0.7882 - 0.1497i; -0.6322; 0.0147)'$$

2. Для определения матрицы H и N находим

$$A_4^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & -3.5039 & 0.2305 & 0 & 0 & 0 \\ 1.0331 & 17.8381 & 6.9972 & 2.7485 & 0.6530 & -0.2134 \\ 1.2453 & 117.2385 & 45.9590 & 17.9623 & 4.9813 & -0.3113 \\ 0 & 7.9530 & 2.7663 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 31.3476 & 12.3456 & 5.0000 & 0 & 0 \\ -16.8460 & -346.3798 & -135.8725 & -53.3712 & -12.6795 & 0.9292 \end{pmatrix}.$$

По формулам (14) последовательно вычисляем: H_0, H_1, \dots, H_7 . В результате из (13) при $\mu = 0.0003$ имеем

$$H(\mu) = \begin{pmatrix} -0.0019 & -0.3120 & -0.4099 & 0.0009 & -0.0014 \\ 0.2674 & 7.1932 & 2.1874 & 1.1165 & 0.4071 \\ 2.3076 & 47.2079 & 14.3377 & 3.9019 & 1.5599 \\ 0.0303 & 3.1654 & 0.6420 & 0.0263 & 0.0270 \\ 0.1339 & 12.5884 & 3.8769 & 0.1212 & 0.1197 \\ -3.7560 & -139.4209 & -42.4257 & -21.6607 & -7.6303 \end{pmatrix}.$$

Проверка показала, что матрица $H(\mu)$ с точностью $O(\mu^7)$ удовлетворяет уравнению (11):

$$\mu H A_1 + \mu H A_2 H - A_3 + A_4 H = (1.0e-05) * \begin{pmatrix} -0.0003 & -0.0005 & 0 & 0 & -0.0002 \\ 0.0056 & -0.0277 & -0.0115 & -0.0050 & 0.0026 \\ 0.0425 & -0.0957 & -0.0508 & -0.0207 & 0.0245 \\ 0.0030 & -0.0003 & -0.0015 & -0.0005 & 0.0020 \\ 0.0128 & -0.0045 & -0.0076 & -0.0026 & 0.0084 \\ -0.1082 & 0.4745 & 0.2022 & 0.0875 & -0.0527 \end{pmatrix}.$$

Далее аналогично, по формулам (15) последовательно вычисляем: N_0, N_1, \dots, N_7 и в результате из (13) имеем

$$N(\mu) = \begin{pmatrix} -0.0046 & 3.3369 & -0.2961 & -0.0259 & -0.0078 & 0.0003 \\ -1.0657 & -18.1917 & -7.1304 & -2.7560 & -0.6322 & 0.2350 \\ -0.0081 & -7.9147 & -2.7499 & 0.0222 & 0.0146 & 0.0070 \\ -0.0480 & -31.5910 & -12.4337 & -4.9636 & 0.0465 & 0.0331 \\ 18.4498 & 391.6852 & 153.5438 & 59.2784 & 13.7576 & -1.5644 \end{pmatrix}$$

Подставляя $N(\mu)$ в (12), убеждаемся, что она удовлетворяет уравнению (12) с точностью $O(\mu^7)$.

$$\mu \tilde{A}_1 N - N \tilde{A}_4 - A_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0009 & 0.0003 & 0.0001 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0003 & 0.0001 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0001 & 0.0014 & 0.0006 & 0.0002 & 0 & 0 \\ -0.0007 & -0.0161 & -0.0065 & -0.0022 & -0.0005 & 0.0001 \end{pmatrix}$$

Итак, получаем разделенные переменных состояния системы (8) и (9), где

$$\tilde{A}_1 = \begin{pmatrix} 0.5181 & -0.1120 & -0.5099 & 0.3009 & -0.0114 \\ 0.6674 & 6.5932 & 1.8874 & 1.3165 & 0.6071 \\ -0.1197 & 3.2654 & 0.6420 & -0.2237 & 0.2270 \\ 0.2539 & 12.4884 & 3.8769 & 0.7212 & 1.0197 \\ -3.5560 & -138.8209 & -42.0257 & -21.6607 & -7.5303 \end{pmatrix},$$

$$\tilde{A}_4 = \begin{pmatrix} 0.0000 & -0.0609 & -0.1880 & 0.0001 & -0.1130 & -0.0770 \\ -0.2401 & -0.0022 & 0 & 0.0193 & -0.0003 & -0.0001 \\ 0.6893 & -0.0142 & 0 & 0.2997 & -0.0012 & -0.0005 \\ -0.1990 & -0.0009 & 0 & -0.8762 & 0.2000 & -0.0000 \\ -0.0000 & -0.3698 & 0.2360 & -0.1179 & -0.7000 & -0.0050 \\ 0.0011 & -6.0582 & -0.1880 & 0.0127 & -0.1065 & -0.3857 \end{pmatrix},$$

$$\tilde{B}_1 = B_1 + N\tilde{B}_2 = (0.0350; 6.3503; 0.0017; 0.0865; -129.5017)',$$

$$\tilde{B}_2 = B_2 - \mu H B_1 = (-7.2800; 0; 0; 0; -0.4780; -7.2800)'.$$

Граничные условия системы (8) и (9) имеют вид

$$\tilde{z}_0 = (1.7235; -9.3121; -62.7905; -2.5775; -14.4193; 199.6575)',$$

$$\tilde{z}_0^* = (1.0177e-35; -5.4987e-35; -3.7077e-34; -1.5220e-35; -8.5145e-35; 1.1790e-33)',$$

$$\tilde{x}_0 = (1; 1; 1; 1; 1)',$$

$$\tilde{z}_M = (0; 0; 0; 0; 0; 0)', \quad \tilde{z}_M^* = \mu^M \cdot \tilde{z}_M = (0; 0; 0; 0; 0; 0)', \quad \tilde{x}_M = (0; 0; 0; 0; 0; 0)'.$$

Согласно пункту 6 проверка условий (3) показывает, что она выполняется:

$$\text{eig } \tilde{A}_1 = (0.8773 + 6.6804i; 0.8773 - 6.6804i; 0.4430; \\ -0.6268 + 0.0762i; -0.6268 - 0.0762i)'$$

$$\text{eig } \tilde{A}_4 = (0.1153 + 0.4958i; 0.1153 - 0.4958i; -0.7880 + 0.1498i; \\ -0.7880 - 0.1498i; -0.6321; 0.0135)'$$

Согласно пункту 8 по формулам (22) и (23) определяются матрицы: α_{1M} и α_{2M} :

$$\alpha_{1M} = (1.0e+09) * (-0.0111; -0.2371; -0.0694; -0.3620; 6.1360),$$

$$\alpha_{2M} = (-0.0990; -0.0394; -0.0633; 0.4662; -0.1671; -0.5998).$$

Согласно пункту 9 по формулам (27) определяются матрицы: W_1 , W_2 , W_1^{-1} , W_2^{-1} :

$$W_1 = (1.0e+21) \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0.0002 & 0 & 0.0002 & -0.0079 \\ 0.0002 & 0.0011 & 0.0002 & 0.0015 & -0.0501 \\ 0 & 0.0002 & 0 & 0.0003 & -0.0089 \\ 0.00018 & 0.0015 & 0.0003 & 0.0020 & -0.0651 \\ -0.0079 & -0.0501 & -0.0089 & -0.0651 & 2.3613 \end{pmatrix},$$

$$W_2 = \begin{pmatrix} 52.9985 & 0.0003 & -0.0009 & 0.0002 & 3.4799 & 52.9989 \\ 0.0003 & 0.0009 & -0.0026 & 0.0007 & 0.0002 & 0.0015 \\ -0.0009 & -0.0026 & 0.0075 & -0.0020 & -0.0006 & -0.0043 \\ 0.0002 & 0.0007 & -0.0020 & 0.0005 & 0.0002 & 0.0012 \\ 3.4799 & 0.0002 & -0.0006 & 0.0002 & 0.2285 & 3.4802 \\ 52.9989 & 0.0015 & -0.0043 & 0.0012 & 3.4802 & 53.0009 \end{pmatrix},$$

$$W_1^{-1} = \begin{pmatrix} -0.0432 & -0.0167 & 0.0003 & 0.0071 & -0.0003 \\ -0.0022 & -0.0025 & -0.0012 & 0.0016 & 0 \\ 0.0123 & 0.0027 & -0.0002 & -0.0008 & 0.0001 \\ -0.0038 & -0.0001 & 0.0007 & -0.0002 & 0 \\ -0.0003 & -0.0001 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$W_2^{-1} = (1.0e+18) \times \begin{pmatrix} -0.0006 & -0.0383 & -0.0158 & -0.0099 & -0.0018 & 0.0007 \\ -0.0385 & -2.3527 & -0.9721 & -0.6103 & -0.1076 & 0.0456 \\ -0.0159 & -0.9715 & -0.4014 & -0.2519 & -0.0445 & 0.0188 \\ -0.0099 & -0.6080 & -0.2511 & -0.1572 & -0.0279 & 0.0117 \\ -0.0018 & -0.1079 & -0.0446 & -0.0281 & -0.0049 & 0.0021 \\ 0.0007 & 0.0454 & 0.0188 & 0.0117 & 0.0021 & -0.0009 \end{pmatrix}.$$

Результаты численных расчетов задачи (1)–(5) приведены на рис. 1–4.

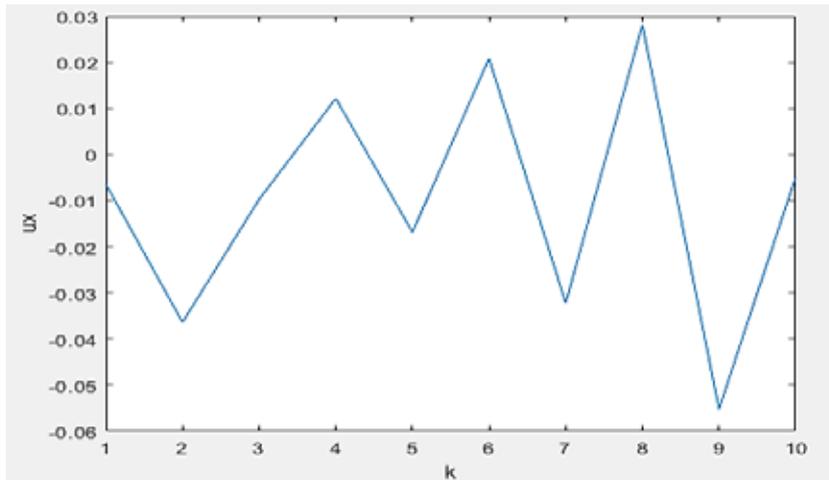


Рис. 1. Результат расчета $u(kT, \tilde{x}_0, \tilde{x}_M)$ по формуле (28)

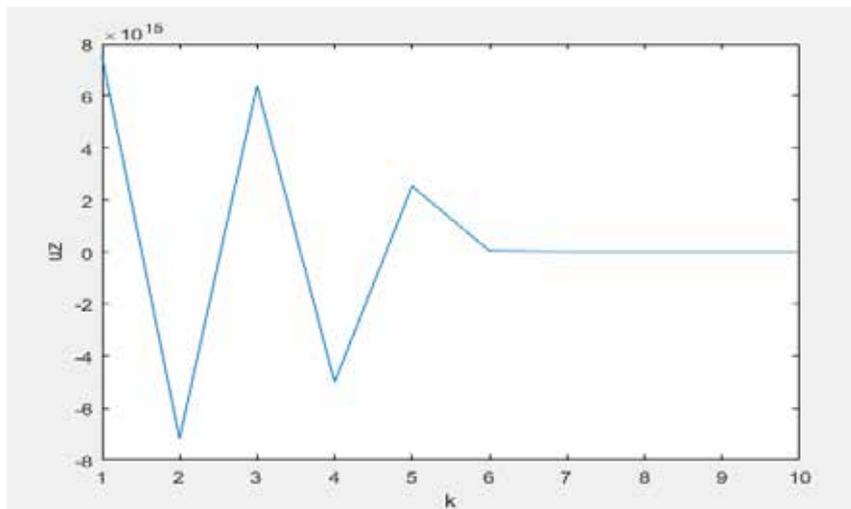


Рис. 2. Результат расчета $u(kT, \tilde{z}_0^*, \tilde{z}_M^*)$ по формуле (29)

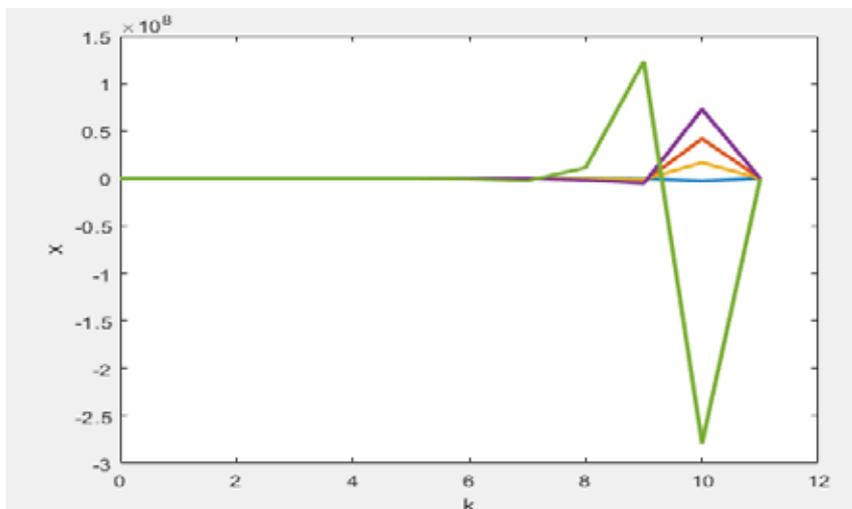


Рис. 3. Результат расчета $\tilde{x}(kT)$ по формуле (30)

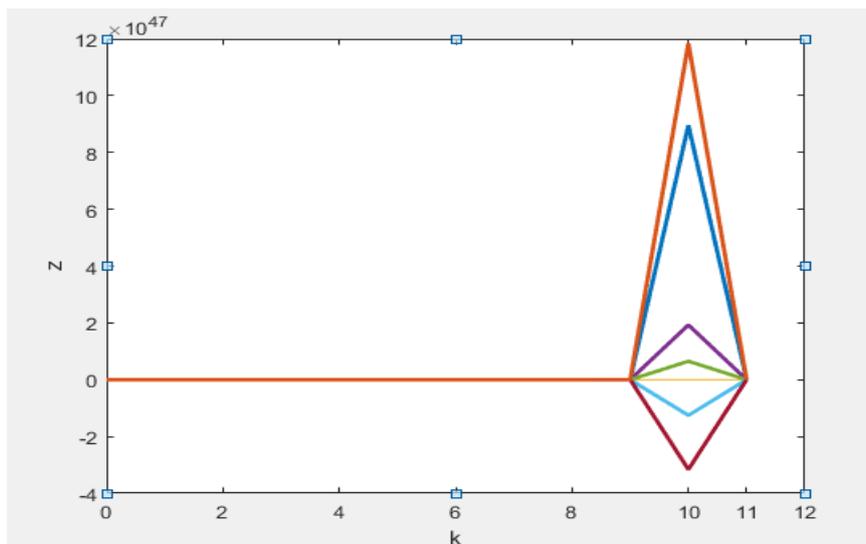


Рис. 4. Результат расчета $\tilde{z}(kT)$ по формуле (31)

Заключение

Полученный алгоритм решений линейной сингулярно-возмущенной дискретной задачи оптимального управления с малым шагом на основе разделения переменных состояния системы [13, 14] позволяет существенно понизить порядок исследуемой системы. Полученная при этом эквивалентная система обладает всеми свойствами управляемости и стабилизируемости исходной системы, причем они связаны только управляющей функцией.

Предложенный способ может эффективно применяться при исследовании теории оптимальных цифровых систем управления и при построении приближенного решения алгебраических матричных уравнений Риккати и Ляпунова.

Список литературы

1. Сазанова Л.А. Дискретная модель управления запасами как задача оптимального управления // Вестник ВГУ. Серия: Экономика и управление. 2017. № 3. С. 184–187.
2. Малтугуева Н.С. Методы решения задач оптимального управления непрерывно-дискретными системами и их связь с необходимыми условиями оптимальности // Программные системы: теория и приложения. 2012. Т. 3. Выпуск 5. С. 93–101.
3. Бортаковский А.С., Коновалова А.А. Синтез оптимальных дискретных систем автоматного типа при мгновенных многократных переключениях // Известия РАН. Теория и системы управления. 2014. № 5. С. 38–70.
4. Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Рапопорт Л.Б. Математическая теория автоматического управления: учебное пособие. М.: ЛЕНАНД, 2019. 500 с.
5. Муромцев Д.Ю., Яшин Е.Н. Анализ и синтез дискретных систем: учебное пособие. Тамбов: Издательство ФГБОУ ВПО ТГТУ, 2011. 108 с.
6. Глизер В.Я. Асимптотика решения некоторых дискретных задач оптимального управления с малым шагом // Дифференциальные уравнения. 1979. Т. 15. № 9. С. 1681–1691.
7. Глизер В.Я. Об одной разностной задаче оптимального управления с малым шагом // Дифференциальные уравнения. 1985. Т. 21. № 8. С. 1440–1442.
8. Иманалиев З.К., Аширбаев Б.Ы. Асимптотическое решение сингулярно-возмущенной задачи оптимального управления с минимальной энергией // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 3. С. 89–97.
9. Соболев В.А., Осинцев М.С. Метод интегральных многообразий в задачах оптимального управления сингулярно-возмущенными системами // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014, ИПУ РАН. 2014. С. 769–779.
10. Аширбаев Б.Ы., Апышова Г.Ж. Асимптотическое решение линейной сингулярно-возмущенной задачи оптимального быстрого действия // Наука, новые технологии и инновации. Бишкек. 2021. № 7. С. 3–9.
11. Воропаева Н.В. Декомпозиция разнотемповых динамических систем со слабой диссипацией // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. 2013. Вып. 9/2 (110). С. 5–10.
12. Воропаева Н.В. Декомпозиция задач управления разнотемповых систем с дискретным временем // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. ИПУ РАН. 2014. С. 842–848.
13. Аширбаев Б.Ы. Декомпозиция и алгоритм решения задач оптимального управления с малым шагом // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек. 2016. № 3 (39). С. 25–31.
14. Аширбаев Б.Ы. Декомпозиция дискретной задачи оптимального управления с малым шагом на интегральных многообразиях // Проблемы современной науки и образования. 2017. № 6 (88). С. 6–9.
15. Иманалиев З.К., Кадыров Ч.А., Алымбаева Ж.А. Решение дискретной задачи оптимального управления с малым периодом квантования // Вестник КГУСТА им. Н. Исанова. Бишкек. 2015. № 4 (50). С. 187–190.

УДК 511.313

ВЗАИМОСВЯЗЬ ТЕСТА ПРОСТОТЫ ФЕРМА И ТЕОРЕМЫ ВИЛЬСОНА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРОСТЫХ ЧИСЕЛ

Приходько А.А.

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина»,
Краснодар, e-mail: kampanus@yandex.ru

Оптимизация алгоритмов для поиска и проверки простых чисел является актуальной задачей, решение которой необходимо для стойкости криптографических систем. В статье рассмотрены основные алгоритмы и тесты определения простых чисел. Истинные тесты простоты чисел имеют высокую степень сложности расчета, а вероятностные тесты не могут определить точно простые числа. В данной статье рассмотрен метод определения простых чисел, основанный на теореме Вильсона. Предложены решения по снижению нагрузки на вычислительную технику, выведена формула определения простого числа. В статье определена взаимосвязь малой теоремы Ферма и теоремы Вильсона. Соотношение истинного теста простоты, основанного на теореме Вильсона, и вероятностного теста Ферма обосновывает появление псевдопростых чисел Ферма и определяет необходимые условия их проверки. При определении параметров простоты числа используется китайская теорема об остатках и теорема В. Серпинского о критерии простого числа. Приведены оптимизационные решения при проверке простого числа по теореме Вильсона. Предложена оптимизация теста простоты Ферма с уменьшением выполнения необходимых операций в два раза, также представлено обоснование такой оптимизации.

Ключевые слова: теорема Вильсона, малая теорема Ферма, простые числа, алгоритм расчета простого числа, метод Эратосфена, китайская теорема об остатках

THE RELATIONSHIP OF FERMAT'S SIMPLICITY TEST AND WILSON'S THEOREM IN DETERMINING PRIME NUMBERS

Prikhodko A.A.

Kuban State Agrarian University, e-mail: kampanus@yandex.ru

Optimization of algorithms for searching and verifying prime numbers is an urgent task, the solution of which is necessary for the stability of cryptographic systems. The article discusses the basic algorithms and tests for determining prime numbers. True number simplicity tests have a high degree of calculation complexity, and probabilistic tests cannot determine exactly prime numbers. This article discusses a method for determining prime numbers based on Wilson's theorem. Solutions to reduce the load on computing equipment are proposed, a formula for determining a prime number is derived. The article defines the relationship between Fermat's small theorem and Wilson's theorem. The ratio of the true simplicity test based on Wilson's theorem and the probabilistic Fermat test justifies the appearance of pseudo-simple Fermat numbers and determines the necessary conditions for their verification. When determining the parameters of the simplicity of a number, the Chinese remainder theorem and V. Serpinsky's theorem on the criterion of a prime number are used. Optimization solutions are given when checking a prime number by Wilson's theorem. The optimization of the Fermat simplicity test with a halving of the necessary operations is proposed, and the rationale for such optimization is also presented.

Keywords: Wilson's theorem, Fermat's small theorem, prime numbers, prime number calculation algorithm, Eratosthenes method, Chinese remainder theorem

Рост вычислительных мощностей для обеспечения требуемого уровня стойкости криптографических систем вызвал необходимость использовать простые числа все большей разрядности. Это привело к необходимости адаптировать трудоемкость вычислительных операций криптографических алгоритмов при нахождении простых чисел [1].

Алгоритмы проверки простых чисел могут быть разделены на две группы: истинные (детерминированные) и вероятностные тесты. Истинные алгоритмы позволяют точно определить простоту числа. Вероятностные тесты позволяют выяснить простое число или нет с определенной вероятностью ошибки [2].

На сегодняшний день существует всего два основных детерминированных ал-

горитма проверки простого числа, это теорема Вильсона и метод Эратосфена. Метод Эратосфена предполагает простой подбор делителей, что является достаточно сложным из-за большого количества необходимых операций [3]. Проверка простого числа по теореме Вильсона также имеет высокую сложность расчета.

При определении простых чисел высоких порядков в основном используют тест Ферма, который является вероятностным. Благодаря быстрым алгоритмам, основанным на китайской теореме об остатках [4], проверку числа можно осуществить достаточно быстро, но данный тест не позволяет проверить псевдопростые числа Ферма, которые обладают некоторыми свойствами простых чисел, но не являются ими.

Целью данной работы было найти взаимосвязь теста Ферма и теоремы Вильсона, так как нет понимания, почему тест Ферма не распознает псевдопростые числа. На сегодняшний день считается, что эти две теоремы не связаны между собой и имеют совершенно разные принципы расчета. В данной статье представлены результаты исследований, которые наглядно показывают, каким образом тест Ферма соотносится с теоремой Вильсона, что имеет большое значение для дальнейшей адаптации алгоритма поиска и проверки простых чисел.

Теорема Вильсона формулируется следующим образом: Если p простое число, то имеет место сравнение $(p - 1)! + 1 \equiv 0 \pmod{p}$ (1). Так же справедлива обратная теорема: Если для целого положительного p имеет место соотношение (1), то p число простое, т.е. если сумма $(p - 1)! + 1$ делится на p без остатка, то число p является простым числом. Проблема заключается в том, что даже при небольших числах n , число $(n - 1)! + 1$ очень большое число. Например, если по данному алгоритму проверить, является ли число 997 простым, то надо проверить делимость числа $996! + 1$ на 997. Данное число содержит 2556 десятичных знаков, что существенно усложняет проверку [5]. Поэтому алгоритм проверки простого

числа по теореме Вильсона имеет в основном теоретическое значение и не применяется на практике.

Оптимизация алгоритма по теореме Вильсона заключается в использовании китайской теоремы об остатках. При расчете факториала предположительно простого числа p на каждом этапе находится остаток от деления на p и последующее умножение производится уже этого остатка. Пример расчета числа 97 по данному алгоритму представлен в табл. 1.

Первые четыре числа не отличаются от стандартного расчета факториала. Пятое число больше числа p и равно 120, поэтому берется остаток от деления на 97, что составляет 23. Шестое число находится произведением 23 на 6 и аналогично находится остаток от деления данного числа на 97. Число с порядковым номером 96 действительно равно 96 (или $p-1$), что является доказательством простого числа p по теореме Вильсона. Таким образом, чтобы определить остаток от деления факториала 97, вычисление самого факториала не требуется. Более того, если последовательно перемножить числа получившегося ряда и аналогично выделять остаток от деления после каждой операции, то в результате найдем остаток от деления суперфакториала проверяемого числа.

Таблица 1

Пример расчета по алгоритму числа 97

№ п/п	n (mod p)								
1	1	21	47	41	76	61	4	81	11
2	2	22	64	42	88	62	54	82	29
3	6	23	17	43	1	63	7	83	79
4	24	24	20	44	44	64	60	84	40
5	23	25	15	45	40	65	20	85	5
6	41	26	2	46	94	66	59	86	42
7	93	27	54	47	53	67	73	87	65
8	65	28	57	48	22	68	17	88	94
9	3	29	4	49	11	69	9	89	24
10	30	30	23	50	65	70	48	90	26
11	39	31	34	51	17	71	13	91	38
12	80	32	21	52	11	72	63	92	4
13	70	33	14	53	1	73	40	93	81
14	10	34	88	54	54	74	50	94	48
15	53	35	73	55	60	75	64	95	1
16	72	36	9	56	62	76	14	96	96
17	60	37	42	57	42	77	11	97	0
18	13	38	44	58	11	78	82	98	0
19	53	39	67	59	67	79	76	99	0
20	90	40	61	60	43	80	66	100	0

Таблица 2

Пример расчета по алгоритму числа 57

№ п/п	n (mod p)						
1	1	16	9	31	0	46	0
2	2	17	39	32	0	47	0
3	6	18	18	33	0	48	0
4	24	19	0	34	0	49	0
5	6	20	0	35	0	50	0
6	36	21	0	36	0	51	0
7	24	22	0	37	0	52	0
8	21	23	0	38	0	53	0
9	18	24	0	39	0	54	0
10	9	25	0	40	0	55	0
11	42	26	0	41	0	56	0
12	48	27	0	42	0	57	0
13	54	28	0	43	0		
14	15	29	0	44	0		
15	54	30	0	45	0		

Рассмотрим проверку составного числа по данному алгоритму. Выполним расчет по числу 57. Результаты приведены в табл. 2.

Число не прошло проверку, так как после восемнадцатого числа остаток от деления составил ноль. Соответственно, последующее число алгоритм рассчитывает как $0 \times 20 = 0$. Все последующие числа будут также равны нулю, поэтому условие $(p - 1)! + 1 \equiv 0 \pmod{p}$ не выполняется.

Метод Эратосфена и теорема Вильсона основаны на разных принципах проверки. В первом случае происходит деление проверяемого числа на возможные множители. Теорема Вильсона основана на том принципе, что если у числа есть делители, то их произведение, умноженное на любое число, будет делить без остатка исходное число. Например, если число 35 делится на 7 и 5, то произведение $7 \times 5 \times n$, при любом целочисленном значении n , будет делиться без остатка на число 35. Минимальный возможный делитель для нечетного числа это 3, поэтому проверку по данному алгоритму необходимо и достаточно выполнить до числа равного $p/3$. По количеству необходимых операций предложенный вариант уступает методу Эратосфена, где достаточно проверить \sqrt{p} чисел [6], однако деление несопоставимых по разряду чисел требует больше времени, чем близких по количеству десятичных знаков.

На данном этапе алгоритм возможно оптимизировать, понимая особенности десятичной системы счисления. Если провер-

ку проходит число, которое оканчивается на три, то оно может быть получено только умножением чисел вида $x1 \times x3$ или $x7 \times x9$. Таким образом при возведении факториала количество чисел возможно сократить.

Особенность данного метода в том, что в процессе возведения факториала есть возможность привести число p к виду $p / 2^n$ и результат расчета останется верным. При делении на другие числа алгоритм не работает корректно, что уже говорит о тесной взаимосвязи теоремы Вильсона и чисел вида 2^n . В качестве примера приведен расчет числа 97, которое в процессе проверки в произвольном порядке делится на различные 2^n . Результаты возведения факториала представлены в табл. 3.

Данный алгоритм основан на китайской теореме об остатках и широко применяется в программировании. Если необходимо узнать остаток от деления от произведения нескольких чисел, то на любом этапе умножения допустимо складывать и отнимать исходное число любое количество раз, и это не влияет на результат. На основании данного правила число n допустимо привести к виду $n - p$, если необходимо узнать остаток от деления числа p .

Рассмотрим проверку простого числа 5 по теореме Вильсона. Для этого необходимо рассчитать $4!$. Расчет представляет собой вид: $1 \times 2 \times 3 \times 4$. Используя китайскую теорему об остатках, выражение допустимо привести к виду: $1 \times 2 \times (3-5) \times (4-5) = 1 \times 2 \times (-2) \times (-1) = -(1^2) \times -(2^2) = 4$.

Таблица 3

Пример проверки числа 97 с различными делителями вида 2^n

№ п/п	n (mod p)	p / 2 ⁿ	№ п/п	n (mod p)	p / 2 ⁿ	№ п/п	n (mod p)	p / 2 ⁿ
1	1	3,03125	34	15,25	24,25	67	24,5	48,5
2	2	3,03125	35	0,25	24,25	68	17	48,5
3	2,96875	3,03125	36	9	24,25	69	9	48,5
4	2,78125	3,03125	37	42	48,5	70	48	48,5
5	1,78125	3,03125	38	44	48,5	71	13	48,5
6	1,59375	3,03125	39	18,5	48,5	72	14,5	48,5
7	2,0625	3,03125	40	12,5	48,5	73	40	48,5
8	1,34375	3,03125	41	27,5	48,5	74	1,5	48,5
9	3	3,03125	42	39,5	48,5	75	15,5	48,5
10	5,75	12,125	43	1	48,5	76	14	48,5
11	2,625	12,125	44	44	48,5	77	11	97
12	7,25	12,125	45	40	48,5	78	82	97
13	9,375	12,125	46	45,5	48,5	79	76	97
14	10	12,125	47	4,5	48,5	80	66	97
15	4,5	12,125	48	22	48,5	81	11	97
16	11,375	12,125	49	11	48,5	82	29	97
17	11,5	12,125	50	16,5	48,5	83	79	97
18	0,875	12,125	51	17	48,5	84	40	97
19	16,625	24,25	52	11	48,5	85	5	97
20	17,25	24,25	53	1	48,5	86	42	97
21	22,75	24,25	54	5,5	48,5	87	65	97
22	15,5	24,25	55	11,5	48,5	88	94	97
23	17	24,25	56	13,5	48,5	89	24	97
24	20	24,25	57	42	48,5	90	26	97
25	15	24,25	58	11	48,5	91	38	97
26	2	24,25	59	18,5	48,5	92	4	97
27	5,5	24,25	60	43	48,5	93	81	97
28	8,5	24,25	61	4	48,5	94	48	97
29	4	24,25	62	5,5	48,5	95	1	97
30	23	24,25	63	7	48,5	96	96	97
31	9,75	24,25	64	11,5	48,5	97	0	0
32	21	24,25	65	20	48,5	98	0	0
33	14	24,25	66	10,5	48,5	99	0	0

При четном количестве множителей результат положительный, при нечетном – отрицательный. Если результат получается отрицательным, то необходимо брать остаток от деления отрицательного числа, то есть принцип расчета не меняется. Теорема В. Серпинского о критерии простого числа хорошо описывает данное правило [7].

Как было рассмотрено выше, доказательством того, что число простое, является наличие положительного остатка от числа $\left(\frac{p-1}{2}\right)!$ Используем китайскую теорему об остатках для записи следующего равенства, на примере числа 5: $1 \times 2 \equiv (-4) \times (-3) \equiv 2 \pmod{5}$. Запишем выражение в общем виде:

$$1 \times 2 \times \dots \left(\frac{p-1}{2}\right) \equiv (1-p) \times (2-p) \times \dots \left(\frac{p-1}{2}\right) - p \equiv n \pmod{p}.$$

Если число p простое, выполняется следующее условие:

$$\frac{(1-p) \times (2-p) \times \dots \times \left(\frac{p-1}{2}\right) - p}{1 \times 2 \times \dots \times \left(\frac{p-1}{2}\right)} \equiv 1 \pmod{p}.$$

Преобразуем выражение в следующий вид:

$$\left(1 - \frac{p}{1}\right) \times \left(1 - \frac{p}{2}\right) \times \dots \times \left(1 - \frac{p}{\left(\frac{p-1}{2}\right)}\right) \equiv 1 \pmod{p}.$$

Проверим выражение на примере числа 11:

$$\left(1 - \frac{11}{1}\right) \times \left(1 - \frac{11}{2}\right) \times \left(1 - \frac{11}{3}\right) \times \left(1 - \frac{11}{4}\right) \times \left(1 - \frac{11}{5}\right) = -252 \equiv 1 \pmod{11}.$$

Число 11 удовлетворяет условию, значит, данное простое. Эта формула хорошо известна, но имеет свои недостатки [8]. При расчете больших чисел появляется ошибка, вызванная приближенными значениями множителей.

Рассмотрим детально, как выполняется расчет:

$$\frac{-6 \times -7 \times -9 \times -10}{1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5} = -252.$$

Как видно, все числа из знаменателя сокращаются с числителем, умножение производится уже оставшихся значений: $-3 \times -7 \times -2 \times -3 \times -2 = -252$. Дробных чисел при таком расчете получить не может, так как знаменатель всегда будет сокращаться с числителем.

Чтобы понять закономерность, по которой формируется итоговое число, рассмотрим более высокое простое число, например 23:

$$\frac{-22 \times -21 \times -20 \times -19 \times -18 \times -17 \times -16 \times -15 \times -14 \times -13 \times -12}{1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5 \times 6 \times 7 \times 8 \times 9 \times 10 \times 11} \equiv 1 \pmod{23}.$$

Разобьем выражение на два. Рассмотрим отдельно четные и нечетные числа по знаменателю.

$$\frac{-22 \times -20 \times -18 \times -16 \times -14 \times -12}{1 \times 3 \times 5 \times 7 \times 9 \times 11} \times \frac{-21 \times -19 \times -17 \times -15 \times -13}{2 \times 4 \times 6 \times 8 \times 10} \equiv 1 \pmod{23}.$$

Далее посчитаем результат по первой части:

$$\frac{-22 \times -20 \times -18 \times -16 \times -14 \times -12}{1 \times 3 \times 5 \times 7 \times 9 \times 11} = 2048 = 2^{11} \equiv 1 \pmod{11}.$$

Результатом деления получилось число вида 2^n . Данный результат не является случайным и имеет закономерность, при $p > 8$:

$$\frac{(1-p) \times (3-p) \times (5-p) \times \dots \times \left(\left(\frac{p-1}{2}\right) - p\right)}{1 \times 3 \times 5 \times \dots \times \left(\frac{p-1}{2}\right)} = 2^{\left(\frac{p-1}{2}\right)}.$$

В расчете может получиться как положительное, так и отрицательное число. Принцип не меняется: если число отрицательное, то остаток от деления вычисляется от отрицательного числа. Наглядно видна связь данного выражения с малой теоремой Ферма: Если p – простое число, то оно удовлетворяет сравнению $a^{p-1} \equiv (\text{mod } p)$. Как правило, проверка простых чисел ведется именно по основанию 2, так как это наименьшее число. Выведенная формула позволяет оптимизировать выражение до вида

$$2^{\binom{p-1}{2}} + 1 \equiv 0 (\text{mod } p), \text{ если число } p \text{ – простое число вида } 8k + 3 \text{ или } 8k + 5.$$

$$2^{\binom{p-1}{2}} - 1 \equiv 0 (\text{mod } p), \text{ если число } p \text{ – простое число вида } 8k + 1 \text{ или } 8k + 7.$$

Разделение проверяемых чисел на две группы обусловлено количеством умножений отрицательных чисел, что наглядно видно из расчета, приведенного выше.

Данное условие является необходимым, но не достаточным признаком простого числа. Для полного доказательства простого числа необходимо решить вторую часть уравнения и доказать, что

$$\frac{(2-p) \times (4-p) \times (6-p) \dots \left(\binom{p-1}{2} - p \right)}{2 \times 4 \times 6 \times \dots \left(\frac{p-1}{2} \right)} \times 2^{\binom{p-1}{2}} \equiv 1 (\text{mod } p).$$

Доказательство данной части формулы требует расчета факториала, что затрудняет вычислительный процесс. Адаптация этой части уравнения остается открытым вопросом.

Предложенная формула значительно облегчает доказательство простых чисел, так как сокращает количество необходимых операций при прохождении теста простоты Ферма в два раза. Выведенное выражение раскрывает взаимосвязь малой теоремы Ферма и теоремы Вильсона, что открывает новые возможности изучения простых и псевдопростых чисел Ферма.

Список литературы

1. Коломийцева С.В., Соколова К.Н. Сравнительный анализ алгоритмов проверки чисел на простоту // Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления: материалы V Международной научно-практической конференции. 2019. С. 90–96.

2. Дмитриев Е.А. Тест Вильсона // Приоритетные направления развития образования и науки: сборник матери-

алов II Международной научно-практической конференции. В 2-х т. 2017. С. 54.

3. Певный А.Б., Юркина М.Н. Сложность решета Эратосфена и распределение простых чисел // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 1: Математика. Механика. Информатика. 2020. № 4 (37). С. 66–72.

4. Чопик А.А. Применение китайской теоремы об остатках // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 8–3 (19–3). С. 446–448.

5. Мамараимов М.Т., Уштенев Е.Р. Проблемы простых чисел и теорема о критерии простого числа. Theory and practice in the physical, mathematical and technical sciences. 2012. С. 16.

6. Сикорская Г.А., Галушкин Д.А., Данильчук М.В. О методах проверки числа на простоту // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием). 2020. С. 1560.

7. Акылбаев М.И., Уштенев Е.Р. Новая теорема о критерии простого числа // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 1–2. С. 255–257.

8. Дмитриев А.П., Рагило П.Ю., Вайтюль И.В. О распределении простых чисел // Тезисы докладов 51-й международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. 2018. С. 124.

СТАТЬЯ

УДК 54.051:544.55

**ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО ПОДВОДНОГО
РАЗРЯДА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ФОТОВОЛЬТАИКЕ**

Сироткин Н.А.

ФГБУН Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, e-mail: alexsad8@yandex.ru

В данной работе получены композиционные полимерные наноматериалы путем инициирования подводного импульсного разряда постоянного тока между металлическими (титановыми или молибденовыми) стержнями в водном растворе поливинилового спирта. Описанный метод позволяет в одну стадию и без использования химических прекурсоров получать полимерный композит с импрегнированными в него наночастицами оксидов металлов. Нанокompозиты были охарактеризованы методами атомно-силовой микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии, инфракрасной спектроскопии, рентгенофазового анализа. Наблюдения с помощью просвечивающей электронной микроскопии показали, что наночастицы оксидов металлов равномерно диспергированы в матрице поливинилового спирта. Рентгенофазовый анализ доказывает присутствие в композите частиц диоксида титана и оксида молибдена (VI). Результаты инфракрасной спектроскопии указывают на ван-дер-ваальсовое взаимодействие между полимером и наночастицами оксида металла. Установлено, что небольшая добавка (до 1,8 мас. %) наночастиц оксидов металлов в поливиниловый спирт значительно улучшает его электропроводность. Значения ширины запрещенной зоны как для непрямых, так и для прямых переходов значительно уменьшаются из-за наличия в нанокompозите областей с объемными гетеропереходами. Полученные нанокompозиты являются перспективными материалами для изготовления солнечных элементов.

Ключевые слова: плазма, электрический разряд, полимер, наночастицы, оксиды металлов, солнечные элементы, фотовольтаика

**CREATION OF POLYVINYL ALCOHOL-BASED POLYMERIC
COMPOSITE NANOMATERIALS USING PULSED UNDERWATER
DISCHARGE PLASMA AND THEIR APPLICATION IN PHOTOVOLTAIC**

Sirotkin N.A.

G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry of the RAS, Ivanovo, e-mail: alexsad8@yandex.ru

In this work, composite polymeric nanomaterials were obtained by initiating an underwater DC pulsed discharge between metal (titanium or molybdenum) rods in an aqueous solution of polyvinyl alcohol (PVA). The described method makes it possible to obtain, in one stage and without the use of chemical precursors, a polymer composite with metal oxide nanoparticles impregnated into it. The nanocomposites were characterized by atomic force microscopy, transmission electron microscopy, infrared spectroscopy, and X-ray diffraction analysis. Transmission electron microscopy observations showed that metal oxide nanoparticles are uniformly dispersed in the PVA matrix. X-ray phase analysis proves the presence of particles of titanium dioxide and molybdenum (VI) oxide in the composite. The results of infrared spectroscopy indicate the van der Waals interaction between the polymer and metal oxide nanoparticles. It has been established that a small addition (up to 1.8 wt%) of metal oxide nanoparticles to PVA significantly improves its electrical conductivity. The band gap values for both indirect and direct transitions are significantly reduced due to the presence of regions with bulk heterojunctions in the nanocomposite. The resulting nanocomposites are promising materials for the manufacture of solar cells.

Keywords: plasma, electric discharge, polymer, nanoparticles, metal oxides, solar cells, photovoltaics

Создание надежных источников энергии – одна из важнейших задач, стоящих перед миром в XXI в. Поиск эффективных подходов к преобразованию одних видов энергии в другие во многом связан с использованием полупроводниковых материалов, в том числе композиционных полимерных материалов. Особое внимание уделяется материалам на основе наноструктурированных оксидов титана, молибдена, вольфрама, цинка для использования в различных секторах энергетики в связи с блестящими перспективами их применения в солнечных элементах и технологиях гибкой электроники. Свойства этих наноструктурированных

материалов, определяющие их эффективность преобразования солнечной энергии, возможность использования их в качестве электронных элементов, связаны с особенностями электронной структуры, морфологии, размерными эффектами, структурной и диэлектрической неоднородностью, фазовым составом.

Сенсибилизированные красителем солнечные элементы (СКЭС) всегда были в центре внимания исследователей благодаря своей дешевизне, простоте изготовления и высокой производительности [1]. В данном случае солнечная ячейка представляет собой многослойную структуру, и в каче-

стве фотоанода чаще всего используется мезопористый диоксид титана, а в качестве противоиэлектрода – платина или углерод. СКЭС содержит электролит, который действует как восстановитель для молекул окислительного красителя. Наиболее часто в качестве окислительно-восстановительного агента используются иодид-ионы (I_3^-) из-за их медленной рекомбинации с инжектированными электронами [2]. Однако при использовании СКЭС с жидкими электролитами возникают такие проблемы, как утечка и испарение электролита, что, в свою очередь, влияет на надежность самой ячейки. Эти проблемы могут быть решены путем использования полимеров с квазитвердым электролитом. В последние годы исследуется возможность использования различных полимерных матриц на основе полиакрилонитрила, полиакриламида, поливинилпиридина и поливинилового спирта (ПВС) [3, 4]. ПВС представляет собой гидрофильный синтетический полимер и имеет в своей структуре карбонильные и гидроксильные группы, поэтому может взаимодействовать с ионами солей, оксидами металлов и молекулами сенсбилизирующих красителей [5]. В чистом виде ПВС и пленки на основе ПВС обладают крайне низкой электрической проводимостью, но введение в ПВС оксидов металлов позволяет повысить проводимость до $1,17 \text{ См/см}$ [6]. Такие полимерные композиты с высокой электропроводностью могут использоваться в качестве проводящих слоев для солнечных элементов. В литературе показано, что электронно-транспортные слои в СКЭС могут быть выполнены не только из частиц оксида титана, но и из оксидов молибдена и смешанных оксидов состава TiO_x/MoO_x . КПД таких ячеек может достигать 12% [7].

Как было показано ранее, низкотемпературная подводная плазма является эффективным методом синтеза наночастиц оксидов переходных металлов [8] и легирования поливинилового спирта оксидами металлов [9]. Целью данной работы является создание в одну стадию полимерных композитов на основе ПВС и оксидов Ti и Mo, пригодных для изготовления сенсбилизованных красителем солнечных элементов.

Материалы и методы исследования

Для приготовления композита использовали гранулы ПВС ($M_w = 2 \times 10^5$, марка 16/1) (ООО «Химреактив», Россия), молибденовую и титановую проволоку диаметром 1 мм. Гранулы ПВС массой 1,5 г растворяли в 50 мл дистиллированной воды при перемешивании. Металлические проволоки были вставлены в керамическую

трубку и погружены в раствор полимера и использовались как электроды: анод и катод. В первом случае оба электрода были выполнены из титана, во втором случае из молибдена. Расстояние между электродами составляло 1,5 мм. Длина выступающих из трубки кончиков электродов составляла 2 мм. На электроды подавалось напряжение от источника постоянного тока, снабженного схемой стабилизации. Детали эксперимента приведены в [10]. В конечном итоге нанокompозитные пленки были получены методом литья из раствора и высушены при $50 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 6 ч. Для количественного определения массовой доли наноструктур электроды взвешивали до и после горения разряда на электронных весах (AND-150HR, Япония) с погрешностью 5%. Пленки были охарактеризованы методами РФА, ИК-спектроскопии, ПЭМ, АСМ, УФ-видимой спектроскопии. Рентгенограммы полимерных композитов регистрировали на рентгеновском дифрактометре (D2 PHASER, Bruker, источник Cu-K α) в диапазоне 2θ : 5° – 60° с шагом $0,02^\circ$. ИК-спектры полученных пленок получали на спектрометре (VERTEX 80v, Bruker Optics) в диапазоне 4000 – 400 см^{-1} . Морфологию полимерных композитов исследовали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) (Solver P47-PRO). АСМ-анализ проводился в контактно-режиме с разрешением 3 мкм и площадью сканирования $30 \times 30 \text{ мкм}^2$. Для ПЭМ-анализа использовали просвечивающую электронную микроскопию высокого разрешения TitanTM (Titan cubed) 300 (Thermo Fisher Scientific). Электрические характеристики исследовались мультиметром (Rigol DM3058E, Rigol Technologies). Полимерные композиты помещались между двумя медными пластинчатыми электродами. Все измерения проводились при комнатной температуре. Спектры УФ-видимого поглощения жидких суспензий регистрировали на спектрофотометре (СФ-56, ОКБ Спектр, Россия) в диапазоне 190–600 нм. Вольт-амперные характеристики СКЭС измеряли на воздухе под галогенной лампой мощностью 50 Вт (OSRAM). Вольт-амперные характеристики регистрировали с помощью потенциостата (Р-20Х, Россия). Для исследования фотоэлектрических свойств полученных полимерных композитов были изготовлены сенсбилизованные красителем солнечные элементы. Две капли суспензии из водного раствора ПВС с наночастицами оксидов металлов помещали на подложку из легированного фтором оксида олова (FTO) площадью 5 см^2 . После сушки при $50 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 6 ч был изготовлен фотокатод, покрытый полимерным композиционным материалом, со-

державшим наночастицы оксидов металлов. Электрод погружали на 1 час в раствор красителя с концентрацией 1,2 мг/л родамина Б. Фотоанод представлял покрытую углеродом стеклянную подложку FTO. После сушки потоком воздуха электроды были склеены термоклеевой прокладкой толщиной 25 мкм и герметизированы путем нагревания. Внутреннее пространство заполнялось жидким электролитом. В качестве электролита использовали 5% раствор йода в этаноле.

Результаты исследования и их обсуждение

В подводном разряде высокая плотность тока (из-за небольшого размера наконечников электродов, вытянутых из керамической трубки) приводит к перегреву раствора и образованию пузырьков пара, что приводит к разрыву электрической цепи. Также к появлению пузырьков газа приводит электролиз воды. Развитие разряда происходит в пузырьках, которые затем схлопываются. Плазма разряда вызывает повышение температуры кончика электрода. В результате металлические электроды испаряются и термически окисляются в водяном паре или при взаимодействии с атомарным кислородом, с образованием оксидных наночастиц, затем наночастицы диспергируются в водном растворе полимера.

Измерение изменения массы электродов при воздействии плазмы позволяет рассчитать скорость распыления электродов. Скорость распыления катода не зависит от материала электрода. В среднем скорость распыления анода в 10 раз больше, чем у катода. Полученные данные о скоростях распыления электродов позволили оценить концентрацию наночастиц оксидов металлов в полимерной матрице (таблица).

Рентгенограммы синтезированных композитов представлены на рис. 1, а. Широкие пики с центрами около $19,8^\circ$ и 43° соответствуют кристаллической фазе ПВС. Размер кристаллитов, рассчитанный по формуле Дебая – Шеррера, составил от 2,5 нм до 4 нм. На дифрактограмме видны рефлексы, связанные с $\alpha\text{-MoO}_3$. В опытах с плазменным

воздействием на раствор ПВС разряда с титановыми электродами зарегистрированы пики, связанные с диоксидом титана в фазе анатаз и рутил. Смещение пика в районе 19° относительно исходного ПВС связано с сильным взаимодействием полимера с образующимися оксидными структурами титана и молибдена: более плотная структура композита образуется за счет взаимодействия металла с карбонильными и гидроксильными группами полимера. Пики при $2\theta = 52,5^\circ$ и $2\theta = 57,5^\circ$ появляются на рентгенограмме композита оксид металла – полимер. Эти пики не соответствуют ни кристаллической фазе ПВС, ни кристаллической структуре TiO_2 или MoO_3 . Возможно, это связано со структурными изменениями, возникающими из-за сильного взаимодействия активных центров оксидов молибдена и титана с ПВС. Инфракрасные спектры ПВС и композита ПВС-наночастицы оксидов металлов представлены на рис. 1, б. Широкая полоса $3700\text{--}3000\text{ см}^{-1}$ соответствует симметричному валентному колебанию гидроксильной группы. Два неразрешенных пика при 2940 см^{-1} и 2910 см^{-1} относятся к асимметричным и симметричным валентным колебаниям группы -CH_2 соответственно. В инфракрасном спектре нанокompозита наблюдаются закономерные сдвиги характеристических полос и пиков. Сдвиги пиков деформационных колебаний группы -CH_2 (1423 см^{-1}) и валентных колебаний группы -CH (839 см^{-1}) доказывают возможность химических взаимодействий оксидов металлов с матрицей ПВС. Предполагается, что оксиды металлов взаимодействуют с полимерами через гидроксильные и карбоксильные группы [11]. Появляются пики при 580 и 470 см^{-1} , приписываемые деформационным и валентным колебаниям группы Me-O .

ПЭМ анализ показывает, что частицы оксидов металлов имеют круглую форму. Средние размеры оксидных наночастиц составляют от 20 до 30 нм. Однако встречаются также агломераты размером 120–200 нм. Морфологию поверхности композитных пленок исследовали с помощью атомно-силовой микроскопии (рис. 2).

Характеристики полимерных нанокompозитов

Образец	$w_{\text{(наночастицы)}}$, мас. %	Ширина запрещенной зоны, эВ		Проводимость, См/см	Фототок, мА/см ²
		Прямой переход	Непрямой переход		
ПВС	–	4,88	5,31	$2,10 \times 10^{-6}$	–
ПВС+TiO ₂	1,03	2,83	3,79	$8,68 \times 10^{-5}$	0,496
ПВС+MoO ₃	1,79	3,31	4,08	$9,89 \times 10^{-5}$	0,515

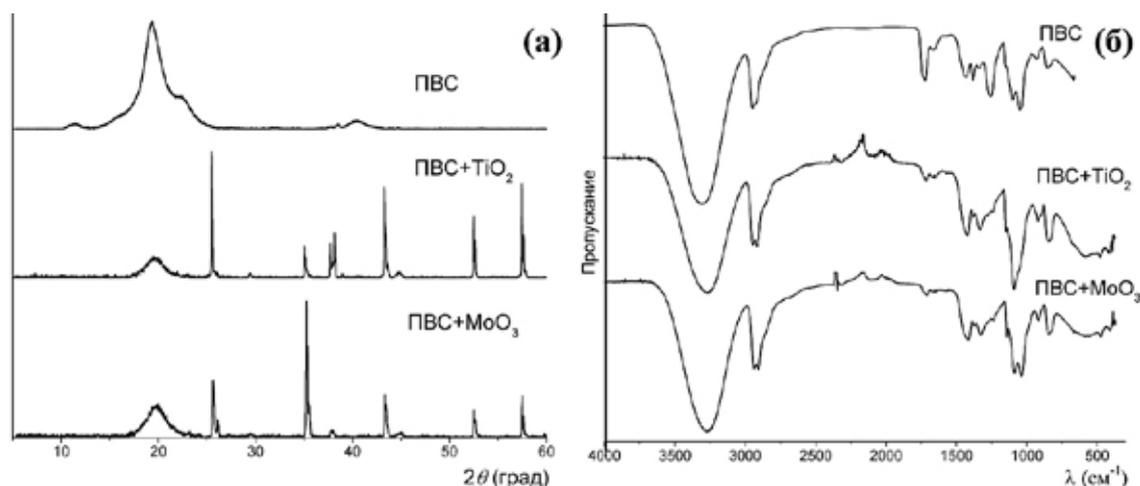


Рис. 1. Рентгенограммы (а) и ИК-спектры (б) исходного ПВХ и полученных полимерных нанокомпозитов

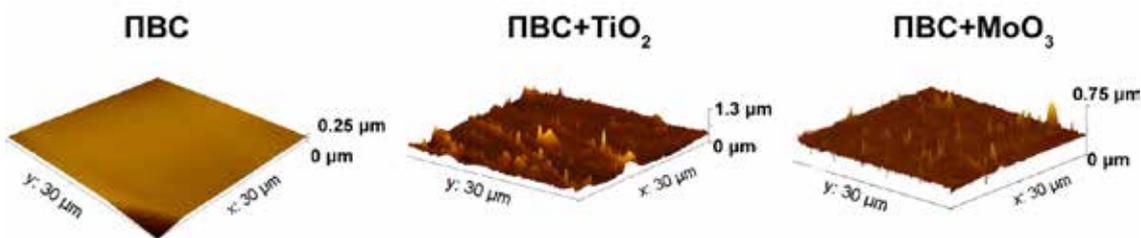


Рис. 2. АСМ-изображения исходной плёнки ПВХ и полученных композитных полимерных плёнок

Изображения АСМ показывают однородную структуру необработанного полимера, тогда как введение оксидов металлов привело к изменению морфологии пленки. Можно наблюдать крупные скопления частиц. Средние значения шероховатости при этом составляют от 15 до 35 нм.

Абсорбционная спектроскопия является одним из основных инструментов для определения ширины запрещенной зоны (E_g), которая определяет часть солнечного спектра, поглощаемую фотогальваническим элементом. Ширина запрещенной зоны оценивается с помощью соотношения Таука (рис. 3).

$$(ah\nu) = B_0(h\nu - E_g)^n,$$

где n – индекс, относящийся к типу оптического перехода в полупроводнике: $n = 2$ для непрямого перехода и $n = 1/2$ для прямого перехода. TiO_2 и MoO_3 – полупроводники n -типа с прямым переходом. Эксперименты показывают, что введение в полимерную матрицу наночастицы оксида

металла снижает значения E_g по сравнению с исходным ПВХ на 40% для прямого перехода и на 30% для непрямого перехода (таблица). При этом значения ширины запрещенной зоны прямых переходов уменьшаются более существенно, что может быть связано с наличием в нанокомпозите областей с объемными гетеропереходами [12].

Введение оксидов металлов повышало электропроводность полимерных композитов в 40–45 раз по сравнению с исходным ПВХ при концентрации наполнителей от 1 до 1,8%. Для изучения фотовольтаики было собрано устройство, аналогичное представленному ранее [13]. Световые вольт-амперные кривые солнечных ячеек, содержащих нанокомпозитный материал, показаны на рис. 4. Значения плотности тока короткого замыкания фотоэлементов с полимерными композитами выше, чем без ПВХ [13], что подтверждает светорассеивающий эффект композита ПВХ + наночастицы оксидов металлов [14].

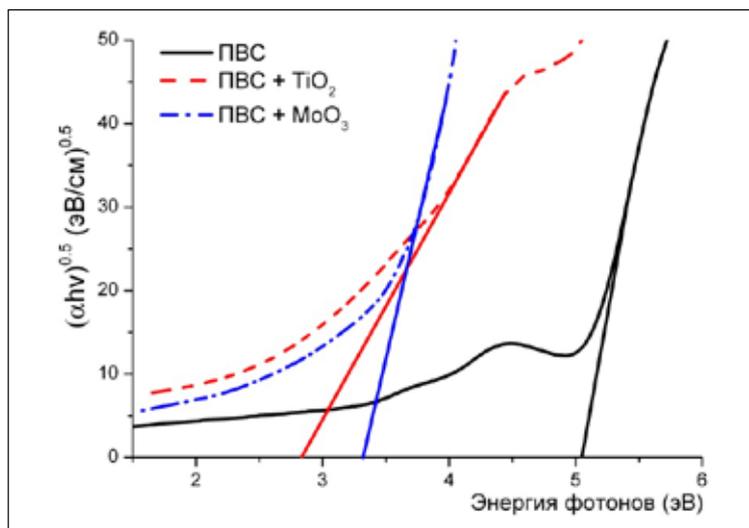


Рис. 3. Оценка ширины запрещенной зоны прямого электронного перехода для ПВХ и композитов

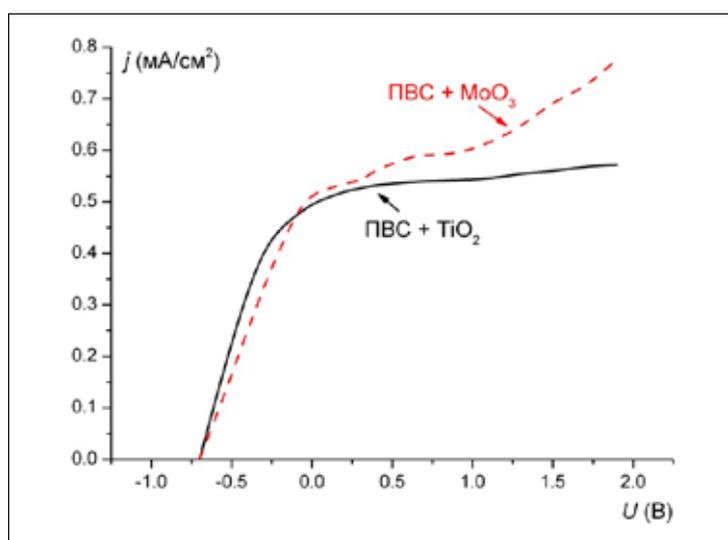


Рис. 4. Вольт-амперные кривые солнечных элементов

Заключение

В работе исследован одностадийный метод получения нанокompозитов ПВХ с импрегнированными наночастицами TiO_2 и MoO_3 с использованием низкотемпературной плазмы подводного разряда постоянного тока. Преимуществами этого метода являются низкая стоимость, простота синтеза наночастиц оксидов металлов, отсутствие необходимости в токсичных химических восстановителях и дополнительных прекурсорах, а также возможность совмещать процессы модификации полимеров

с синтезом наночастиц. Результаты рентгенофазового, ПЭМ и ИК-анализа показали, что наночастицы оксида металла внедряются в полимерную матрицу. Добавление оксидов металлов к полимеру улучшает проводимость. Благодаря наличию в нанокompозите областей с объемными гетеропереходами значения ширины запрещенной зоны как для непрямых, так и для прямых переходов значительно уменьшаются. Полученные нанокompозиты являются перспективными материалами для изготовления солнечных элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-73-00034). Автор выражает благодарность к.х.н. Н.А. Фоминой за проведение рентгенофазового анализа, к.х.н. Ю.А. Фадеевой за проведение ИК-анализа (в рамках Центра коллективного пользования научным оборудованием «Верхневолжский региональный центр физико-химических исследований») и к.х.н. А.В. Хлюстовой за плодотворную дискуссию.

Список литературы

1. Jung H.S., Lee J.K. Dye Sensitized Solar Cells for Economically Viable Photovoltaic Systems. *J. Phys. Chem. Lett.* 2013. Vol. 4. P. 1682–1693.
2. Lan Z., Wu J., Lin J., Huang M., Li P., Li Q. Progress on the electrolytes for dye-sensitized solar cells. *Electrochim. Acta.* 2008. Vol. 53. P. 2296.
3. Senthil R.A., Theerthagiri J., Madhavan J. Hematite Fe_2O_3 nanoparticles incorporated polyvinyl alcohol based polymer electrolytes for dye-sensitized solar cells. *Mater. Sci. Forum.* 2015. Vol. 832. P. 72–83.
4. Wang M., Lian Y., Wang X. PPV/PVA/ZnO nanocomposite prepared by complex precursor method and its photovoltaic application. *Curr. Appl. Phys.* 2009. Vol. 9. P. 189–194.
5. Mbhele Z.H., Salemane M.G., Van Sittert C.G.C.E., Nedeljković J.M., Djoković V., Luyt A.S. Fabrication and characterization of silver–polyvinyl alcohol nanocomposites. *Chem. Mater.* 2003. Vol. 15. P. 5019–5024.
6. Singh V.K., Annu A., Singh U., Singh P., Pandey S.P., Bhattacharya B., Singh P.K. Dye sensitized solar cell based on poly (vinyl alcohol) doped with ammonium iodide solid polymer electrolyte. *J. Optoelectron. Adv. Mater.* 2013. Vol. 15. P. 927–931.
7. Liu C., Su Z., Li W., Jin F., Chu B., Wang J., Zhao H., Lee C.S., Tang J., Kang B. Improved performance of perovskite solar cells with a $\text{TiO}_2/\text{MoO}_3$ core/shell nanoparticles doped PEDOT: PSS hole-transporter. *Org. Electron.* 2016. Vol. 33. P. 221–226.
8. Saito G., Akiyama T. Nanomaterial synthesis using plasma generation in liquid. *J. Nanomater.* 2015. Vol. 2015.
9. Khlyustova A., Sirotkin N., Kraev A., Agafonov A., Titov V. Effect of metal oxides added onto polyvinyl alcohol via pulsed underwater plasma on their thermal, electrical and dielectric properties. *J. Appl. Polymer Sci.* 2021. Vol. 138. P. 51174.
10. Sirotkin N.A., Khlyustova A.V., Titov V.A., Kraev A.S., Nikitin D.I., Dmitrieva O.A., Agafonov A.V. Synthesis and Photocatalytic Activity of WO_3 Nanoparticles Prepared by Underwater Impulse Discharge. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2020. Vol. 40. P. 571–587.
11. Bhavani S., Ravi M., Pavani Y. Studies on structural, electrical and dielectric properties of nickel ion conducting polyvinyl alcohol based polymer electrolyte films. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 2017. Vol. 28. P. 13344–13349.
12. Mott N.F., Davis E.A. *Electronic processes in non-crystalline materials*, 2nd edn. 1979. Clarendon.
13. Khlyustova A., Sirotkin N., Titov V., Agafonov A. Effect of low-temperature underwater plasma produced of new properties of Mo–Ti mixed oxide composites for electron transport layer in the dye-sensitized solar cells. *J. Alloys Compounds.* 2021. Vol. 858. P. 157664.
14. Mustafa M.N., Shafie S., Wahid M.H., Sulaiman Y. Light scattering effect of polyvinyl-alcohol/titanium dioxide nanofibers in the dye-sensitized solar cell. *Sci. Rep.* 2019. Vol. 9. P. 14952.

СТАТЬЯ

УДК 338.43:01

**РАЗВИТИЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА
В ЦИФРОВОЙ СРЕДЕ
НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ**

^{1,2}Тимиргалеева Р.Р., ²Вердыш М.В., ²Попова А.А.

¹ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»,
Симферополь, e-mail: renatimir@gmail.com;

²ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»,
Симферополь, e-mail: verdysh_m@niishk.ru

В статье обоснована необходимость развития агропромышленного комплекса в цифровой среде на основе интеграционных процессов. Выявлено, что процессы цифровой трансформации являются одним из эффективных механизмов развития субъектов интеграции АПК и требуют комплексного внедрения современных информационно-коммуникационных технологий. Выделены актуальные направления развития АПК, среди которых реализация концепции «умное» аграрное производство, обеспечивающее эффективное управление всеми бизнес-процессами, а также реализация интеграционных процессов в развитии цифрового АПК, основанного на активном внедрении цифровых инструментов управления. В рамках исследования проанализированы научные публикации отечественных и зарубежных авторов, выделен блок проблем, требующих дополнительного изучения и анализа. На основе системного, интегрированного подхода выделены объективные и субъективные предпосылки интеграции субъектов АПК, выявлены основные условия возникновения интеграционных связей в данном секторе экономики, которые необходимо учитывать в процессе цифровой трансформации АПК. Показано, что на функционирование субъектов хозяйствования АПК негативное воздействие оказывает отсутствие вертикальных связей (интеграции) в цепочке создания конечного продукта. Одним из основных негативных эффектов последствий отсутствия интеграционных вертикальных структур АПК являются значительные транзакционные издержки. Представлена классификация транзакционных затрат в АПК и сделан вывод о том, что в условиях цифровой среды качественный анализ и контроль транзакционных издержек возможен при условии применения современных информационно-коммуникационных технологий. Процессы цифровой трансформации АПК требуют применения прогрессивной модели управления, основанной на современной цифровой экосистеме, интегрированной в производственную, научную, образовательную и социальную среду региона, что позволит добиться глубокой и эффективной интеграции.

Ключевые слова: агропромышленный комплекс, цифровая среда, цифровая трансформация, информационно-коммуникационные технологии, интеграционные процессы, интеграция, транзакционные издержки

**DEVELOPMENT OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX
IN THE DIGITAL ENVIRONMENT
ON THE BASIS OF INTEGRATION PROCESSES**

^{1,2}Timirgaleeva R.R., ²Verdysh M.V., ²Popova A.A.

¹Crimean Federal University named after V.I. Vernadskiy, Simferopol, e-mail: renatimir@gmail.com;

²Research Institute of Agriculture of the Crimea, Simferopol, e-mail: verdysh_m@niishk.ru

The article substantiates the need for the development of the agro-industrial complex in a digital environment based on integration processes. It was revealed that the processes of digital transformation are one of the effective mechanisms for the development of the subjects of integration of the agro-industrial complex and require the integrated implementation of modern information and communication technologies. The current directions for the development of the agro-industrial complex are highlighted, including the implementation of the concept of “smart” agricultural production, which ensures the effective management of all business processes, as well as the implementation of integration processes in the development of a digital agro-industrial complex based on the active introduction of digital management tools. Within the framework of the study, scientific publications of domestic and foreign authors were analyzed, a block of problems requiring additional study and analysis was identified. Based on a systematic, integrated approach, the objective and subjective prerequisites for the integration of agribusiness entities are identified, the main conditions for the emergence of integration ties in this sector of the economy, which must be taken into account in the process of digital transformation of the agro-industrial complex, are identified. It is shown that the functioning of economic entities of the agro-industrial complex is negatively affected by the absence of vertical links (integration) in the chain of creation of the final product. One of the main negative effects of the consequences of the lack of integration vertical structures of the agro-industrial complex are significant transaction costs. A classification of transaction costs in the agro-industrial complex is presented and it is concluded that in a digital environment, a qualitative analysis and control of transaction costs is possible if modern information and communication technologies are used. The processes of digital transformation of the agro-industrial complex require the use of a progressive management model based on a modern digital ecosystem integrated into the production, scientific, educational and social environment of the region, which will achieve deep and effective integration.

Keywords: agro-industrial complex, digital environment, digital transformation, information and communication technologies, integration processes, integration, transaction costs

Развитие экономики на современном этапе порождает необходимость нового экономического мышления, реализации новых подходов к управлению отраслями народного хозяйства, а также зависит от эффективного генерирования, распространения и применения новых знаний, внедрения которых невозможно без цифровых технологий, новых форм организации и управления производством, распределения и потребления материальных ресурсов и получаемых благ.

Современные условия и тенденции развития экономики требуют от всех субъектов хозяйствования реализации более действенных механизмов и подходов. Агропромышленный комплекс (далее – АПК), являясь совокупностью отраслей народного хозяйства, связанных с развитием сельского хозяйства, обслуживанием производства сельскохозяйственной продукции и ее доведения до потребителя, также требует поиска и реализации эффективного инструментария своего развития [1]. Кроме того, от состояния и темпов развития АПК, в особенности от развития и состояния пищевой и перерабатывающей промышленности, напрямую зависит уровень жизни населения и, как следствие, состояние продовольственной и экономической безопасности страны.

Процессы цифровой трансформации являются одним из эффективных механизмов и современным драйвером развития как экономики страны, так и отдельных ее отраслей, в том числе агропромышленного комплекса, что требует комплексного внедрения цифровых технологий в процессы производства и управления. Цифровая трансформация происходит по-разному – в некоторых отраслях и сферах деятельности наблюдается ее постепенное развитие, а в других мы видим ускоренную цифровизацию. Независимо от степени активности данного процесса актуальным является выявление наиболее существенных факторов влияния и анализ возможностей использования имеющихся ресурсов для активизации процессов цифрового развития и модернизации субъектов, входящих в состав АПК, для обеспечения их конкурентоспособности и повышения эффективности их деятельности.

Большинство субъектов, формирующих АПК, в той или иной степени используют или намерены внедрять в практическую деятельность различные инструменты и решения современных цифровых технологий. Для отечественных аграриев использование инновационных цифровых решений пред-

ставляет собой достаточно новый подход к управлению, требующий умения использовать ранее нехарактерные для предприятий отрасли такие цифровые технологии, как дроны, GPS-системы, электронные карты полей, бортовые терминалы, беспилотные летательные аппараты, системы позиционирования, робототехнику, точное оборудование и другие инструменты. В целом, с учётом глобальных трендов, видим, что актуальным направлением развития АПК является реализация концепции ведения «умного» аграрного производства и управления всеми бизнес-процессами, что требует необходимости внедрения современных и эффективных механизмов [2].

Несмотря на достаточно большое количество теоретико-методологических разработок и многочисленные труды по исследованию проблем управления сельскохозяйственными предприятиями и предприятиями перерабатывающей отрасли, а также многоаспектность и дискуссионность отдельных аспектов цифровой трансформации процессов управления на данных предприятиях, динамизм развития цифровых технологий и их практическое применение в аграрном секторе экономики, отдельные методологические и практические аспекты цифровизации АПК в условиях технологического обновления аграрного производства требуют дополнительного анализа и более глубоких исследований в теоретическом, методологическом и практическом аспектах. Отдельного внимания требуют вопросы, связанные с обоснованием необходимости реализации интеграционных процессов в развитии цифрового АПК, основанного на активном внедрении цифровых инструментов управления.

Ориентация на инновационный путь развития в условиях цифровой трансформации экономики требует от АПК реинжиниринга всех бизнес-процессов, модернизации системы управления ресурсными потоками, создания на основе современных концепций управления новых способов развития его потенциала. Данные аспекты определили интерес к анализу основных направлений развития агропромышленного комплекса в цифровой среде на основе интеграционных процессов.

Изучению проблемы агропромышленной интеграции посвящены труды ряда ученых, среди которых отметим работы А.И. Алтуховой, А.Г. Гранберга, М.Г. Лещева, И.Г. Храмова. Вопросы цифровой трансформации АПК нашли отражение в работах В.Е. Афонинной, А.Н. Анищенко, А.А. Айтпаевой, О.Д. Ермоленко, Л.М. Корнилова,

А.В. Котова, А.В. Курдюмова, О.А. Мироновой, Я.В. Мочаловой и других авторов. Так, А.А. Айтпаева в своем исследовании выявила факторы повышения конкурентоспособности АПК, среди которых особое место занимает фактор цифровизации сельского хозяйства. Автором также проанализированы проблемы недостаточной распространённости цифровых технологий в сельском хозяйстве и обоснована роль цифровизации в достижении параметров продовольственной безопасности страны [3]. А.Н. Анищенко и А.А. Шутьков в своем исследовании доказали, что этап технологического развития Agriculture 4.0 является перспективной моделью научно-технологического развития аграрного сектора современной России, а также выявили и обосновали потенциальные выгоды от цифровизации агропродовольственного сектора [4]. В.Е. Афонина, А.Г. Серегин указывают на такую проблему, как отсутствие на сегодняшний день решения вопросов цифровизации в управлении затратами в закупочной деятельности субъектов АПК [5]. При этом учёные приводят примеры успешного использования цифровизации в закупочной деятельности на ее различных этапах посредством применения современных цифровых технологий.

Для нашего предмета исследования представляют интерес научные выводы учёных, которые проанализировали результаты создания и развития кластеров в условиях цифровой трансформации экономики на примере сельскохозяйственной промышленности, рассмотрели опыт успешных цифровых платформ и провели анализ существующих проблем данной отрасли [6]. И.С. Козубенко раскрыл проблематику оценки эффективности цифровизации АПК и привел в своем исследовании положительный зарубежный опыт постановки задач по созданию цифровых основ в агропромышленном комплексе Австралии в рамках Национальной программы аграрных инноваций, а также сформулировал авторскую дефиницию цели цифровой трансформации АПК и представил ключевые показатели эффективности применения информационно-аналитических инструментов в рамках информационного обеспечения управления земельными ресурсами [7]. Совершенно справедливо Л.М. Корнилова отмечает, что переход к цифровой экономике в АПК невозможен без инновационной активности сельскохозяйственных предприятий и анализирует сдерживающие факторы внедрения и развития цифровых технологий в аграрном секторе [8]. О.А. Миронова, на фоне анализа основных тенденций раз-

вития процессов цифровизации в аграрном секторе ведущих стран и России, обосновывает необходимость активизации внедрения цифровых технологий в отрасли АПК России в условиях актуализации проблемы обеспечения продовольственной безопасности в условиях экономических санкций и реализации политики импортозамещения. Автор рассматривает основные направления внедрения цифровых технологий в отечественное сельскохозяйственное производство и оценивает возможные результаты их применения [9].

Интересным для нашего исследования является опыт развития агропромышленного комплекса в Белгородской области, который в своей работе анализирует Я.В. Мочалова, а также разработанный автором методический подход к применению цифровых технологий в сфере АПК [10]. Отдельно отмечены авторы работы [11] – А.В. Распутина и А.В. Винобера, которые подошли к исследованию проблемы цифровизации АПК на основе методов системного анализа, позволяющих изучить сложные объекты системы АПК.

Вместе с тем в рассмотренных работах недостаточно отражены вопросы системного, интегрированного подхода к решению обозначенных проблем, что и определило необходимость настоящего исследования.

Целью исследования является анализ развития агропромышленного комплекса в цифровой среде на основе интеграционных процессов.

Научная новизна работы состоит в обосновании необходимости формирования регионального центра развития цифрового АПК в Республике Крым, обеспечивающего интеграционные и экономические процессы нового типа, использующие перспективные технологии, открывающие доступ к современному производству, научным исследованиям, а также к рынкам промышленного интернета и промышленных данных, что обеспечит реализацию концепции цифровой трансформации АПК.

Материалы и методы исследования

Для достижения поставленной цели в работе использованы различные методы научного исследования: системный, методы группирования и систематизации, абстрактно-логический, системно-структурный, сравнительный анализ, метод детализации.

Результаты исследования и их обсуждение

Исходя из характера произведенного конечного продукта, в структуре АПК выде-

ляются продовольственный, непродовольственный и обеспечивающий комплексы [12]. Сформировавшаяся на сегодня структура АПК требует четкого выстраивания всех производственных и экономических процессов, разработки и внедрения интеграционных процессов, которые невозможно реализовать без современных информационно-коммуникационных технологий, являющихся основой цифровой трансформации сферы АПК.

Одной из предпосылок интеграции субъектов АПК является необходимость решения предпринимательских задач, связанных с расширением возможностей каждого из участников в производственном и социальном развитии, повышением эффективности использования всех видов ресурсов (материальных, финансовых, информационных, трудовых и др.) на основе эффективной организации совместной деятельности, распределения труда и кооперации, объединения усилий и средств для научно-технического, производственного и социального развития каждого участника объединения. Исследование позволило выявить основные условия возникновения интеграционных связей в аграрном секторе: нестабильность рынков и недостаточный уровень обеспечения ресурсами; возрастающие потребности экономики; масштабы задач, стоящих сегодня перед отечественным АПК; возможность, получаемые вследствие функционирования консолидированного капитала получать высокие прибыли с меньшими рисками. Кроме того, в современных условиях хозяйствования именно формирование интегрированных объединений представляется одним из наиболее эффективных путей реализации глобальной стратегии повышения рентабельности за счет возможности контролировать стратегически важные звенья в производственных цепочках и цепочках продажи готовой продукции, снижая тем самым уровень своих транзакционных издержек. При этом отметим, что из трех видов интеграции (вертикальная, горизонтальная, смешанная) негативное воздействие на функционирование субъектов хозяйствования оказывает отсутствие именно вертикальных связей в цепочке создания конечного продукта. Среди таких негативных эффектов отметим следующие:

- снижение эффективности производственно-сбытовой деятельности;
- рост затрат, связанных с поиском контрагентов;
- сложности и повышение затрат, связанных с поиском и получением рыночной информации;

- неразвитость институтов рынка;
- слабость юридической защиты прав собственности и договорных обязательств;
- снижение доверия между экономическими агентами;
- локализация деловых связей.

Как показал опыт ряда интеграционных структур, провалы рынка преодолеваются именно за счет различных форм вертикальной интеграции, когда снижение транзакционных издержек осуществляется за счет установления, а в некоторых случаях и восстановления технологических связей и повышения их надежности. При этом полученные выгоды зависят не только от общей величины транзакционных затрат, но и от их распределения между участниками экономических отношений. Кроме того, необходимо учитывать определенные особенности процессов обмена в обществе – недобросовестность деловых партнеров, информационную асимметрию, наличие недобросовестных отношений и др. Развитие интегрированных структур раскрывает новые возможности, направленные на рост производства сельскохозяйственной продукции и повышение занятости в агропромышленном секторе. Особое значение транзакционных издержек в АПК вызвано, прежде всего, сезонностью производства, достаточно низким уровнем цен на сельскохозяйственную продукцию с одновременными высокими ценами на производственные услуги, а также кадровыми проблемами отрасли. Учитывая, что на долю транзакционных издержек в АПК приходится более четверти всех затрат, они, по сути, являются одним из важнейших факторов активизации интеграционных процессов в агропромышленной сфере, что требует в каждом отдельном случае проведения их полного анализа и последующей оптимизации на уровне субъектов интеграции АПК. Кроме того, подобный анализ позволит выявить неэффективные институты, с функционированием которых связаны необоснованно большие транзакционные издержки в АПК, возникающие на макроуровне. Учитывая связь транзакционных затрат с необходимостью обеспечения жизнедеятельности субъектов АПК в институциональной среде и объективность существования институтов и организаций, с которыми связаны данные издержки, представим классификацию транзакционных затрат в АПК (таблица).

Отметим, что в условиях цифровой среды качественный анализ и контроль транзакционных издержек также требует применения современных информационно-коммуникационных технологий.

Классификация транзакционных затрат в АПК

Вид транзакционных затрат	Назначение транзакционных затрат
1. Затраты на функционирование рынка агропромышленного сектора	Организационно-правовое обеспечение деятельности субъектов АПК
	Поиск потенциальных поставщиков и покупателей
	Продвижение своей продукции на рынок
2. Затраты на поиск и сбор информации	Подготовка к заключению договоров/сделок
	Поиск информации о распределении цен и качестве товаров и трудовых ресурсов
	Поиск актуальной информации о поведении и материальном состоянии поставщиков и покупателей
3. Затраты на заключение договоров и их исполнение	Предупреждающие меры по неисполнению договоров контрагентами
	Проведение торгов и выявление истинных позиций покупателей и продавцов при эндогенных ценах
	Составление, заключение и соблюдение партнерами контрактов
	Обеспечение выполнения контрактов и взимание убытков в случае невыполнения партнерских соглашений
4. Затраты на профсоюзы	Защита прав сотрудников
5. Кадровые затраты	Рекрутинг, обучение, подготовка и переподготовка кадров
6. Затраты ответственности	Независимый аудит, деятельность наблюдательных органов
	Защита прав собственности от посягательств третьей стороны
	Контроль качества произведенной продукции
	Получение лицензий
7. Экологические затраты	Энергосбережение и применение альтернативных источников энергии

Кроме транзакционных издержек необходимо выделить еще один важный и достаточно мощный фактор активизации агропромышленной интеграции – государственное регулирование. Именно государство обеспечивает политическую стабильность и создает нормативно-правовую базу, определяющую не только взаимоотношения между субъектами хозяйствования, но и политику формирования интеграционных структур, выступая также непосредственным участником интеграционных процессов. Особенно важна роль и поддержка государства для тех сельскохозяйственных предприятий, которые имеют крайне изношенные основные фонды и дефицит оборотных средств. Совершенно очевидно, что такие предприятия без поддержки государства не смогут преодолеть свое кризисное состояние и тем более организовать эффективное производство. В этой связи такой механизм, как интеграция, является для данных предприятий одним из возможных способов выживания.

Грамотно построенные интеграционные процессы могут стать определяющими факторами динамики развития АПК, их реализация обеспечит необходимый уровень функционирования отрасли за счет объединения сельскохозяйственного и техноло-

гически связанного с ним промышленного производства не только в пределах Республики Крым, но с другими субъектами РФ, что приведет к получению более высокой экономической выгоды за счет синергетического эффекта.

Создание единого цифрового пространства субъектов АПК, единой цифровой инфраструктуры позволит достичь высоких результатов за счет совместных проектов, мероприятий, а также повысит конкурентоспособность России в условиях глобальной цифровой трансформации. При этом ожидается, что цифровая инфраструктура АПК приведет к ряду интеграционных эффектов: формирование новых цифровых инфраструктур и платформ АПК; обеспечение равного доступа субъектов АПК к цифровой инфраструктуре и равный доступ на цифровые рынки; перевод взаимодействия всех субъектов АПК в электронный вид.

Учитывая вышесказанное, приходим к необходимости формирования регионального центра развития цифрового АПК в Республике Крым, обеспечивающего интеграционные и экономические процессы нового типа, использующие перспективные технологии, открывающие доступ к современному производству, научным исследованиям,

а также к рынкам промышленного интернета и пространственных данных, таких как рынки цифровых брокеров в сельском хозяйстве, торговле и фармацевтике. Такой региональный центр развития цифрового АПК может стать активным генератором новых рейтингов и стандартов в эпоху цифровой экономики. Данный центр требует создания цифровой инфраструктуры АПК, которая станет точкой преобразования его экономики в цифровой формат. Необходима прогрессивная модель управления, основанная на современной цифровой экосистеме, интегрированной в производственную, научную, образовательную и социальную среду региона, так как только информационные технологии в своем современном развитии позволяют добиться глубокой и эффективной интеграции.

Заключение

Таким образом, современная аграрная революция подразумевает внедрение передовых информационно-коммуникационных технологий, которые сократят объем ручного труда и расходы, при этом повысят производительность и урожайность. Цифровые технологии позволят снизить риски, исключить человеческий фактор, снизить издержки и повысить урожайность сельскохозяйственных культур. Развитие интеграционных процессов в АПК должно осуществляться на основе установления социально-экономических отношений с учетом базовых положений развития процессов интеграции. Важной является идентификация основных закономерностей такого развития и выделение их в группы факторов и на этой основе формирование теоретико-методологического базиса, учитывающего наиболее выгодные экономические перспективы для дальнейшего развития и стабилизации аграрного сектора

экономики в направлении экономической стабильности и продовольственной безопасности страны и ее регионов.

Список литературы

1. Минаков И.А. Развитие интеграционных процессов в агропромышленном комплексе. Мичуринск: Издательство Мичуринского ГАУ, 2016. 191 с.
2. Гришин И.Ю., Тимиргалеева Р.Р. Технологии искусственного интеллекта в развитии системы дистанционной диагностики состояния виноградных агроценозов. Севастополь: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2022. 164 с.
3. Айтпаева А.А. Цифровизация сельского хозяйства в контексте повышения конкурентоспособности отечественного АПК // Вестник АГТУ. Серия: Экономика. 2019. № 3. С. 56–63.
4. Анищенко А.Н., Шутьков А.А. Agriculture 4.0 как перспективная модель научно-технологического развития аграрного сектора современной России // Продовольственная политика и безопасность. 2019. Т. 6. № 3. С. 129–140.
5. Афонина В.Е., Серегин А.Г. Развитие цифровой экономики в АПК как фактор повышения конкурентоспособности отечественной агропродовольственной продукции // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2019. № 1. С. 5–10.
6. Ивашев П.А., Андропова И.В. Процессы цифровизации АПК России как основа конкурентоспособности кластера // Научно-практический электронный журнал «Аллея Науки». 2019. № 6 (33).
7. Козубенко И.С. Ориентиры оценки эффективности цифровизации АПК. Австралийский опыт // Экономические науки. 2020. № 3 (37). С. 101–108.
8. Корнилова Л.М. Стимулирование инновационной активности сельскохозяйственных организаций – основа цифровизации АПК // Инновационное развитие экономики. 2018. № 5 (47). С. 52–58.
9. Миронова О.А. Цифровизация экономики АПК России: задачи, проблемы, перспективы // Economics. Law. State. 2019. № 5 (7). С. 41–47.
10. Мочалова Я.В. Вектор развития российского АПК – цифровизация // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2020. Т. 10. № 1А. С. 593–600.
11. Распутина А.В., Винобер А.В. Система АПК: проблемы цифровизации и структурные алгоритмы целеустремления подсистем // Биосферное хозяйство: теория и практика. 2020. № 10 (28). С. 16–38.
12. Нечаев В.И., Артемова Е.И., Белова Л.А. Экономика сельского хозяйства: учебник. М.: КолосС, 2010. 383 с.