

ISSN 2713-220X



НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ: ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

2021 № 1 (Том 2)

**SCIENTIFIC RESEARCHES:
RESULTS AND PROSPECTS**

2021 № 1 (Том 2)

СОДЕРЖАНИЕ

Обращение главного редактора к авторам и читателям 3

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Байрамов А.М., Алиев Р.М., Курбанов Ш.М. Глубокая геотермия. Возможности и перспективы развития в Республике Дагестан
Гусейнов Г.Г. Исследование критических технологий для интенсификации трудно-извлекаемых запасов нефти 4 14

РАДИОТЕХНИКА, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Чукита В.И. Выращивание эпитаксиальных слоев селенида кадмия на подложках слюды
Офицерова И.В., Исабекова Т.И., Сулейманов И.С. Корреляции технологии получения карбидкремниевых твердых растворов с типом проводимости 28
Денгаев А.М. Математическое моделирование в задачах диагностики и прогнозирования заболеваний 43

ТЕХНОЛОГИИ, ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Беретарь С.Т. Исследование влияния кукурузной муки и пектина на качество песочного печенья 50
Гашева М.А. Подбор заквасочных культур при производстве ферментированного кисломолочного напитка из козьего молока 57

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Емельянова О.С., Ефимов А.А. Повышение прочности на скалывание деревянных внецентренно сжатых элементов вакуумным антисептированием 61

ТРАНСПОРТ

Рябцев Ф.А., Климов А.В., Ухов И.В., Карелина М.Ю. Имитационная модель аккумуляторного электрического транспортного средства 70

Учредитель и издатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дагестанский государственный технический университет»

Редакционная коллегия:

Н.С. Суракатов, к.э.н., доцент, главный редактор (Махачкала)
Г.Х. Ирзаев, к.т.н., доцент, зам. главного редактора (Махачкала)
А.Д. Абакаров, д.т.н., профессор (Махачкала)
Г.М. Абакаров, д.х.н., доцент (Махачкала)
Э.К. Агаханов, д.т.н., профессор (Махачкала)
А.П. Адамов, д.т.н., профессор (Махачкала)
Р.М. Алиев, д.т.н., профессор (Махачкала)
Х.Х. Ахмадова, д.т.н., профессор (Грозный)
М.Э. Ахмедов, д.т.н., доцент (Махачкала)
М.У. Ахмедпашаев, д.т.н., доцент (Махачкала)
Р.В. Гусейнов, д.т.н., профессор (Махачкала)
Т.А. Исмаилов, д.т.н., профессор (Махачкала)
М.Ю. Карелина, д.т.н., профессор (Москва)
Д.А. Магомедов, д.т.н., профессор (Махачкала)
К.П. Манжула, д.т.н., профессор (С-Петербург)
А.Н. Остриков, д.т.н., профессор (Воронеж)
Г.К. Сафаралиев, д.ф.-м.н., профессор, чл.-корр. РАН (Москва)
А.Р. Тагилаев, д.т.н., профессор (Махачкала)
С.У. Увайсов, д.т.н., профессор (Москва)
О.М. Устарханов, д.т.н., профессор (Махачкала)
Н.К. Юрков, д.т.н., профессор (Пенза)

При перепечатке ссылка на журнал «Научные исследования: итоги и перспективы» обязательна.

Все поступившие в редакцию материалы подлежат рецензированию.

Мнения авторов могут не совпадать с точкой зрения редакции.

Редакция в своей деятельности руководствуется рекомендациями Комитета по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics).

Условия публикации статей размещены на сайте: <http://dstu.ru>.

Журнал включен в базы данных eLIBRARY и индексируется в национальной информационно-аналитической системе – Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Адрес редакции: 367026, Республика Дагестан, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70

Телефон: +7 (8722) 62 37 15

E-mail: naukajournal@mail.ru.

ISSN 2713-220X

2021 № 1 (Vol. 2)

CONTENTS

Message from the editor-in-chief to authors and readers 3

EARTH SCIENCES

Bayramov A.M., Aliev R.M., Kurbanov Sh.M. Deep geothermy. Opportunities and prospects for development in the Republic of Daghestan 4
Guseinov G.G. Research of Critical Technologies for Stimulation of Hard-to-Recover Oil Reserves 14

RADIO ENGINEERING, MICRO- AND NANOELECTRONICS

Chukita V.I. Growth of epitaxial layers of cadmium selenide on mica substrates 28
Ofitserova I.V., Isabekova T.I., Suleimanov I.S. Correlations of the technology of obtaining silicon carbide solid solutions with the type of conductivity 38
Dengaev A.M. Mathematical modeling in the problems of diagnosis and prognosis of diseases 43

TECHNOLOGIES, PROCESSES AND DEVICES OF FOOD PRODUCTION

Beretar S.T. Study of the effect of corn flour and pectin on the quality of shortbread cookies 50
Gasheva M.A. Selection of starter cultures in the production of fermented sour milk drink from goat milk 57

BUILDING CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Emelyanova O.S., Efimov A.A. Increasing the shear strength of wood eccentrically compressed elements by vacuum antiseptic treatment 61

TRANSPORT

Ryabtsev F.A., Klimov A.V., Ukhov I.V., Karelina M.Yu. Battery electric vehicle simulation model 70

Founder and Publisher: federal state budgetary educational institution of higher education «Daghestan State Technical University»

Editorial team:

N.S. Surakatov, Ph.D., Associate Prof., Chief editor (Makhachkala)
G.Kh. Irzaev, Ph.D., Associate Prof., Deputy Chief Editor (Makhachkala)
A.D. Abakarov, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)
G.M. Abakarov, Doctor of Science, Associate Prof. (Makhachkala)
E.K. Agakhanov, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)
A.P. Adamov, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)
R.M. Aliev, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)
Kh.Kh. Akhmadova, Doctor of Science, Prof. (Grozny)
M.E. Akhmedov, Doctor of Science, Associate Prof. (Makhachkala)
M.U. Akhmedpashaev, Doctor of Science, Associate Prof. (Makhachkala)
R.V. Huseynov, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)
T.A. Ismailov, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)
M.Yu. Karelina, Doctor of Science, Prof. (Moscow)
D.A. Magomedov, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)
K.P. Manzhula, Doctor of Science, Prof. (St. Petersburg)
A.N. Ostrikov, Doctor of Science, Prof. (Voronezh)
G.K. Safaraliev, Doctor of Science, Prof. (Moscow)
A.R. Tagilayev, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)
O.M. Ustarkhanov, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)
S.U. Uvaisov, Doctor of Science, Prof. (Moscow)
N.K. Yurkov, Doctor of Science, Prof. (Penza)

When reprinting a link to the journal «Scientific researches: results and prospects» required.
All materials received by the editors subject to review.
The opinions of the authors may not coincide with the views of the publisher.
The editors in their activities guided by the recommendations of the Committee on Publication Ethics.
The conditions for publishing articles are available on the website: <http://dstu.ru>.
The journal is included in the eLIBRARY databases and indexed in the national information and analytical system - Russian Science Citation Index (RSCI).

Editorial office: 70 I. Shamily Ave., Makhachkala, Republic of Daghestan, 367026, Russia.
Tel.: +7 (8722) 62 37 15
E-mail: naukajournal@mail.ru.

ISSN 2713-220X

ОБРАЩЕНИЕ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА К АВТОРАМ И ЧИТАТЕЛЯМ

Дорогие друзья!

Прошел год, как редакционная коллегия журнала «Научные исследования: итоги и перспективы» начала с энтузиазмом воплощать в жизнь свою идею по созданию современного научного издания для максимально быстрой, полной и открытой публикации научных трудов. За год издано 4 номера журнала, в которых было опубликовано более 40 статей авторов из 18 различных научных организаций и вузов страны.



Можно сказать, что этап становления журнала прошел, и мы делаем уверенные шаги в решении задачи создания комфортных условий публикации авторских работ и обеспечения широкого доступа к ним. Приглашаем авторов и читателей помочь нам в развитии журнала. Мы открыты для конструктивной критики, диалога и новых предложений, которые просим направлять на e-mail: naukajournal@mail.ru. Рассчитываем, что с Вашей помощью журнал «Научные исследования: итоги и перспективы» станет одним из лидирующих периодических научных изданий в области технических наук.

Наша основная задача – обеспечить удобные условия размещения результатов научных работ в областях машиностроения, строительства и архитектуры, пищевых технологий, транспорта, разработки и добычи нефтегазовых ископаемых, химических технологий, микроэлектроники и нанотехнологий как маститыми, известными учеными, так и молодыми учеными и аспирантами.

Выражаю редакционной коллегии, авторам номеров журнала искреннюю признательность за проявленный интерес и активное участие в развитии журнала с самых первых шагов его становления. Приглашаю к еще более активному сотрудничеству всех коллег из регионов России, стран ближнего и дальнего зарубежья.

С уважением, главный редактор,
ректор Дагестанского государственного
технического университета,
кандидат экономических наук

Н.С. Суракатов

ГЛУБОКАЯ ГЕОТЕРМИЯ. ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ В РЕСПУБЛИКЕ ДАГЕСТАН

А.М. Байрамов¹, Р.М. Алиев², Ш.М. Курбанов²

Немецко-исландская компания «Noblika» (Verkis), Берлин

e-mail: bairatov@gmx.de

*Дагестанский государственный технический университет, Махачкала
shalym04@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрены мировые тенденции в сооружении геотермальных электростанций, показана необходимость строительства на территории Северного Кавказа как крупных генерирующих мощностей, так и малых геотермальных электростанций. Отмечена возможность успешной интеграции их с другими возобновляемыми источниками энергии с целью обеспечения максимально эффективного энергоснабжения. Показана стратегическая перспектива создания энергокластеров, нацеленных на обеспечение условий устойчивого развития региона и создания в нём центра активного использования геотермальной энергетики, позволяющего создавать перспективные импортозамещающие и экспортно-ориентированные решения. Затронуты вопросы состояния и перспектив использования геотермальной энергии в Дагестане, включая ресурсную базу термальных вод, технологии и перспективные инвестиционные проекты в области теплоснабжения и создания геотермальных электростанций.

Abstract. The world trends in the construction of geothermal power plants are considered, the need for the construction of both large generating capacities and small geothermal power plants in the North Caucasus is shown. The possibility of their successful integration with other renewable energy sources in order to ensure the most efficient energy supply is noted. A strategic perspective of creating energy clusters aimed at ensuring conditions for sustainable development of the region and creating a center for the active use of geothermal energy in it, which allows creating promising import-substituting and export-oriented solutions, is shown. The issues of the state and prospects of using geothermal energy in Daghestan were touched upon, including the resource base of thermal waters, technologies and promising investment projects in the field of heat supply and the creation of geothermal power plants.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, термальные воды, геотермальные скважины, геотермальные электростанции.

Keywords: *renewable energy sources, thermal waters, geothermal wells, geothermal power plants.*

Введение

Целью глубокой геотермии является производство за счет тепла недр электрической энергии и использование тепловой энергии в целях отопления, горячего водоснабжения и промышленного использования в различных технологических процессах, нуждающихся в потреблении тепла [1-4].

Согласно данным Ассоциации геотермальной энергетики (GEA, США) международный рынок геотермальной энергии растёт с постоянной скоростью 5% в год. Более 1000 геотермальных проектов находятся в стадии разработки в 80 странах. Многие страны рассматривают геотермальную энергетику в качестве средства парирования угроз, связанных с изменениями климата, рисками ограничения поставок топлива, а также в качестве базового гибкого источника возобновляемой энергии. Эти тенденции проявляются как в отдельных малых государствах, так и в крупных развитых экономиках, таких как Китай или США.

Согласно прогнозу мировой добычи нефти (по моделям М. Кинга, М. Хабберга) человечество сегодня находится на пике добычи нефти, и в дальнейшем потребление будет резко снижаться. Это подтверждает сегодня и практика. Так, например, в Европе и США наблюдается резкое снижение продаж автомобилей с двигателями внутреннего сгорания, а в Японии, некоторых регионах Китая вообще запрещена их продажа, реализуются только автомобили с электроприводом. В этих регионах интенсивно меняется структура производства

электроэнергии. В Германии и Дании к 2030 году планируется достичь 50% и 80 %, соответственно, порога применения возобновляемых источников энергии в структуре производства электроэнергии. В Исландии уже достигнут показатель в 85%.

Рассматривая различные виды возобновляемых источников энергии и их энергетический потенциал в процентах, можно констатировать прекрасные возможности для применения всех их видов в условиях Дагестана и рекомендовать их интенсивное развитие, особенно, глубокую геотермию, что позволит диверсифицировать структуру производства электроэнергии. Главное – наличие огромного фонда пробуренных глубоких скважин, которые могут составлять до 70% стоимости геотермальных систем [5-7].

Мировой опыт развития геотермии

Развитие глубокой геотермии можно проследить на примере двух стран: Исландии и Германии.

Прекрасным примером такой стратегии развития может служить Исландия, где за полвека страна почти полностью диверсифицировала производство электроэнергии – перешла с угля и нефти на производство зеленой энергии. Сегодня это свыше 85% возобновляемых источников энергии (ВИЭ), из них 73% приходится на геотермию, 12% – на гидроэнергетику. Наличие избыточного электрогенерирования позволило принципиально изменить вектор развития страны от рыболовства до появления новых секторов промышленно-

сти – выплавки алюминия из привозной руды, экспорта электроэнергии по подводным кабелям в Норвегию и Англию.

Исландия одной из первых использовала в промышленных масштабах тепло Земли. Компания VERKÍS, имеющая 70-летнюю историю, построила 155 геотермальных электро- и теплоэлектростанций (ГеоТЭС) на пяти континентах. Установлено 200 МВт электрической мощности (дополнительно строится еще 200 МВт), централизованное теплоснабжение 1400 МВт. Энергетическая компания города Рейкьявика потребляет более 60 млн. м³ геотермальных вод в год. Энергопотребление Исландии на душу населения является вторым по величине в мире после Канады.

Исландская компания Noblica и их партнеры имеют опыт проведения геотермальных исследований и разработок во многих странах Европы (Венгрия, Словакия, Россия, Польша, Грузия и др.), Центральной Америки (Сальвадор, Коста-Рика, Никарагуа), Африки (Кения, Уганда и др.), на Азорских островах и в Китае (Пекин, Тяньцзинь).

В ФРГ подземные теплоресурсы сосредоточены на северо- и юго-востоке: в землях Мекленбург-Передняя Померания (г. Нойбранденбург) и в Баварии (г. Унтерхаген). Всего в стране построено 34 геотермальных теплостанций и одна ГеоТЭС.

Принципиальная схема ГеоТЭС в г. Унтерхаген характеризуется двумя скважинами: эксплуатационной (забой 3350 м) и нагнетательной (забой 3590 м). Организован водооборотный цикл из продуктивного горизонта Мальмкарст с расходом 150 л/с, температура на забое 122°C, получаемая мощность 3,36 МВт

(электричество) и 70 МВт (тепловая энергия). Производится централизованное теплоснабжение 7000 домов. Электростанция, произведенная Siemens, является первой в Германии ГеоТЭС, использующей цикл Калина. Специфика работы этой ГеоТЭС в том, что летом практически полностью генерируется электричество, а в зимнее время она переключается только на теплоснабжение города.

Преимущества использования тепла Земли для производства электроэнергии и тепловой энергии, в отличие от других видов производства электрической энергии, следующие:

- ГеоТЭС работает 24 часа в сутки, что составляет 8000 часов в год в отличие от других ВИЭ, которые зависят от ветра, солнца или наличия волн, приливов, водостока в сухой летний маловодный период для малых гидроэлектростанций;

- производство 1 кВт электричества на ГеоТЭС сопровождается получением параллельно 4 кВт тепла;

- индекс цен производства энергии с помощью сжигания нефти или газа по сравнению с индексом цен производства энергии за счет добываемого тепла Земли в 1,5-2 раза больше;

- так как отсутствует процесс сжигания ископаемых топлив, то нет и выбросов вредных газов и CO₂;

- экономия любых видов топлива: дров, угля, биомассы, торфа, сланца, углеводородов, конденсата, мазута, бензина;

- абсолютное преимущество по параметру используемой площади, минимальному землеотчуждению (десятикратно меньше по сравнению с ветроустановками и тысячекратно меньше

при производстве биотоплив);

- нет вредного воздействия на экосистему в виде зеркального отражения в солнечных панелях или вибрации в ветроустановках и др.

Компанией VERKÍS был успешно реализован проект ГеоТЭС в Чечне на базе выведенного из эксплуатации продуктивного горизонта нефтяной залежи «Старогрозненская». Полная мощность составила 10 МВт (электроэнергия), тепловая мощность – 50 МВт (тепло); расчетный дебит скважины – 214-246 кг/с; протяженность эксплуатационного трубопровода – 5 км; реинжекция – 13 км.

Месторождение расположено в 8 км от центра города Грозный. Коллектор представляет собой толщу известняка около 300 м, около 30 км в длину и 3,2 км в ширину на глубине 4000 м. Средняя температура залежи составляет 150°C. В проекте предложено использовать 10 старых нефтяных скважин: 5 скважин, выведенных из эксплуатации, для добычи геотермального рассола и 5 – для обратной закачки (инъекции) в пласт. На месторождении по-прежнему будет продолжаться добыча нефти, но эта нефть добывается из разных продуктивных горизонтов, не имеющих гидродинамической связи. Рассмотрены различные варианты конструкции электростанции, в том числе органический цикл Ренкина (ORC) и цикл Калины. Проектом предусмотрено использование пластового флюида для централизованного теплоснабжения после производства электричества [9].

В качестве примера комплексного использования возможностей тепла

Земли приведен реализованный компанией VERKÍS проект теплоэлектростанции «Свартсенги» (Svartsengi). Это первая в мире ГеоТЭС, которая выполняет комбинированное производство электроэнергии и централизованного теплоснабжения города в Исландии. Строительство ГеоТЭС началось в 1978 году и состояло из 6 очередей, ввод в эксплуатацию которых осуществлялся поэтапно.

На сегодняшний день установленная мощность станции составляет 75 МВт по электроэнергии и 150 МВт по теплу. Помимо этого, станция известна использованием отработанных геотермальных вод в лечебных целях в расположенной неподалеку водолечебнице «Голубая лагуна» (Blue Lagoon). Это пример комплексного использования сбросового тепла после турбины на цели туризма, реабилитации, лечения, отдыха, создания рекреационных зон здоровья. Компания VERKÍS принимала непосредственное участие в проектировании данного объекта и оказывала инженерно-консультационные услуги на всех этапах его строительства.

Ресурсная база и геотермальные проекты в Республике Дагестан

В Северо-Кавказском федеральном округе Республика Дагестан (РД) обладает значительными разведанными запасами геотермальных вод, которые характеризуются набором благоприятных геотермических и горно-геологических условий для их масштабного использования [8].

Обзорная карта геотермальных месторождений РД приведена на рисунке.



ОБЗОРНАЯ КАРТА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РЕСПУБЛИКИ ДАГЕСТАН



ОАО ТЭК
"Геотермнефтегаз"



Рисунок – Обзорная карта геотермальных месторождений Республики Дагестан

Для создания циркуляционных систем к первоочередному освоению предлагаются трещинно-кавернозные карбонатные отложения Нефтекумской свиты пермтриаса, вскрытые несколькими десятками скважин на глубинах 4100 – 4800 м. Мощность этого коллектора в центральной зоне составляет 50 – 170 м, средняя температура – 175°C, проницаемость – свыше 1 дарси, избыточное давление – 65 бар, минерализация рассола – 118 г/л.

Дагестан не имеет достаточных топливно-энергетических ресурсов для полного удовлетворения потребностей экономики и социальной сферы. В республику ежегодно ввозится свыше 5 млн. т условного топлива, до 100% твердого топлива и до 67% природного газа. Дефицит электроэнергии особенно ощущается в осенне-зимний период, когда водность горных рек сокращается в 3 раза. В этих условиях добиться снижения напряженности энергобаланса можно форсированием использования ресурсов возобновляемых источников энергии и, в первую очередь, геотермальной энергии.

Рассмотрим ресурсную базу геотермальной энергетики РД. Суммарный природный потенциал термальных вод в Дагестане оценивается от 10 до 50 млн. т условного топлива в год. Примерно 3/4 этого потенциала приходится на равнинную и предгорную территорию республики, остальная часть – на Южный Дагестан.

Перспективными для использования являются площади равнинного и предгорного Дагестана, находящиеся в зоне пересечения продольных и поперечных глубинных разломов: Тарумовский, Кочубеевский, Юбилейный, Су-

хокумский, Селли, Гаша, АчиСу разломы. Максимальные дебиты скважин достигают 7000 м³/сут., пластовые температуры – до 190°C. Продуктивные горизонты представлены известняками нижнего триаса, песчаниками юры, нижнего мела и чокрака, мощности которых доходят до 400 м при глубине 3800–5200 м.

Добычей геотермальных вод на территории республики занимается ОАО «Геоэкопром». Фактически используется 0,02 млн. т условного топлива в год, что составляет 0,2% валового потенциала или 10% от разведанных запасов (118,5 тыс. м³/сут.). На балансе компании «Геоэкопром» имеется 120 скважин, 3 промысловых участка и 5 станций теплоснабжения. Ежегодно добывается 4 млн. м³ геотермальных вод, что позволяет получить 100 тыс. Гкал. тепловой энергии.

Термальная вода в основном используется в городах Махачкала и Кизляр. Среднегодовая добыча по Махачкалинскому термоводозабору составляет 570 тыс. м³ воды с температурой на устье 42–58°C.

В РД реализуются следующие проекты в области теплоснабжения.

1. Геотермальное теплоснабжение г. Махачкалы. Целью проекта является расширение использования геотермальных вод в северо-западном районе на базе свободных мощностей Тарнаирского термоводозабора. В настоящее время в работе находятся только две скважины или 30% от разведанных запасов, что обеспечивает отпуск 42 тыс. Гкал тепла. Проектом предусматривается перевод в эксплуатационные или нагнетательные 11 пробуренных ранее разведочных геотер-

мальных скважин, использование отделяемых горючих газов для подогрева подпиточной воды в системе горячего водоснабжения, модернизация тепло-распределительных станций в Махачкала 1 с получением 180 тыс. Гкал «чистого» тепла. Сметная стоимость – 226 млн руб., срок окупаемости – три года.

2. *Превращение Кизляра в «бездымный» город.* Цель проекта – реконструкция устаревшей системы теплоснабжения трех микрорайонов г. Кизляр с использованием геотермальных вод по двухконтурной схеме и установкой тепловых насосов. Необходимость реконструкции вызвана низкой экономической эффективностью теплоснабжения от существующих теплораспределительных станций, построенных более 30 лет назад. Полученные воды идеально подходят для выработки электроэнергии по бинарному циклу обогрева теплиц и птичников, для подпитки любых рыбоводных сооружений, в качестве питательной среды при производстве микроводорослей. Воды могут использоваться в бальнеологии и питьевом лечении, как аналог Анивской минеральной воды.

Реализация проекта позволит решить две проблемы:

- выращивание осетровых в зависимости от объемов восполнит или значительно минимизирует ущерб, наносимый нефтеразработками на шельфе Каспия;

- увеличение промышленного и налогового потенциала Дагестана за счет создания экологически чистых пищевых производств.

Сметная стоимость проекта – 840 млн. руб. Срок окупаемости – 6 лет от начала финансирования, 3 года от

начала получения продукции.

3. *Создание ГеоТЭС на базе отработанных нефтяных и газовых месторождений.* На Каясулинском полигоне ЭНИН была разработана и испытана технология создания и эксплуатации подземной циркуляционной системы в трещинном карбонатном коллекторе, включая метод кислотной обработки призабойной зоны, позволяющий в 5-6 раз повысить дебит подъемных и нагнетательных скважин, безреагентные способы предотвращения солеотложений и снижения коррозии оборудования при добыче и использовании высокотемпературного (170°C) геотермального рассола минерализацией 100 г/л. По заданию ЭНИН разработана конструкция и составлен проект глубокой (до 5 км) геотермальной подъемной скважины большого диаметра, способной при минимальных потерях на трение, обеспечить дебит до 10 тыс. м³/сут. при полной компенсации температурного удлинения эксплуатационной колонны.

Были проведены испытания элементов оборудования энергоустановки на фреоне 142b – теплообменника-парогенератора и воздушного конденсатора, что позволило провести апробацию методов расчета кипения и теплообмена в установках с низкоккипящими рабочими телами.

Так были решены все технологические проблемы создания ГеоТЭС на основе объединения циркуляционной технологии с энергоустановками на низкоккипящих рабочих телах, способных эффективно работать в засушливых районах без охлаждающей воды и при низких зимних температурах воздуха.

Согласно мировому опыту и проект-

ным данным опытной Ставропольской ГеоТЭС, суммарные капиталовложения делятся примерно поровну между затратами на бурение скважин и создание энергоустановки. При удельных капитальных вложениях 1000 \$/кВт в широко применяемые энергоустановки на низкокипящих рабочих телах фирмы «Ормат», удельные капитальные вложения на ГеоТЭС в Дагестане можно оценить в 2000 \$/кВт, что сопоставимо с величинами для современных ТЭС на органическом топливе. Следует ожидать, что отсутствие затрат на топливо, составляющих до 60% себестоимости электроэнергии на ТЭС, максимальное использование скважин отработанных нефтегазовых месторождений, а также отсутствие вредных выбросов, сделают ГеоТЭС конкурентоспособными с топливными электростанциями.

Потенциальные ресурсы геотермальных рассолов (140–230°C) для трещинных коллекторов в известняках пермотриаса оцениваются в 0,5 млн. м³/сут., что позволяет построить на их базе ГеоТЭС с низкокипящим рабочим телом общей мощностью не менее 300 МВт, годовым отпуском электроэнергии 1,7 млрд. кВтч и на 25% обеспечит потребности РД на уровне 2030 года.

Для практического подтверждения конкурентоспособности подобных электростанций в современных экономических условиях предлагается в ближайшие 5 лет построить опытно-промышленную ГеоТЭС мощностью 10–25 МВт. Предполагается использовать существующие отработанные нефтяные скважины для обратной закачки в пласт охлажденного на станции рассола. На этом этапе для экономии времени и средств на разработку в качестве ос-

новного оборудования рекомендуется применить геотермальные энергомодули израильской фирмы «Ормат», работающие на низкокипящем рабочем теле с воздушными конденсаторами, с дальнейшей наладкой выпуска оборудования на одном из российских заводов путем приобретения лицензии. Успешная реализация этого проекта, кроме выработки электроэнергии, позволит обеспечить промышленность РД заказами на изготовление оборудования.

В дальнейшем при освоении технологии поддержания пластового давления для паровых коллекторов общая мощность ГеоТЭС в Дагестане может достичь 1000 МВт с годовой выработкой 6 млрд. кВтч электроэнергии.

Выводы

1. В Дагестане в связи с истощением разведанных запасов нефти и газа сложились благоприятные условия для развития геотермальной энергетики на базе повторного использования выработанных нефтегазовых скважин.

2. На этой основе к 2030 году можно осуществить ввод в эксплуатацию не менее 300 МВт электрических мощностей и выработать 1,7 млрд. кВтч электроэнергии.

3. При современных ценах на топливо и энергию ГеоТЭС по удельным капиталовложениям будут сопоставимы с топливными электростанциями, а по себестоимости электроэнергии и экологической чистоте – превосходить их.

4. На разведанных месторождениях термальных вод возможно создание систем геотермального теплоснабжения с экономией природного газа до 300 млн. м³ в год.

Библиографический список

1. Алхасов А.Б., Алхасова Д.А., Алиев Р.М., Рамазанов А.Ш. Комплексное освоение геотермальных ресурсов // Юг России: экология, развитие. 2016. Т. 11. № 1. С. 149-158.
2. Alkhasov A.B., Aliyev R.M., Ramazanov M.M., Abasov G.M. Study of complex heat exchange with account for phase transitions in secondary contour of the geothermal power plant // Renewable Energy. 2000. Т. 19. № 1-2. С. 155-161.
3. Алхасов А.Б., Алиев Р.М., Бадавов Г.Б., Чернявский А.А. Возможности использования возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан // В сб.: Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы. актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов: материалы IV Международной конференции. 2015. С. 78-90.
4. Alkhasov A.B., Aliyev R.M., Magomedbekov Kh.G. Prospects of two-contour geothermal power plant construction // Renewable Energy. 1997. Т. 10. № 2. С. 363-366.
5. Feder J. Geothermal well construction: a step change in oil and gas technologies / JPT. 2021. V. 73. Issue 1. P. 3.
6. Elders W.A. and Fridleifsson G.O. The Iceland Deep Drilling Project – Scientific Opportunities. Proceedings, World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24 – 29 April 2005.
7. Fridleifsson G.O., Elders W.A., Thorhallsson S., and Albertsson A. The Iceland Deep Drilling Project – A Search for Unconventional (Supercritical) Geothermal Resources (www.os/wgc2005).
8. Бутузов В.А., Алхасов А.Б., Алиев Р.М., Бадавов Г.Б. Геотермальное теплоснабжение Дагестана // Энергосбережение и водоподготовка. 2020. № 4 (126). С.30-41.
9. Абдрахманов А.А., Алиев Р.М., Васильев В.А., Бадавов Г.Б. // В сб.: GEOENERGY: материалы II международной научно-практической конференции. Грозный, ГГНТУ. - Махачкала: АЛЕФ, 2016. С. 88-100.

References

1. Alhasov A.B., Alhasova D.A., Aliev R.M., Ramazanov A.SH. Kompleksnoe osvoenie geotermal'nyh resursov // YUg Rossii: ekologiya, razvitie. 2016. V. 11. N 1. P. 149-158.
2. Alkhasov A.B., Aliyev R.M., Ramazanov M.M., Abasov G.M. Study of complex heat exchange with account for phase transitions in secondary contour of the geothermal power plant // Renewable Energy. 2000. V. 19. N 1-2. P. 155-161.
3. Alhasov A.B., Aliev R.M., Badavov G.B., CHernyavskij A.A. Vozmozhnosti ispol'zovaniya vozobnovlyaemyh istochnikov energii v Respublike Dagestan // V sb.: Vozobnovlyaemaya energetika: problemy i perspektivy. aktual'nye problemy osvoeniya vozobnovlyaemyh energoresursov: materialy IV Mezhdunarodnoj konferencii. 2015. P. 78-90.
4. Alkhasov A.B., Aliyev R.M., Magomedbekov Kh.G. Prospects of two-contour geothermal power plant construction // Renewable Energy. 1997. V. 10. N 2. P. 363-366.
5. Feder J. Geothermal well construction: a step change in oil and gas technologies / JPT. 2021. V. 73. Issue 1. P. 3.
6. Elders W.A. and Fridleifsson G.O. The Iceland Deep Drilling Project – Scientific Opportunities. Proceedings, World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24 – 29 April 2005.

7. Fridleifsson G.O., Elders W.A., Thorhallsson S., and Albertsson A. The Iceland Deep Drilling Project – A Search for Unconventional (Supercritical) Geothermal Resources (www.os/wgc2005).

8. Butuzov V.A., Alhasov A.B., Aliev R.M., Badavov G.B. Geotermal'noe teplo-snabzhenie Dagestana // Energoberezhenie i vodopodgotovka. 2020. N 4 (126). P. 30-41.

9. Abdrahmanov A.A., Aliev R.M., Vasil'ev V.A., Badavov G.B. // V sb.: GEOENERGY: materialy II mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Groz-nyj, GGNTU. - Mahachkala: ALEF, 2016. P. 88-100.

Статья поступила 04.10.2020 г.

© А.М. Байрамов, Р.М. Алиев, Ш.М. Курбанов, 2021

Сведения об авторах
List of Authors

Байрамов Адиль Муршудович – кандидат технических наук, руководитель отдела исследований и проектирования компании «Noblika» (Verkis).

Adil Bayramov – Candidate of Technical Sciences, Head of Research and Design Department, Noblika (Verkis).

Алиев Расул Магомедович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой бурения нефтяных и газовых скважин Дагестанского государственного технического университета.

Rasul Aliev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Oil and Gas Well Drilling, Daghestan State Technical University.

Курбанов Шамиль Магомедрасулович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры бурения нефтяных и газовых скважин Дагестанского государственного технического университета.

Shamil Kurbanov – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Drilling Oil and Gas Wells, Daghestan State Technical University.

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫХ ЗАПАСОВ НЕФТИ

Г.Г. Гусейнов

Институт физики имени Х.И. Амирханова
Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала
guseinovgg@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены перспективы извлечения остаточных трудно-извлекаемых запасов нефти на основе исследования и регулирования его свойств как в свободном состоянии, так и в пористой среде. Предложено применить новые подходы, базирующиеся на использовании фазовых переходов второго рода, для извлечения остаточной нефти. Показано, что перспективным материалом, пригодным для проведения экстракции нефти, является диоксид углерода, находящийся в критическом и сверхкритическом состоянии. Изучено влияние диоксида углерода на свойства нефти, горную породу и процессы экстракции нефти из пласта.

Abstract. Prospects for extracting residual hard-to-recover oil reserves on the basis of research and regulation of its properties both in a free state and in a porous medium are considered. It is proposed to apply new approaches based on the use of phase transitions of the second kind for the recovery of residual oil. It has been shown that a promising material suitable for oil extraction is carbon dioxide, which is in a critical and supercritical state. The influence of carbon dioxide on the properties of oil, rocks and the processes of oil extraction from the reservoir has been studied.

Ключевые слова: нефть, фазовый переход, критическое состояние, экстракция, диоксид углерода.

Keywords: oil, phase transition, critical state, extraction, carbon dioxide.

Введение

Нынешняя деятельность нефтяных компаний на территории России осложнена огромными технологическими проблемами, поскольку после извлечения первичной нефти в нефтеносных пластах в среднем остается до 75% всей нефти месторождений [1-5]. Это категория трудноизвлекаемых запасов нефти, к которым относят высоковязкие нефти и нефти в низкопроницаемых

пластах. Увеличить извлекаемые запасы нефти, снизить обводненность продукции, повысить или стабилизировать добычу на этой стадии – задача народнохозяйственной важности.

Работы, проводимые в этом направлении, можно назвать интенсификацией добычи нефти на поздней, третьей стадии ее разработки, связанной с проблемой остаточной трудноизвлекаемой высоковязкой нефти. Иссле-

дования в этом направлении ведутся давно [6, 7, 8], но проблема извлечения остаточных запасов нефти остается нерешенной. Поэтому актуально использование новых технологий для нефтеизвлечения.

В частности, для повышения нефтеотдачи пластов актуальны исследования фазовых переходов второго рода в широкой окрестности критических точек «жидкость – газ» и «жидкость – жидкость», где поверхностное натяжение σ становится минимальным или обращается в нуль, то есть исчезает в критических точках двухфазного или трехфазного равновесия [9,10]. В области критических и сверхкритических состояний вещества исчезает разница в свойствах сосуществующих фаз, выявляется общность фазового перехода «жидкость – жидкость» и критической точки «жидкость – газ». Вещества в области фазовых переходов второго рода обладают высокой растворяющей способностью, это можно применить для извлечения остаточной нефти из пластов.

Для экстракции нефти предлагается использовать вещества, находящиеся в критическом и сверхкритическом состоянии – сверхкритические флюиды (СКФ), наиболее перспективным из которых является диоксид углерода (CO_2), а также бинарные и многокомпонентные смеси, имеющие критические температуры растворимости.

Возникла потребность в фундаментальных и прикладных исследованиях проблем увеличения нефтеотдачи для категории трудноизвлекаемой нефти.

Материалы и методы исследования

Рассмотрим высоковязкую нефть, вещества и методы, позволяющие ре-

гулировать ее основные свойства, которые ответственны за фильтрацию нефти в пласте.

По принятой классификации, к категории высоковязкой нефти принято относить нефть с вязкостью 30 мПа·с или 35 мм²/с и выше [3].

Запасы такой нефти огромны и значительно превышают запасы легкой и маловязкой нефти. По оценкам ведущих мировых специалистов нефтяной промышленности они составляют не менее 1 трлн. т. Это большая копилка, способная обеспечить дополнительный приток нефти при разработке месторождений высоковязкой нефти.

Скорее всего, в XXI веке активно будут заниматься разработкой новых критических технологий извлечения такой категории нефти, к этому подталкивает уменьшение запасов традиционной маловязкой нефти по всему миру.

Нефть Тимано-Печорского бассейна России обладает вязкостью, превышающей 35 мм²/с, а наибольшее количество высоковязкой нефти приходится на Пермскую область (31%), Татарстан (12,8%), Самарскую область (9,7%), Башкортостан (8,6%) и Тюменскую область (8,3%) [4, 5]. Высоковязкой нефтью богат и регион Западной Сибири. Нефть этих месторождений сосредоточена в следующих отложениях:

- доманиковская свита (мощность 15–70 м., возраст – верхний девон);
- баженовская свита (суммарные ресурсы нефти в породах свиты около 163,6 млрд. т, технически извлекаемые – 9,8 млрд. т.);
- куонамская свита (ресурсы нефти свиты составляют от 700 млн. т. до 3000 млн. т.);

- сверхвязкая нефть Волго-Уральского региона (ресурсы нефти составляют от 1,4 до 7,5 млрд. т., глубины залегания залежей – от 50 до 400 м).

При разработке месторождений высоковязкой нефти необходим постоянный контроль вязкости. Этот параметр является основным в законах фильтрации флюида в пласте, его надо определять и регулировать при транспортировке нефти по трубопроводам. Одним из методов регулирования вязкости является ультразвуковая обработка, влияющая на структурно-механические свойства нефти. Так, в работе [11] исследована высокопарафинистая и высокосмолистая нефть месторождений Западной Сибири, относящаяся к категории неньютоновских жидкостей.

Проведенные исследования показывают, что ультразвуковая обработка высокопарафинистой нефти приводит к значительному увеличению вязкости, повышению температуры застывания и росту количества асфальтосмолопарафиновых отложений при увеличении времени обработки, а удельная энергия разрушения надмолекулярной структу-

ры нефти носит экстремальный характер. В обработанной нефти наблюдается разрушение межмолекулярных связей в акустическом поле.

Структурно-механические параметры парафинистой нефти с высоким содержанием смолисто-асфальтеновых компонентов существенно улучшаются после ультразвуковой обработки. Энергия активации вязкого течения и удельная энергия разрушения дисперсной системы после 8 мин воздействия снижаются в 7,5 и 2,2 раза, соответственно.

Исследования зависимости вязкости высоковязкой нефти Печерского месторождения от температуры показали ее аномально высокую вязкость: динамическая вязкость при 50°C составляла 502343 мПа·с, а при 110°C уменьшалась с 502343 мПа·с до 2000 мПа·с [12].

В данной работе для регулирования свойств флюида в пласте предлагается применить диоксид углерода (CO₂), фазовая диаграмма состояния которого в координатах «давление – температура» (P – T) показана на рисунке 1.

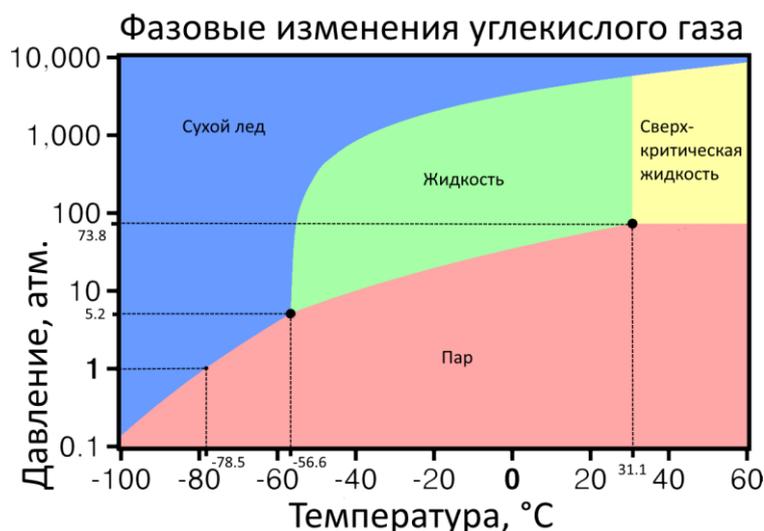


Рисунок 1 – Фазовая диаграмма диоксида углерода с указанием линий фазовых равновесий, областей сосуществоющих фаз и сверхкритической области

На рисунке 1 показаны особые точки CO_2 : тройная точка, критическая точка с критической температурой ($T_{\text{кр}}$), равной 304,25 K, критическим давлением ($P_{\text{кр}}$), равным 7,38 МПа, критическим объемом ($V_{\text{кр}}$) областей существования газовой, жидкой и твердой фаз. Из графика видно, что CO_2 обладает низкими критическими параметрами, что можно использовать для интенсификации нефтедобычи.

Критическая точка соответствует критическому состоянию вещества, при котором исчезает различие между физическими свойствами равновесно сосуществующих фаз. На фазовой диаграмме указана сверхкритическая область, где вещество находится в газовой фазе и является объектом нашего пристального внимания. Эта область рекомендуется для критической экстракции нефти из горных пород.

В отличие от CO_2 , вода имеет высокие критические параметры: критическую температуру ($T_{\text{кр}}$), равную 647 K, критическое давление ($P_{\text{кр}}$), равное 22 Мпа. Фазовые диаграммы двух и многокомпонентных систем имеют сложный характер, примером тому является фа-

зовая диаграмма нефти с участием CO_2 .

В литературе имеются данные по исследованию свойств в широкой окрестности критической точки CO_2 : изотермической сжимаемости, изобарной и изохорной теплоемкостей, скорости звука, теплопроводности, температуропроводности, динамической вязкости, интенсивности рассеянного света вблизи критической области в зависимости от температуры, плотности и давления. Эти исследования показывают, что в критической области наблюдаются аномалии поведения всех свойств диоксида углерода, находящегося как в свободном состоянии, так и в пористой среде. Так, например, межфазное натяжение в критической области становится минимальной, уменьшается вплоть до нуля.

Проведенные автором [13,14] исследования эффективной теплопроводности пористого стекла, насыщенного CO_2 , с размерами пор 16 мкм и пористостью 40%, показали, что в критической области наблюдается максимум – аномалия теплопроводности, даже внутри пористого стекла (рисунок 2).

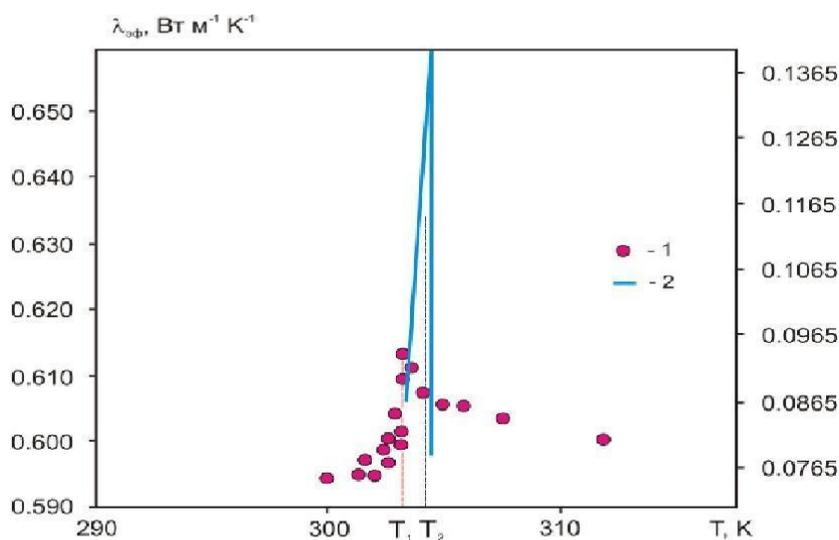


Рисунок 2 – Эффективная теплопроводность пористого стекла, насыщенного диоксидом углерода, в широкой окрестности критической точки [13]

Из приведенного графика видно, что CO_2 проявляет себя весьма аномальным образом в окрестности фазового перехода второго рода, а именно, в критической точке «жидкость – газ», и имеет максимум теплопроводности. Амплитуда максимума теплопроводности для пористого стекла, насыщенного CO_2 , меньше, чем для CO_2 в свободном состоянии (сплошная кривая), но в то же время, проявляется в более широком интервале температур.

В работе [13] сделаны выводы о влиянии состояния поверхности и удельной поверхности пористого стекла на поведение CO_2 , в связи с чем и наблюдается аномальное поведение эффективной теплопроводности, такое же влияние должно наблюдаться и по другим свойствам.

Перспективы применения CO_2 для увеличения нефтеотдачи, изучены в работах [15-20]. Каждый из исследователей ставил свою задачу, имел свои цели изучения фазового поведения CO_2 , для извлечения пластовой нефти. По имеющимся в литературе материалам, закачка в пласт CO_2 , азота и некоторых других, не содержащих углеводородов газовых систем, содействует добыче остаточной нефти. В ряде случаев применение этих веществ рассматривается как один из наиболее перспективных способов добычи вторичной нефти [21, 22].

В практике нефтедобычи с помощью CO_2 и других газов могут быть с надлежащим эффектом реализованы следующие принципы добычи нефти:

- CO_2 взаимодействуя с нефтью, образует две фазы, что приводит к уменьшению ее вязкости;

- CO_2 , находящаяся выше критической точки «жидкость – газ», образует с нефтью однородную систему, обеспечивая извлечение нефти из пласта;

- CO_2 с другими системами и нефтью могут образовать критические явления высшего порядка, при этом достигается полная смешиваемость, и оптимальные условия извлечения нефти из пор пласта.

Для практического использования CO_2 , необходимо выявить ее ресурсы и количество. В США имеются крупные месторождения природного диоксида углерода с запасами более 1 трлн. м^3 . Поэтому там с успехом применяют технологию закачки CO_2 [23].

Отсутствие в России промышленности добычи CO_2 сдерживает применение его как реагента для третичного метода повышения нефтеотдачи. Наличие огромных трудноизвлекаемых запасов нефти требует тогда хотя бы закачки CO_2 в пласт в режиме смешивания с другими компонентами. В России же на 2015 год числилось четыре месторождения с запасами CO_2 , равными 601,6 млрд. м^3 при средней концентрации CO_2 – 13,9%. При этом 99,1% запасов сосредоточено в Астраханской области [25].

Критические технологии экстракции нефти, с применением диоксида углерода

Для экстракции трудноизвлекаемых запасов нефти актуально применение новых уникальных технологий. К ним относится использование реагентов, находящихся в широкой окрестности критических точек «жидкость – газ», «жидкость – жидкость» (верхняя критическая температура растворимости,

нижняя критическая температура растворимости, двойная критическая температура растворимости).

В настоящее время проявляется особый интерес к глубокозалегающим углеводородным залежам нефти, которые в реальных условиях пласта находятся в критическом и сверхкритическом состояниях. Для решения прикладных задач извлечения остаточной нефти из пластов необходимо изучать свойства углеводородов, их смесей, пластовых флюидов и реагентов, планируемых использовать для закачки в пласт и извлечения остаточной нефти.

Кроме того, надо знать процессы фазовых превращений систем пластовых углеводородов и флюидов, которые участвуют во всех процессах и ответственны за физические явления, присутствующие процессам извлечения, разработки и эксплуатации продуктивного пласта.

Изучение термодинамики поведения вещества показывает, что в области фазовых переходов второго рода: критической точке «жидкость – газ», критических точках растворимости – «жидкость – жидкость» и их окрестностях наблюдаются резкие аномалии как термодинамических, так и транспортных свойств в однокомпонентных, бинарных и многокомпонентных системах. Если же эти вещества составляют компоненты флюидов внутри пористых сред горных пород, то резкое изменение свойств вещества в области фазовых переходов второго рода может привести к увеличению интенсивности течения флюида от нефтяного пласта к скважине, т.е. увеличить приток нефти.

Причиной такого поведения флюида в пористой среде при реализации

критических параметров является резкое уменьшение межфазного натяжения у границы раздела фаз «жидкость – газ» или «жидкость – жидкость», выравнивание плотностей газа и жидкости при приближении к критическим точкам.

Эти изменения можно описать степенными законами, соответственно, как для межфазного натяжения, так и для разности плотностей газа и сосуществующей с ней жидкости:

$$\sigma = \sigma_0 t^\mu$$

$$\Delta\rho = B_0 t^\beta$$

где σ_0 , B_0 – критические амплитуды не-универсальные, характеризующие систему; $\Delta\rho = (\rho - \rho_c) / \rho_c$ – приведенная относительная плотность; ρ , ρ_c – абсолютная плотность и плотность критического состояния, соответственно; $t = (T - T_c)/T_c$ – приведенная относительная температура; T – температура; T_c – критическая температура; $\mu = 1,26$; $\beta = 0,325$ – универсальные критические не-классические показатели [26].

Внутрипластовое течение очень сильно зависит от межфазного натяжения, поэтому для растворения и интенсификации извлечения нефти из пластов необходимо управлять межфазным натяжением. Немаловажное значение в процессах интенсификации нефтеотдачи имеет явление смачиваемости. Надо отметить, что если в пористой среде (горной породе) в контакте находятся два нерастворяющиеся вещества, такие, как нефть и вода, то при достижении критического состояния, происходит полная смачиваемость компонентами несмешивающихся жидкостей стенки пор горной породы.

Контактный угол θ определяется межфазными силами взаимодействия в системе «нефть – вода»:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{mv} - \sigma_{mn}}{\sigma_{mv}} \quad (1)$$

где σ_{mv} , σ_{mn} , σ_{nv} – межфазное натяжение между горной породой и водой внутри пор, горной породой и нефтью внутри пор, нефтью и водой, соответственно.

Если система подходит к критической точке T_c , то межфазные натяжения примут соответствующий вид: $\sigma_{mv} - \sigma_{mn} \sim t^{0,26}$ и $\sigma_{nv} \sim t^{1,26}$.

С учетом этого, формула (1) будет иметь вид: $\cos \theta \sim t^{-1}$.

Следовательно, при приближении к критической точке $\cos \theta = 1$ можно заметить достижение полного смачивания. Поверхностное натяжение σ при этом исчезает в критических точках двухфазного или трехфазного равновесия.

В критическом состоянии вещество, в частности, CO_2 обладает удивительной растворяющей способностью. Диоксид углерода не токсичен, не ядовит и доступен, что является еще одним доводом его применения для экстракции трудноизвлекаемой нефти из пластов.

Имеются исследования [27] по изучению влияния различных реагентов: CO_2 , аргона и воды на железные стружки, имитирующие горные породы. В данном случае железо ведет себя как катализатор, и может быть в дальнейшем использовано в качестве рабочего агента. При исследованиях сланцевых пород, насыщенных смесью «вода + диоксид углерода» и смесью «вода + диоксид углерода + железные стружки», получены интересные результаты (рисунок 3).

Видно, что интенсивность роста давления в первом случае (линия 1) более интенсивнее, чем во втором (линия 2).

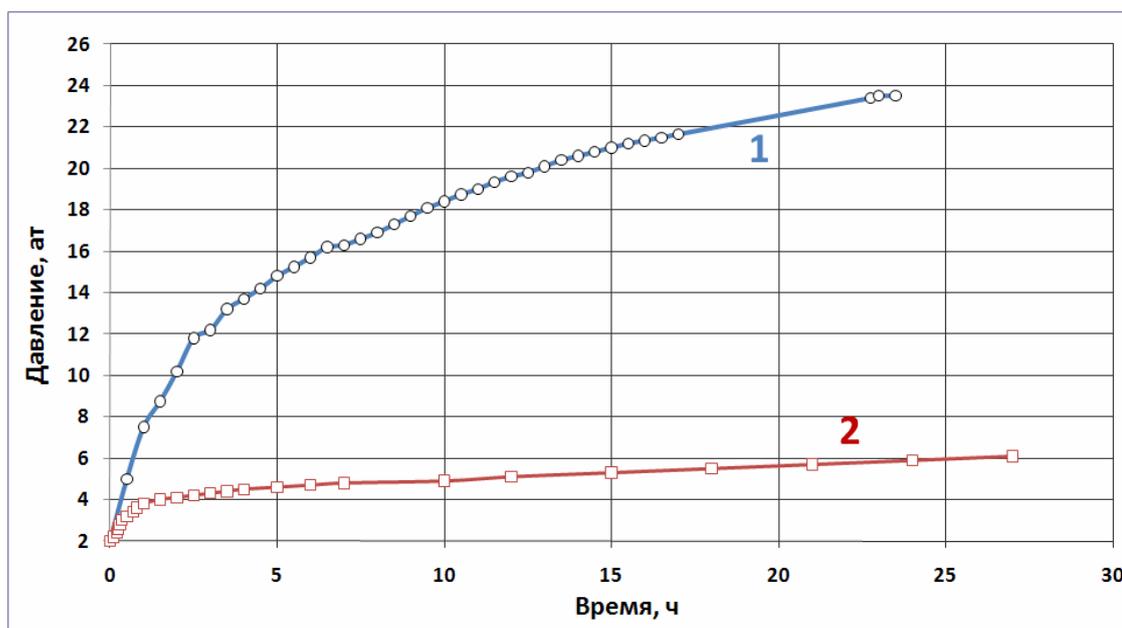


Рисунок 4. Изменение давление во времени в реакторе, при наличии измельченного сланца, и железных стружек: 1- стружки железные, насыщенные смесью вода + диоксид углерода; 2 – молотая сланцевая порода, насыщенная смесью вода + диоксид углерода [27].

Авторы делают вывод, что при разработке нефтяных месторождений для извлечения остаточной нефти предпочтительно использование CO_2 в качестве рабочего агента при наличии железных катализаторов.

Примеры практического применения как чистого CO_2 , так и других газов для интенсификации нефтеотдачи рассмотрены и изучены в работах [15-20, 28, 35, 38, 39].

Одним из основных вопросов является взаимодействие CO_2 в системе «горная порода – нефть – диоксид углерода». За счет взаимодействия нефти и газа в продуктивном пласте наблюдается растворение газа в нефти, заметны фазовые превращения компонентов нефти в газ, резкое изменение объема нефти (процессы набухания), резкое уменьшение межфазного натяжения в системе «нефть-газ», процессы изменения коэффициента проницаемости флюида в орную породу. Кроме того, наблюдаются изменения избирательной смачиваемости, а также коэффициента пористости горной породы.

Наблюдаются также процессы отложения высокомолекулярных компонентов нефти (асфальтенов) на поверхности горной породы и скважины. В процессе извлечения нефти наблюдается резкое уменьшение вязкости пластовой нефти при растворении в ней газа. Величина уменьшения зависит от свойств применяемых газовых реагентов, а также от состава самой пластовой нефти [28].

В практике извлечения нефти из пластов обнаружено, что применение

CO_2 в пакете со сжиженным газом резко меняет параметры нефти, что приводит к снижению вязкости. Исследования показывают, что чем больше вязкость, тем более эффективно применение сверхкритического CO_2 для снижения вязкости нефти. В работе [29] установлено резкое снижение относительной вязкости (μ/μ_0) нефти от количества растворенного в ней CO_2 при $32^\circ C$ и постоянном давлении. Если при регулировании параметров наблюдается уменьшение вязкости пластовой нефти, то это приводит к росту ее относительной проницаемости [30].

При растворении CO_2 в нефти наблюдается набухание нефти и увеличение ее объема, что стимулирует процессы ее извлечения из пластов. Имеются данные о резкой степени набухания нефти при растворении в ней CO_2 , метана, пропана и этана [31].

Процессы, приводящие к набуханию нефти, являются существенными в процессах увеличения коэффициента ее извлечения и остаточной нефтенасыщенности в пласте. На процессы вытеснения нефти из пластов оказывает влияние изменение межфазного натяжения в нефти и конденсате под влиянием растворенного CO_2 (рисунок 4).

Обнаружено, что межфазное натяжение регулируется капиллярными силами, которые ответственны за движение флюидов в пористых горных породах. Резкое снижение межфазного натяжения играет решающую роль как при фильтрации нефти по пласту, так и при закачке газа в нефтеносный пласт. Наличие растворенных газов в нефти приводит к уменьшению межфазного

натяжения на границе раздела «нефть-газ». Влияние азота на межфазное натяжение и ее регулирование температурой, давлением и составом исследовалось в работе [33].

На практике для разработки высоковязких нефтей с содержанием асфальтенов наиболее эффективным газом признан CO_2 [34, 35]. При образовании больших отложений асфальтенов ухудшаются фильтрационно-коллекторские свойства продуктивного пласта, что приводит к заметному снижению пористости и проницаемости нефтесодержащего пласта, низкому дебиту нефти.

В работах [36, 37] рассмотрены процессы вытеснения нефти разной вязкости сверхкритическим диоксидом

углерода при варьировании температуры и давления. Показано, что повышение температуры не всегда ведет к увеличению нефтеотдачи, а рост давления нагнетания CO_2 приводит к увеличению времени до возникновения прорыва газа с последующим увеличением коэффициента вытеснения нефти. Коэффициент вытеснения нефти ниже для нефти высокой вязкости и выше – для маловязкой нефти.

Сказанное приводит к улучшению отношения подвижностей вытесняющего и вытесняемого агентов, и в этом случае наблюдается довольно значительный рост коэффициента извлечения нефти из продуктивного пласта.

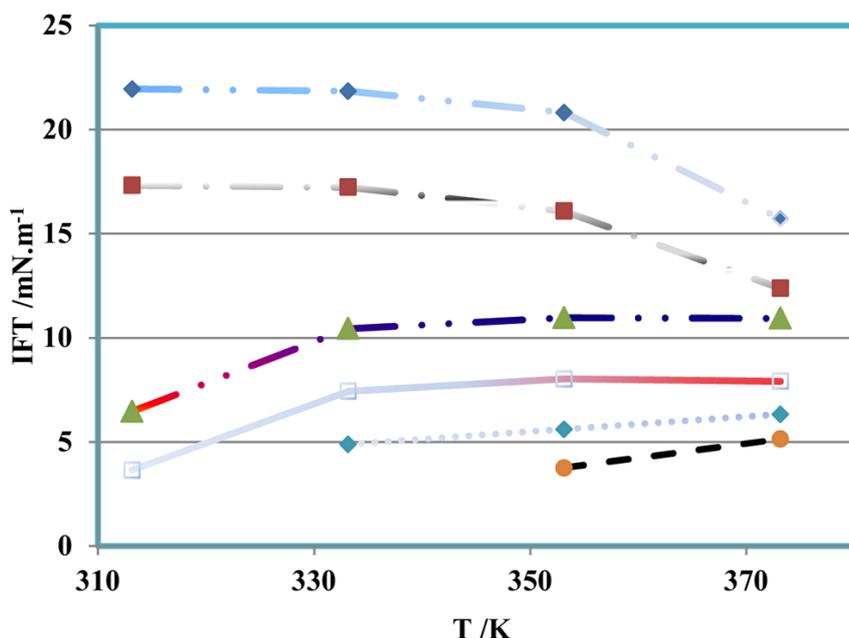


Рисунок 4 – Барическая зависимость межфазного натяжения в нефти (а), и в конденсате от создаваемого давления в CO_2 , при изменении температуры [32]

Заключение

Таким образом, необходимы инновационные технологии нефтедобычи, увеличивающие коэффициент извлечения нефти. Закачка в нефтесодержащий пласт CO_2 после заводнения способствует снижению вязкости нефти

и улучшению ее фильтрации в пласте. Извлекаемость возрастает до 20%, что экономически эффективно. Свойства CO_2 можно реализовать при глубине залегания пласта более 700 м и температуре более 31°C. Для дополнительного получения 1 т нефти

необходимо около 1000 м³ чистого CO₂, что требует больших запасов CO₂, чем имеется сегодня в России. В стране имеются малочисленные примеры применения CO₂ для увеличения нефтеотдачи в региональном масштабе, что явно недостаточно сегодня [38]. В реальных условиях разработка нефтяного месторождения, содержащего трудноизвлекаемые запасы нефти, должна вестись умело, с подобранными в ходе научных исследований реагентами для закачки в пласт, со знанием фазового поведения вещества, регулированием значений параметров для сведения флюида, находящегося внутри пор, к критическому состоянию фазового перехода второго рода. В статье

предложен новый способ извлечения нефти из пластов на основе применения критического и сверхкритического состояния вещества.

Исследования показали, что для извлечения высоковязких запасов нефти, нужно регулировать вязкость, межфазное натяжение и смачиваемость флюида в горной породе. Удобным инструментом для этого служит использование фазовых переходов второго рода: «жидкость – газ», «жидкость – жидкость». Оптимальным реагентом для извлечения нефти является CO₂, имеющий низкие критические параметры, позволяющие получить высокий коэффициент извлечения нефти.

Библиографический список

1. Лаверов Н.П. Топливо-энергетические ресурсы // Вестник РАН. 2006. Т. 76. № 5. С. 398-408.
2. Байбаков Н.К. Эффективные методы повышения нефте- и конденсатоотдачи пластов // РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. Сер. Академические чтения. Вып 12. - М.: Нефть и газ, 1997. – 35 с.
3. Назьев В. Остаточные, но не второстепенные // Нефтегазовая вертикаль. 2000. № 3. С. 21– 25.
4. Полищук Ю.М., Яценко И.Г. Высоковязкие нефти: анализ пространственных и временных изменений физико-химических свойств // Нефтегазовое дело. 2005. № 1. С. 53
5. Макаревич В.Н., Искрицкая Н.И., Богословский С.А. Ресурсный потенциал месторождений тяжелых нефтей европейской части Российской Федерации // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2012. Т. 7. № 3. С. 45 – 51.
6. Методы извлечения остаточной нефти / М.Л. Сургучев, А.Т. Горбунов, Д.П. Забродин и др. - М.: Недра, 1991. - 347 с.
7. О комплексной системе разработки трудноизвлекаемых запасов нефти / Р.Х. Муслимов, Р.Г. Галеев, Э.И. Сулейманов и др. // Нефтяное хозяйство. 1995. № 42. С. 26-34.
8. Галеев Р.Г. Повышение выработки трудноизвлекаемых запасов углеводородного сырья. - М.: КУГК-р, 1997. - 351 с.
9. Ма Ш.К. Современная теория критических явлений. - М.: Мир, 1980. - 289 с.
10. Анисимов М.А. Критические явления в жидкостях и жидких кристаллах. - М.: Наука, 1987. - 271 с.
11. Ануфриев Р.В., Волкова Г.И. Влияние ультразвука на структурно-механические свойства нефтей и процесс осадкообразования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 10. С. 50-58.

12. Фарманзаде А.Р., Карпунин Н.А., Хромых Л.Н., Евсенкова А.О., Аль-Гоби Г. Исследование реологических свойств высоковязкой нефти Печорского месторождения // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 3 (45). Ч. 2. С.116-119.
13. Гусейнов Г.Г. Особенности поведения теплопроводности диоксида углерода в пористом стекле в широкой окрестности критической точки // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 23. С.125-131.
14. Гусейнов Г.Г. Экспериментальное исследование максимумов теплопроводности пористого стекла, насыщенного диоксидом углерода // Известия Самарского НЦ РАН. 2009. Т.11. № 5 (2). С. 390-393.
15. Simon R., Rosman A., Zana E. Phase behavior properties of CO₂ - reservoir oil systems. // Soc. Petrol. Eng. J., 1978, Febr., 20 - 26.
16. Metcalf R. S., Jarborough L. The effect of phase equilibrium on the CO₂ displacement mechanism. // Soc. Petrol. Eng. J., 1979, Aug., 242 - 252.
17. Yellig W. F., Metcalf R. S. Determination and prediction of CO₂ minimum miscibility pressures. // J. Petrol. Technol., 1980, Jan., 160 - 168.
18. Вытеснение из пористой среды рассеянного углеводородного конденсата газообразным диоксидом углерода / А.Ю. Намиот, Т.Л. Ненартович, М.А. Пешкин, Р.М. Тер-Саркисов // Тр. ин-та ВНИИнефть. 1986. Вып. 97. С. 33-38.
19. Ненартович Т.Л. Фазовые равновесия двуокиси углерода с углеводородами и их влияние на вытеснение нефти: автореф. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. - М., 1991.- 27 с.
20. Successful CO₂ sequestration and enhanced oil recovery project heads into phase II // Environmental News Link 2005.
21. Бабалян Г.А., Тумасян А.Б., Пантелеев В.Г. и др. Применение карбонизированной воды для увеличения нефтеотдачи. М., 1976.
22. Shelton J. L. Multiple phase behavior in porous media during CO₂ or rich-gas flooding. — J. Petrol. Technol., 1977, 29, Sept., 1171 - 1178.
23. De Bruin R.H. Wyoming's carbon dioxide resources. Open File Report. 91 – 6, Geological Survey of Wyoming. – 1991. – 20 p.
24. Dipietro P., Balash P., Wallance M. A note on Sources of CO₂ Supply for EOR operations, SPE Economics and Management. – 04/2012.
25. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Азот. Углекислый газ. - М., 2015. Вып. 88. – 77 с.
26. Абдулагатов И.М. и др. Применение сверхкритических флюидов в различных экстракционных процессах // ТВТ. 1994. Т. 32. Вып 2. С. 299 - 308.
27. Климов Д.С. Экспериментальные исследования физико-химических явлений при участии CO₂ в фильтрационных и обменных процессах: автореф. дисс. к.т.н.. - М., 2015. – 28 с.
28. Norman P. Freitag and Brian J. Kristoff. Comparison of Carbon Dioxide and Methane as Additives at Steamflood Conditions. // SPE Journal. 1998. Vol. 3. №. 01. PP. 14-18.
29. F. M. Orr, Jr., J. P. Heller and J. J. Taber. Carbon dioxide flooding for enhanced oil recovery: Promise and problems // Journal of the American Oil Chemists Society. 1982. Vol. 59. №. 10. PP. 810A-817A.
30. E.Ghoodjani and S.H. Bolouri. Experimental Study of CO₂ - EOR and N₂ – EOR with Focus on Relative Permeability Effect // J.Pet. Environ Biotechnol. 2011. Vol. 2. N 1, P. 1-5.

31. Chaodong Yang and Yongan Gu. Diffusion coefficients and oil swelling factors of carbon dioxide, methane, ethane, propane, and their mixtures in heavy oil // *Fluid Phase Equilibria*. 2006. Vol. 243. №. 1-2. PP. 64-73.
32. Daoyong Yang and Yongan Gu. Interfacial Interactions Between Crude Oil and CO₂ Under Reservoir Conditions // *Petroleum Science and Technology*. 2005. Vol. 23. №. 9-10. PP. 1099-1112.
33. Abdolhossein Hemmati-Sarapardeh, Shahab Ayatollahi, Ali Zolghadr, Mohammad-Hossein Ghazanfari and Mohsen Masihi. Experimental Determination of Equilibrium Interfacial Tension for Nitrogen-Crude Oil during the Gas Injection Process: The Role of Temperature, Pressure, and Composition // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2014. Vol. 59. №. 11. PP. 3461-3469.
34. Amir Masoud Kalantari-Dahaghi, Vida Gholami, Jamshid Moghadasi and R. Abdi. Formation Damage Through Asphaltene Precipitation Resulting From CO₂ Gas Injection in Iranian Carbonate Reservoirs // *SPE Production & Operations*. 2008. Vol. 23. №. 02. PP. 210-214.
35. Сабирзянов А.Н., Гумеров Ф.М., Габитов Ф.Р. Суб- и сверхкритические флюиды в процессах нефте- и битумодобычи // *Повышение нефтеотдачи пластов: материалы 12 Европейского симпозиума*. - Казань, 2003. С. 133.
36. Радаев А.В. Влияние термобарических условий в однородном пласте на вытеснение маловязкой нефти сверхкритическим диоксидом углерода // *Сверхкритические флюиды: теория и практика*. 2009. Т.4. № 3. С.7–15.
37. Радаев А.В. Вытеснение высоковязкой нефти сверхкритическим CO₂ в широком интервале термобарических условий // *Нефтяное хозяйство*. 2010. № 2. С. 2-3.
38. Колокольцев С.Н. Направления применения диоксида углерода Центрально-астраханского газоконденсатного месторождения // *Геология, география и глобальная энергетика*. 2016. № 2 (61). С. 47-54.

References

1. Laverov N.P. Toplivno-energeticheskie resursy // *Vestnik RAN*. 2006. Т. 76. № 5. С. 398-408.
2. Bajbakov N.K. Effektivnye metody povysheniya nefte- i kondensatootdachi plavstov // *RGU nefi i gaza im. I.M. Gubkina. Ser. Akademicheskie chteniya. Vyp 12*. - M.: Neft' i gaz, 1997. – 35 s.
3. Naz'ev V. Ostatochnye, no ne vtorstepennye // *Neftegazovaya vertikal'*. 2000. № 3. С. 21– 25.
4. Polishchuk YU.M., YAshchenko I.G. Vysokovyazkie nefiti: analiz prostranstvennyh i vremennyh izmenenij fiziko-himicheskikh svojstv // *Neftegazovoe delo*. 2005. № 1. С. 53
5. Makarevich V.N., Iskrickaya N.I., Bogoslovskij S.A. Resursnyj potencial mesto-rozhdenij tyazhelyh neftej evropejskoj chasti Rossijskoj Federacii // *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*. 2012. Т. 7. № 3. С. 45 – 51.
6. Metody izvlecheniya ostatochnoj nefiti / M.L. Surguchev, A.T. Gorbunov, D.P. Zabdin i dr. - M.: Nedra, 1991. - 347 s.
7. O kompleksnoj sisteme razrabotki trudnoizvlekaemyh zapasov nefiti / R.H. Mu-slimov, R.G. Galeev, E.I. Sulejmanov i dr. // *Neftyanoe hozyajstvo*. 1995. № 42. С. 26-34.
8. Galeev R.G. Povyshenie vyrabotki trudnoizvlekaemyh zapasov uglevodородnogo syr'ya. - M.: KUGK-r, 1997. - 351 s.
9. Ma SH.K. Sovremennaya teoriya kriticheskikh yavlenij. - M.: Mir, 1980. - 289 s.

10. Anisimov M.A. Kriticheskie yavleniya v zhidkostyah i zhidkih kristallah. - M.: Nauka, 1987. - 271 s.
11. Anufriev R.V., Volkova G.I. Vliyanie ul'trazvuka na strukturno-mekhanicheskie svoystva neftej i process osadkoobrazovaniya // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2016. T. 327. № 10. S. 50-58.
12. Farmanzade A.R., Karpunin N.A., Hromyh L.N., Evsenkova A.O., Al'-Gobi G. Issledovanie reologicheskikh svoystv vysokovyazkoj nefiti Pechorskogo mestorozhdeniya // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. 2016. № 3 (45). CH. 2. S.116-119.
13. Gusejnov G.G. Osobennosti povedeniya teploprovodnosti dioksida ugleroda v po-ristom stekle v shirokoj okrestnosti kriticheskoy toчки // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2014. T. 17. № 23. S.125-131.
14. Gusejnov G.G. Eksperimental'noe issledovanie maksimumov teploprovodnosti poristogo stekla, nasyshchennogo dioksidom ugleroda // Izvestiya Samarskogo NC RAN. 2009. T.11. № 5 (2). S. 390-393.
15. Simon R., Rosman A., Zana E. Phase behavior properties of CO₂ - reservoir oil systems. // Soc. Petrol. Eng. J., 1978, Febr., 20 - 26.
16. Metsalf R. S., Jarbogough L. The effect of phase equilibrium on the CO₂ displacement mechanism. // Soc. Petrol. Eng. J., 1979, Aug., 242 - 252.
17. Yellig W. F., Metsalf R. S. Determination and prediction of CO₂ minimum miscibility pressures. // J. Petrol. Technol., 1980, Jan., 160 - 168.
18. Vytesnenie iz poristoj sredy rasseyanogo uglevodородного kondensata gazoobraznym dioksidom ugleroda / A.YU. Namiot, T.L. Nenartovich, M.A. Peshkin, R.M. Ter-Sarkisov // Tr. in-ta VNIneft'. 1986. Vyp. 97. S. 33-38.
19. Nenartovich T.L. Fazovye ravnesiya dvoukisi ugleroda s uglevodородami i ih vliyanie na vytesnenie nefiti: avtoref. na soisk. uch. step. kand. tekhn. nauk. - M., 1991.- 27 s.
20. Successful CO₂ sequestration and enhanced oil recovery project heads into phase II // Environmental News Link 2005.
21. Babalyan G.A., Tumasyan A.B., Panteleev V.G. i dr. Primenenie karbonizirovan-noj vody dlya uvelicheniya nefteotdachi. M., 1976.
22. Shelton J. L. Multiple phase behavior in porous media during CO₂ or rich-gas flooding. — J. Petrol. Technol., 1977, 29, Sept., 1171 - 1178.
23. De Bruin R.H. Wyomings carbon dioxide resources. Open File Report. 91 – 6, Geological Survey of Wyoming. – 1991. – 20 p.
24. Dipietro P., Balash P., Wallance M. A note on Sources of CO₂ Supply for EOR operations, SPE Economics and Management. – 04/2012.
25. Gosudarstvennyj balans zaspos poleznyh iskopaemyh Rossijskoj Federacii. Azot. Uglekislyj gaz. - M., 2015. Vyp. 88. – 77 s.
26. Abdulagatov I.M. i dr. Primenenie sverhkriticheskikh flyuidov v razlichnyh ekstrakcionnyh processah // TVT. 1994. T. 32. Vyp 2. S. 299 - 308.
27. Klimov D.S. Eksperimental'nye issledovaniya fiziko-himicheskikh yavlenij pri uchastii CO₂ v filtracionnyh i obmennyh processah: avtoref. diss. k.t.n.. - M., 2015. – 28 s.
28. Norman P. Freitag and Brian J. Kristoff. Comparison of Carbon Dioxide and Methane as Additives at Steamflood Conditions. // SPE Journal. 1998. Vol. 3. № 01. PP. 14-18.
29. F. M. Orr, Jr., J. P. Heller and J. J. Taber. Carbon dioxide flooding for enhanced oil recovery: Promise and problems // Journal of the American Oil Chemists Society. 1982. Vol. 59. № 10. PP. 810A-817A.

30. E.Ghoodjani and S.H. Bolouri. Experimental Study of CO₂ - EOR and N₂ – EOR with Focus on Relative Permeability Effect // J.Pet. Environ Biotechnol. 2011. Vol. 2. N 1, P. 1-5.
31. Chaodong Yang and Yongan Gu. Diffusion coefficients and oil swelling factors of carbon dioxide, methane, ethane, propane, and their mixtures in heavy oil // Fluid Phase Equilibria. 2006. Vol. 243. №. 1-2. PP. 64-73.
32. Daoyong Yang and Yongan Gu. Interfacial Interactions Between Crude Oil and CO₂ Under Reservoir Conditions // Petroleum Science and Technology. 2005. Vol. 23. №. 9-10. PP. 1099-1112.
33. Abdolhossein Hemmati-Sarapardeh, Shahab Ayatollahi, Ali Zolghadr, Mohammad-Hossein Ghazanfari and Mohsen Masihi. Experimental Determination of Equilibrium Interfacial Tension for Nitrogen-Crude Oil during the Gas Injection Process: The Role of Temperature, Pressure, and Composition // Journal of Chemical & Engineering Data. 2014. Vol. 59. №. 11. PP. 3461-3469.
34. Amir Masoud Kalantari-Dahaghi, Vida Gholami, Jamshid Moghadasi and R. Abdi. Formation Damage Through Asphaltene Precipitation Resulting From CO₂ Gas Injection in Iranian Carbonate Reservoirs // SPE Production & Operations. 2008. Vol. 23. №. 02. PP. 210-214.
35. Sabirzyanov A.N., Gumerov F.M., Gabitov F.R. Sub- i sverhkriticheskie flyuidy v proces-sah nefte- i bitumodobychi // Povyshenie nefteotdachi plastov: materialy 12 Evropejskogo simpoziuma. - Kazan', 2003. S. 133.
36. Radaev A.V. Vliyanie termobaricheskikh uslovij v odnorodnom plaste na vytesnenie malovyazkoj nefti sverhkriticheskim dioksidom ugleroda // Sverhkriticheskie flyuidy: teoriya i praktika. 2009. T.4. № 3. S.7–15.
37. Radaev A.V. Vytesnenie vysokovyazkoj nefti sverhkriticheskim CO₂ v shirokom intervale termobaricheskikh uslovij // Neftyanoe hozyajstvo. 2010. № 2. S. 2-3.
38. Kolokol'cev S.N. Napravleniya primeneniya dioksida ugleroda Central'no- astrahanskogo gazokondensatnogo mestorozhdeniya // Geologiya, geografiya i global'naya energetika. 2016. № 2 (61). S. 47-54.

*Статья поступила 12.03.2021 г.
© Г.Г. Гусейнов, 2021*

***Сведения об авторе
List of Author***

*Гусейнов Гасан Гусейнович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории термодинамики жидкостей и критических явлений Института физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского федерального исследовательского центра РАН.
Gasán Guseinov – Candidate of Technical Science, Senior Researcher at the Laboratory of Thermodynamics of Liquids and Critical Phenomena, Institute of Physics of the Daghestan Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences.*

ВЫРАЩИВАНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ СЕЛЕНИДА КАДМИЯ НА ПОДЛОЖКАХ СЛЮДЫ

В.И. Чукита

Приднестровский государственный университет имени Т.Г. Шевченко
Тирасполь
chykita@mail.ru

Аннотация. Проведено исследование условий роста, структуры и морфологии поверхности эпитаксиальных слоев CdSe, выращенных на кристаллически ориентированных (0001) подложках слюды (мусковита). Определены оптимальные условия выращивания химически чистых и кристаллически совершенных эпитаксиальных слоев.

Abstract. The growth conditions, structure and morphology of the surface of epitaxial CdSe layers grown on crystal oriented (0001) mica (muscovite) substrates have been studied. The optimal conditions for growing chemically pure and crystalline perfect epitaxial layers have been determined.

Ключевые слова: морфология поверхности, эпитаксиальный слой, адсорбированный атом, фигура роста, кристаллит, термодинамическое равновесие, текстура, дифрактограмма.

Keywords: surface morphology, epitaxial layer, adsorbed atom, growth figure, crystallite, thermodynamic equilibrium, texture, diffraction pattern.

Введение

Слои селенида кадмия (CdSe) в последние годы привлекают внимание исследователей в связи с созданием нового класса элементов твердотельной оптоэлектроники, которые связаны с научно-техническими разработками позиционно-чувствительных фотоприемников (ПЧФ) [1–3].

В процессе выращивания эпитаксиальных слоев селенид кадмия может кристаллизоваться в структурах двух модификаций: в кубической структуре типа сфалерита [4] и гексагональной типа вюртцита [5]. Кристаллы CdSe, выращенные при высоких температурах, имеют структуру вюртцита. Кубическая фаза CdSe неустойчива и даже

при сравнительно невысокой температуре (130°C) частично переходит в гексагональную модификацию, при температуре выше 700°C она за 18 часов полностью переходит в гексагональную модификацию [6]. С термодинамической точки зрения кристаллы CdSe со структурой вюртцита являются стабильной модификацией, сфалеритная модификация CdSe – нестабильной. Слои соединений CdSe в зависимости от условий выращивания могут содержать любую из этих фаз или их смесь [5].

Использование слоев селенида кадмия для светоприемных элементов ПЧФ стимулируется тем, что CdSe , являясь прямозонным полупроводником $A^{II}B^{VI}$ (ширина зоны у кубического CdSe – $1,73$ эВ, у гексагонального – $1,70$ эВ), обладает высокой чувствительностью к свету в видимой области спектра и наибольшей кратностью фотоотклика среди широкозонных соединений группы $A^{II}B^{VI}$ [7]. При комнатной температуре и освещенности 200 лк она достигает величины порядка 10^3 – 10^4 [8]. Отмеченные достоинства CdSe широко используются в качестве активной среды в микроэлектронике и оптоэлектронике, как для создания фоторезисторов, так и для формирования гетеропереходов в солнечных элементах, фотоэлектрических преобразователях, детекторах радиационного и рентгеновского излучения, элементах памяти и т.д. [9,10]. Однако в настоящее время отсутствуют данные об их применении в качестве основы светоприемных элементов для ПЧФ. Разработка ПЧФ с высокой фоточувствительностью в видимой области спектра и их успешное применение в современной оптоэлектронике требует

выращивания химически чистых и кристаллически совершенных эпитаксиальных слоев с заданными структурными и электрофизическими параметрами. С этой целью представляется перспективным и технически возможным выращивать совершенные эпитаксиальные слои CdSe на кристаллически ориентированных (0001) подложках слюды (мусковита) для светоприемной основы ПЧФ.

Исходя из вышеизложенного, исследование условий роста и выращивание химически чистых, структурно совершенных высокочувствительных эпитаксиальных слоев CdSe с заранее заданными электрофизическими и оптическими свойствами является актуальной научной и прикладной задачей полупроводникового материаловедения.

Методика эксперимента

Слои CdSe получены методом термического испарения в квазизамкнутом объеме на стандартной вакуумной установке УВН-МР-2 в вакууме $\leq 10^{-4}$ Па, при температурах испарителя $T_{\text{и}} = 913$ и 933 К, обеспечивающих необходимую плотность падающего потока атомов. Для получения слоев CdSe с наиболее совершенной структурой температура слюдяных подложек $T_{\text{п}}$ подбиралась в пределах ($703 \div 853$) К. Время роста слоев было выбрано ~ 20 мин. Исходным материалом для выращивания слоев служил порошок CdSe , полученный дроблением заранее синтезированного монокристаллического слитка. Слои выращивались на свежежелезистых ориентированных (0001) подложках слюды (мусковита). Контроль, стабилизация и управление температурными режимами выращивания эпитаксиаль-

ных слоёв в квазизамкнутом объеме проводились с помощью разработанного устройства [11]. Точность установления температурного режима составляла $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Морфологию поверхности и толщину эпитаксиальных слоев контролировали с помощью микроинтерферометра Линника МИИ-4. Кристаллическую структуру выращенных слоев определяли методом рентгеновской дифрактометрии на автоматизированном дифрактометре ДРОН-4. Во избежание регистрации дифракционных линий от подложки слои CdSe предварительно отделяли от слюды без их разрушения. Съёмку рентгенограмм проводили в монокроматическом CuK_α -излучении с длиной волны $\lambda = 1,54178 \text{ \AA}$ при напряжении 25 кэВ и силе тока 30 мА, используя метод постоянного числа времени в интервале брегговских углов 2θ от 20° до 75° с шагом съёмки $0,2^\circ$ и временем экспозиции в каждой точке 10 с. Исследовали образцы слоев CdSe размером 5×5 мм. Фазовый анализ

структуры пленок проводили путем сопоставления межплоскостных расстояний и относительных интенсивностей рентгеновских рефлексов от исследуемых образцов и эталона по данным JCPDS [12]. Обработку результатов проводили с помощью программы WinXPow.

Результаты и их обсуждение

Ростовые параметры эпитаксиальных слоев CdSe/слюда в зависимости от технологических условий эпитаксии приведены в таблице.

Видно, что с увеличением T_n в пределах $(703 \div 853) \text{ K}$, ($T_n = 913; 933 \text{ K}$) уменьшение перепада температур $\Delta T = (T_n - T_i)$ приводит к уменьшению скорости роста слоев V и параметра $\gamma = (T_n - T_i) / T_i = 0,08 \div 0,23$, характеризующего степень термодинамического равновесия молекулярного пара с растущим слоем в зоне реакционной камеры. Скорость роста рассчитывалась исходя из толщины выращенных слоев за определенное время.

Таблица – Экспериментальные условия выращивания и ростовые параметры эпитаксиальных слоев CdSe/слюда

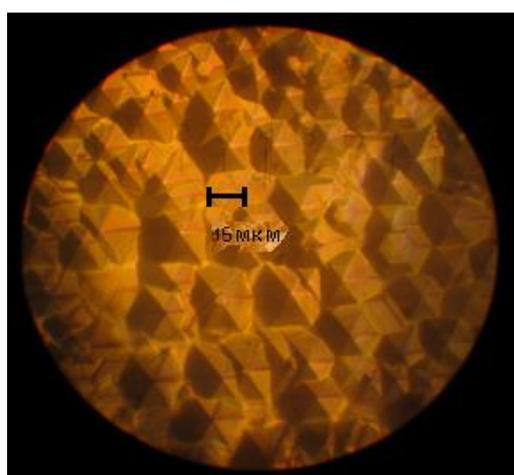
№ образцов	T_i , К	T_n , К	V , мкм/мин	$\gamma = \frac{\Delta T}{T_i}$	d , мкм	L , мкм
1	913	703	6,0	0,23	120	15
2	913	723	5,0	0,21	100	30
3	913	743	4,0	0,18	80	60
4	913	763	3,0	0,16	60	120
5	933	793	2,5	0,15	50	150
6	933	813	1,75	0,13	35	250
7	933	833	1,0	0,10	20	400
8	933	853	0,3	0,08	6	600

Примечание: T_i – температура испарителя, T_n – температура подложки, $\Delta T = T_n - T_i$, d – толщина слоев, L – размер кристаллитов, V – скорость роста слоев, γ – параметр, характеризующий степень термодинамического равновесия молекулярного пара с растущим слоем в зоне реакционной камеры

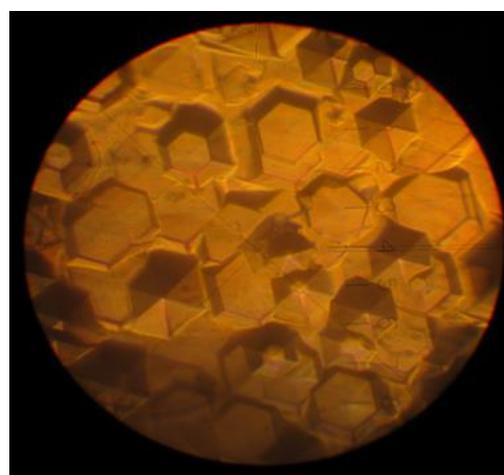
При таких условиях происходит рост линейных размеров кристаллитов, т.е. их разрастание вдоль плоскости эпитаксии. Они увеличиваются от 15 до 600 мкм, принимая при этом более плоскостную (призматическую форму). Установлено также, что при прочих равных технологических условиях, размеры фигур роста, выходящих на поверхность слоев *CdSe*, увеличиваются с уменьшением их толщины. Площадь эпитаксиальной поверхности была равной $\sim 3 \text{ см}^2$, а толщина находилась в пределах $(6 \div 120) \text{ мкм}$.

На рисунке 1 показаны микрофотографии поверхности слоев *CdSe*, вы-

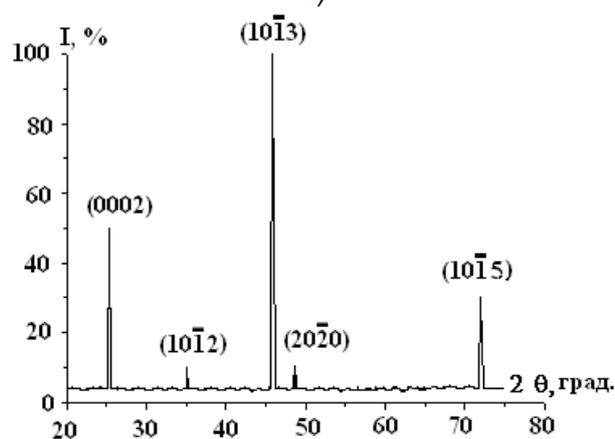
ращенных на кристаллах слюды при температурах роста $T_n = 703; 723 \text{ К}$ ($T_n = 913 \text{ К}$), $\gamma = 0,23; 0,21$ соответственно, в термически неравновесных условиях, близких к режиму открытого вакуумного испарения, т.е. при высоких перепадах температур $\Delta T = 210; 190 \text{ К}$. На поверхности таких слоев, как видно из рисунка 1а, образуются фигуры роста преимущественно в форме остроконечных шестигранных пирамид неусеченной формы. Их линейные размеры составляли величину $\sim 15 \text{ мкм}$. Плотность кристаллитов на подложке составляла величину $\approx 10^6 \text{ см}^{-2}$.



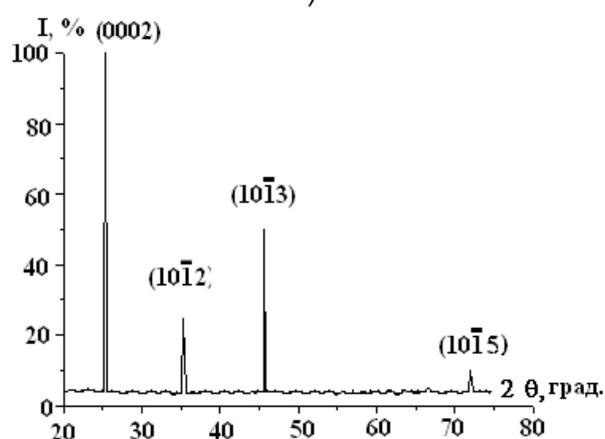
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1 – Микрофотографии поверхности (а, б) и дифрактограммы (в, г) слоев *CdSe*, выращенных на кристаллах слюды при температурах подложки $T_n = 703$ (а), 723 (б) К, ($T_n = 913 \text{ К}$)

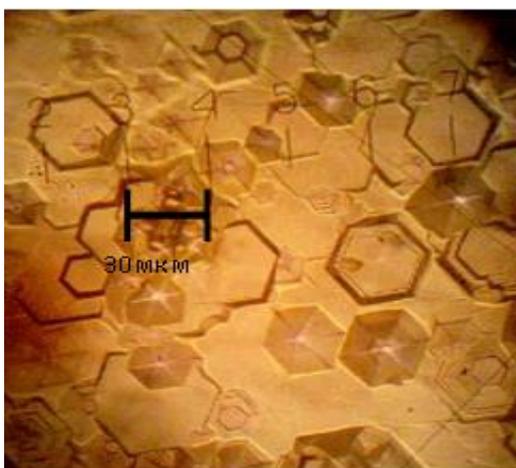
Можно предполагать, что при таких температурах T_n на начальных стадиях роста за счет поверхностной диффузии происходит формирование островковых трехмерных зародышей и их коалесценция с последующим ростом слоя селенида кадмия по механизму Фольмера-Вебера [5,13]. При невысокой температуре подложки T_n (703 К) и/или высокой скорости осаждения длины поверхностной диффузии адатомов (адсорбированных атомов) невелики, и вероятность встраивания адатома в кристаллическую решетку в месте его первоначального попадания на подложку увеличивается. На поверхности слоев происходит образование трехмерных зародышей со структурными дефектами (вакансиями, дефекты упаковки и т.д.) и с большой шероховатостью поверхности. В этих условиях возникает большое число зародышей, дающих поликристаллический мелкозернистый слой (рисунок 1а). Это подтверждается рентгенографическими исследованиями (рисунок 1в, г). На рисунке 1в самая яркая линия ($10\bar{1}3$)–100% при $2\theta = 45,83$ – это косая текстура. Вторая по интенсивности линия – это текстура (0002) – 50% при $2\theta = 25,37$. Менее интенсивные линии косых текстур ($10\bar{1}2$) – 10% при $2\theta = 35,13$; ($20\bar{2}0$) – 10% при $2\theta = 48,88$ и ($10\bar{1}5$) – 30% при $2\theta = 71,97$. На дифрактограммах присутствуют индексы отражений, характерные для гексагональной структуры вюртцита.

Повышение температуры подложки до 723 К приводит к разрастанию кристаллитов вдоль плоскости (0001), линейные размеры кристаллитов увеличиваются в два раза (рисунок 1б). Можно полагать, что при высоких T_n кристаллиты принимают более плоскост-

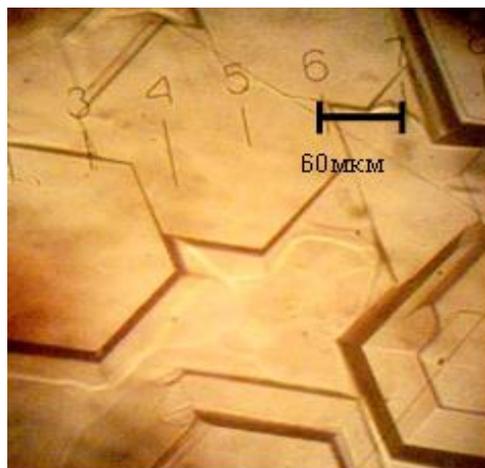
ную призматическую форму за счет термического стравливания наиболее слабых участков пирамидальных фигур роста. На дифрактограмме таких слоев наблюдаются самая интенсивная линия (0002)–100% и менее интенсивные линии косых текстур ($10\bar{1}2$)–30%; ($10\bar{1}3$)–50%; ($10\bar{1}5$)–10%. Линия ($20\bar{2}0$) при таком режиме осаждения отсутствует.

С повышением температуры подложки в пределах от 743 до 763 К ($T_n = 913$ К), $\gamma = 0,18$; 0,16 и уменьшении перепада температур от 170 до 150 К соответственно, плотность фигур роста монотонно уменьшается от $6 \cdot 10^5$ до $2 \cdot 10^4$ см⁻² и наиболее крупноблочные слои растут при условиях, близких к равновесным. По-видимому, с повышением T_n имеет место разрастание их кристаллитов вдоль плоскости (0001) (рисунок 2а, б). На поверхности таких слоев наблюдались фигуры роста двух типов: мелкие шестигранные пирамиды (неусеченной и усеченной форм) и крупные гексагональные (рисунок 2а).

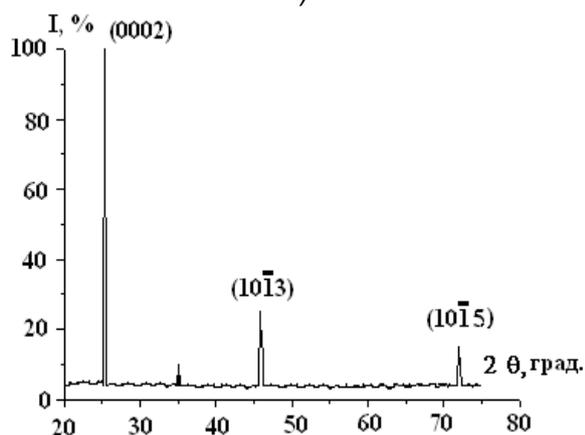
При температуре подложки $T_n = 763$ К ($T_n = 913$ К) высокая подвижность адатомов способствует преимущественному росту ориентированных кристаллитов. Линейные размеры фигур роста таких слоёв достигают значений 120 мкм (рисунок 2б). Результаты рентгенофазового исследования показывают, что при $T_n = 743$ ($T_n = 913$ К) слои растут со смешанной ориентацией (рисунок 2в). Самая яркая линия это текстура (0002) – 100%, менее интенсивные линии-косые текстуры ($10\bar{1}3$), ($10\bar{1}5$). При $T_n = 763$ ($T_n = 913$ К) слои растут преимущественно косой текстурой ($10\bar{1}3$) – 100%, (рисунок 2 г) это самая яркая линия. Менее интенсивная линия – косая текстура ($10\bar{1}5$) – 50%.



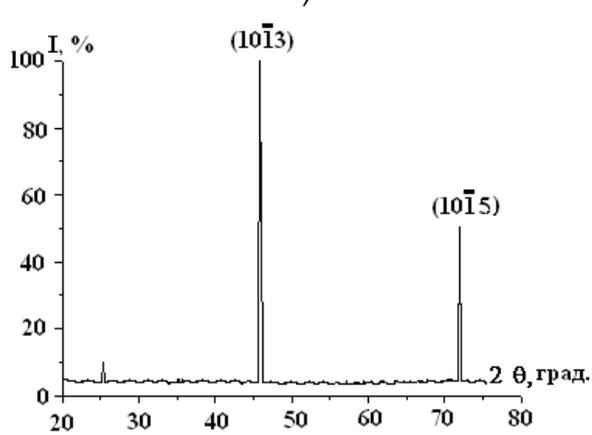
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2 – Микрофотографии поверхности (а, б) и дифрактограммы (в, г) слоев CdSe, выращенных на кристаллах слюды при температурах подложки $T_n = 743$ (а), 763 (б), ($T_n = 913$ К)

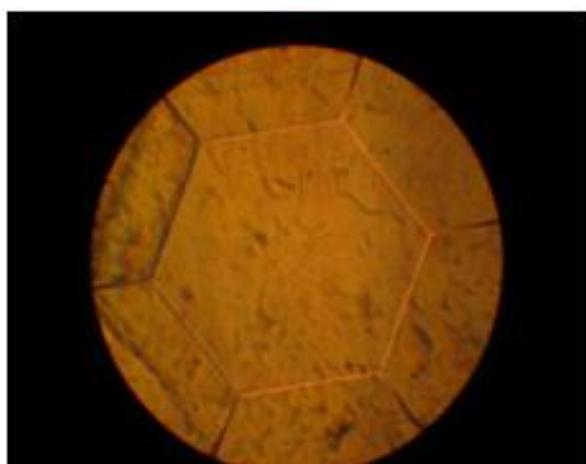
Дальнейшее увеличение температуры подложки в пределах $T_n = (793 \div 833)$ К ($T_n = 933$ К) и одновременное уменьшение её перепада $\Delta T = (140 \div 100)$ К, ($\gamma = 0,15 \div 0,01$), резко увеличивает размеры фигур роста слоев CdSe, достигая значений 400 мкм (рисунок 3а). При высокотемпературном режиме эпитаксии $T_n = 833$, ($T_n = 933$ К) и её перепаде $\Delta T = 100$ К, ($\gamma = 0,1$), вероятно, идет процесс рекристаллизации пограничного слоя пленка-подложка и «залечивание» большинства дефектов, на которых развиваются совершенные фигуры роста. При этом кристаллиты принимают более однородную призма-

тическую форму. Высокая температура подложки и малые пересыщения, в зависимости от подвижности конденсирующего материала, формируют на поверхности подложки текстурированные слои с ориентацией $(10\bar{1}3)$ (рисунок 3в). Можно предположить, что при таких условиях ось текстуры $(10\bar{1}3)$ совпадает с направлением газодинамического потока пара. Очевидно, что изменение ориентации текстуры CdSe связано со сменой режима движения пара.

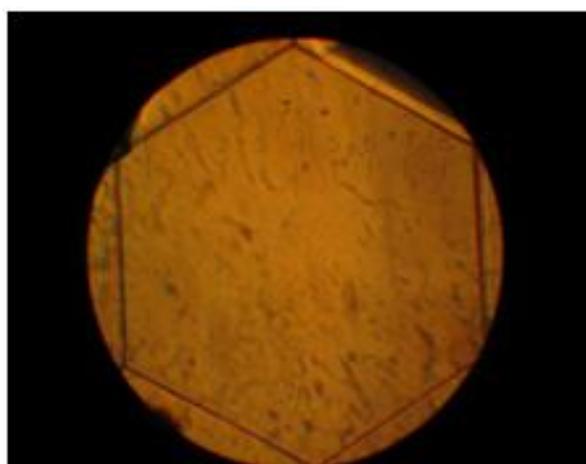
Увеличение температуры подложки до значений 853 К ($T_n = 933$ К) и одновременное уменьшение её перепада $\Delta T = 80$ К, ($\gamma = 0,08$) приводит к увеличению

размеров фигур роста слоёв $CdSe$ до значений 600 мкм (рисунок 3б). При таком режиме происходит переход от текстурированного к более упорядоченному слою с четко выраженной системой точечных рефлексов, что свидетельствует о наличии эпитаксиального роста. По-видимому, с повышением температуры подложки зародышевый механизм вырождается в послойный механизм (Франка-ван дер Мерве) роста [5,13]. При высоких температурах подложки появляются тепловые флуктуации, которые приводят к появлению из-

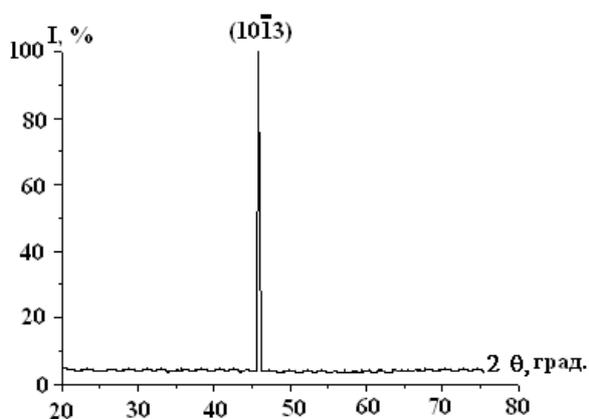
ломов в ступенях. Движение адатомов происходит вдоль ступени с окончательным закреплением в изломе. В центре совершенной грани при определенном пересыщении возникает двумерный или трехмерный зародыш, который разрастается в монослой путем диффузионного присоединения адатомов к моноатомной ступени. Поверхность эпитаксиальных слоев становится зеркально гладкой, при этом она состоит из монолитной упорядоченной структуры, кристаллической мозаики гексагональных кристаллов $CdSe$.



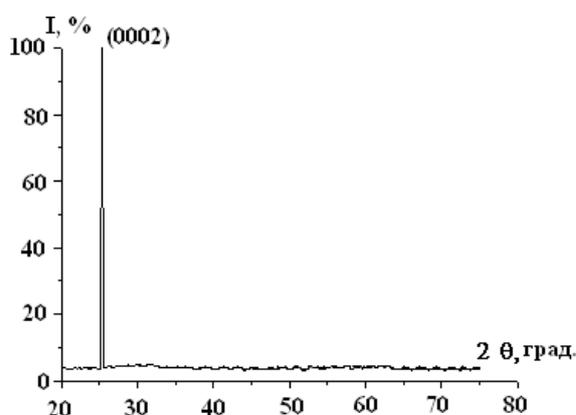
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3 – Микрофотографии поверхности (а, б) и дифрактограммы (в, г) эпитаксиальных слоев $CdSe$, выращенных на кристаллах слюды при температурах подложки $T_n = 833$ (а), 853 (б), ($T_n = 933$ К)

На рисунке 3г представлена дифрактограмма эпитаксиального слоя $CdSe$ толщиной $d = 6$ мкм. Выращенные слои имеют ориентацию (0001), параллельную плоскости эпитаксии: на дифрактограмме из таких слоев имеется только линия (0002) при $2\theta = 25,37$, принадлежащая к фазе $CdSe$ с гексагональной решеткой типа вюрцита.

Воспроизводимость результатов роста эпитаксиальных пленок подтверждалась при неоднократном повторении экспериментов. На начальных стадиях роста эпитаксиальных слоев $CdSe$ совершенства монокристаллической подложки достаточно для того, чтобы на ее поверхности также формировался слой монокристалла. Однако с уменьшением толщины рост слоев $CdSe$ продолжается с формированием блочных структур. На дифрактограммах полученных образцов регистрируются линии, относящиеся к фазе $CdSe$ с гексагональной решеткой типа вюрцита.

Заключение

По полученным эксперименталь-

ным результатам можно установить общие закономерности роста эпитаксиальных слоев $CdSe$ на ориентирующих (0001) подложках слюды в квазизамкнутом объеме.

1. Большая плотность хорошо ориентированных кристаллитов на начальных стадиях роста и высокие температуры подложек способствуют формированию высокосовершенной структуры пленок.

2. С увеличением температуры подложки и уменьшением параметра γ совершенствуется кристаллическая структура слоев $CdSe$.

3. Установлено, что с изменением теплового режима эпитаксии, возможно управление ориентацией текстуры слоев $CdSe$ /слюда и ее влиянием на электрофизические свойства материала.

4. Термодинамический перенос вещества, эпитаксия в условиях $T_n = 853$ и $T_{и} = 933$ К, $\gamma = 0,08$ близких к равновесным способствует получению эпитаксиальных слоев с совершенной гексагональной структурой типа вюрцита.

Библиографический список

1. Сенокосов Э.А., Чукита В.И., Хамидуллин Р.А. и др. Исследование характеристик позиционной чувствительности эпитаксиальных слоев n - $CdSe$, выращенных в квазизамкнутом объеме на кристаллах слюды // Неорганические материалы. 2016. Т. 52. № 8. С. 822 – 825.
2. Сенокосов Э.А., Чукита В.И., Хамидуллин Р.А. и др. Экспериментальное и теоретическое исследования характеристик позиционно-чувствительных фотоприемников на основе эпитаксиальных слоев n - $CdSe$ /слюда // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51. Вып. 5. С. 689 – 694.
3. Чукита В.И., Сенокосов Э.А., Феценко В.С. Цифровой двухкоординатный позиционно-чувствительный фотоприемник на основе эпитаксиальных слоев $CdSe$ /слюда // Вестник Приднестровского государственного университета. Сер.: Физ.-мат. науки. 2019. № 3 (63). С. 19–24.
4. Антипов В.В., Кукушкин С.А., Осипов А.В. и др. Эпитаксиальный рост пленок селенида кадмия на кремнии с буферным слоем карбида кремния // Физика твердого тела. 2018. Т. 60. № 3. С. 499 – 504.

5. Кукушкин С. А., Осипов А. В. Процессы конденсации тонких пленок // Успехи физической науки. 1998. Т. 168, № 10. С. 1083 – 1116.
6. Калинин И.П., Алесковский В.Б., Симашкевич А.В. Эпитаксиальные пленки соединений A^IVV^I . – Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. – 311 с.
7. Баранский П.И., Клочков В.П., Потыкевич И.В. Полупроводниковая электроника: справочник. - Киев: Наукова думка. 1975. – 704 с.
8. Аксененко М.Д., Бараночников М.Л. Приемники оптического излучения: справочник. – М.: Радио и связь, 1987. – 296 с.
9. Сенокосов Э.А., Чукита В.И., Один И.Н. и др. Катодолюминесценция фоточувствительных слоев CdSe, выращенных в квазизамкнутом объеме // Неорганические материалы. 2012. Т. 48. № 12. С. 1299 – 1302.
10. Алферов Ж.И. Двойные гетероструктуры: концепция и применение в физике, электронике и технологии // Успехи физической науки. 2002. Т. 172. № 9. С. 1068 - 1086.
11. Сенокосов Э.А., Чукита В.И., Жданов А.А. Управление технологией выращивания в квазизамкнутом объеме кристаллически-совершенных полупроводниковых слоев // Вестник Приднестровского государственного университета. Сер.: Физ.-мат. науки. 2018. № 3 (60). С. 16–19.
12. JCPDS-International Centre for Diffraction Data [Электронные ресурсы]. 1987-2008. JCPDSICDD. Newtown Square. PA. 19073. USA.
13. Фельдман Л., Майер Д. Основы анализа поверхности и тонких пленок. – М.: Мир, 1989. - 342 с.

References

1. Senokosov E.A., Chukita V.I., Hamidullin R.A. i dr. Issledovanie harakteristik pozicionnoj chuvstvitel'nosti epitaksial'nyh sloev n-CdSe, vyrashchennyh v kvaziza-mknutom ob"eme na kristallah slyudy // Neorganicheskie materialy. 2016. Т. 52. № 8. S. 822 – 825.
2. Senokosov E.A., Chukita V.I., Hamidullin R.A. i dr. Eksperimental'noe i teore-ticheskoe issledovaniya harakteristik pozicionno-chuvstvitel'nyh fotopriemnikov na osnove epitaksial'nyh sloev n-CdSe/slyuda // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2017. Т. 51. Vyp. 5. S. 689 – 694.
3. Chukita V.I., Senokosov E.A, Feshchenko V.S. Cifrovoy dvuhkoordinatnyj pozici-onno-chuvstvitel'nyj fotopriemnik na osnove epitaksial'nyh sloev CdSe/slyuda // Vestnik Pridnestrovskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Fiz.-mat. nauki. 2019. № 3 (63). S. 19–24.
4. Antipov V.V., Kukushkin S.A., Osipov A.V. i dr. Epitaksial'nyj rost plenok sele-nida kadmiya na kremnii s bufernym sloem karbida kremniya // Fizika tverdogo tela. 2018. Т. 60. № 3. S. 499 – 504.
5. Kukushkin S. A., Osipov A. V. Processy kondensacii tonkih plenok // Uspekhi fizicheskoy nauki. 1998. Т. 168, № 10. S. 1083 – 1116.
6. Kalinkin I.P., Aleskovskij V.B., Simashkevich A.V. Epitaksial'nye plenki soedinenij A^{IV}V^I. – Л.: Izd-vo LGU, 1978. – 311 с.
7. Baranskij P.I., Klochkov V.P., Potykevich I.V. Poluprovodnikovaya elektronika: spravochnik. - Kiev: Naukova dumka. 1975. – 704 с.
8. Aksenenko M.D., Baranochnikov M.L. Priemniki opticheskogo izlucheniya: spravochnik. – М.: Radio i svyaz', 1987. – 296 с.
9. Senokosov E.A., Chukita V.I., Odin I.N. i dr. Katodolyuminescenciya fotochuvstvitel'nyh sloev CdSe, vyrashchennyh v kvazizamknutom ob"eme // Neorganicheskie materia-ly. 2012. Т. 48. № 12. S. 1299 – 1302.

10. Alferov ZH.I. Dvojnye geterostruktury: koncepciya i primenenie v fizike, elektronike i tekhnologii // Uspekhi fizicheskoy nauki. 2002. – T. 172. № 9. S. 1068 - 1086.
11. Senokosov E.A., Chukita V.I., Zhdanov A.A. Upravlenie tekhnologiej vyrashchivaniya v kvazizamknutom ob"eme kristallicheski-sovershennykh poluprovodnikovyykh sloev // Vestnik Pridnestrovskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Fiz.-mat. nauki. 2018. № 3 (60). S. 16–19.
12. JCPDS-International Centre for Diffraction Data [Elektronnye resursy]. 1987-2008. JCPDSICDD. Newtown Square. PA. 19073. USA.
13. Fel'dman L., Majer D. Osnovy analiza poverhnosti i tonkih plenok. – M.: Mir, 1989. - 342 s.

*Статья поступила 19.12.2020 г.
© В.И. Чукита, 2021*

Сведения об авторе
List of Author

Чукита Виталий Исакович – старший преподаватель кафедры твердотельной электроники и микроэлектроники Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко.

Vitaly Chukita – Senior Lecturer of the Department of Solid State Electronics and Microelectronics, Transnistrian State University named after T.G. Shevchenko.

КОРРЕЛЯЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ КАРБИДКРЕМНИЕВЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ С ТИПОМ ПРОВОДИМОСТИ

И.В. Офицерова¹, Т.И. Исабекова², И.С. Сулейманов¹

¹ Дагестанский государственный университет

² Дагестанский государственный технический университет

Махачкала

mila775@mail.ru

Аннотация. Предпринята попытка установить взаимосвязь между технологией получения карбидкремниевых твердых растворов и типом проводимости. Установлено, что соотношение парциальных давлений P_{N_2} и $P_{общ}$ влияет, в первую очередь, на тип проводимости твердых растворов. В атмосфере чистого азота растут преимущественно слои твердых растворов с электронным типом проводимости. По мере введения аргона, выполняющего роль транспортера, доля образцов с электронным типом электропроводности падает, а с дырочным типом проводимости – растет. Независимо от условий получения при $x > 0,5$ удастся получить слои твердых растворов преимущественно с n -типом проводимости, когда свойства твердого раствора определяет нитрид алюминия.

Abstract. An attempt to establish the relationship between the technology of obtaining silicon carbide solid solutions and the type of conductivity is made. It is established that the ratio of partial pressures P_{N_2} and P_{gen} affects, first of all, the type of conductivity of solid solutions. In an atmosphere of pure nitrogen, layers of the solid solutions grow mainly with an electronic type of conductivity. As argon is added, which acts as a transporter, the portion of the samples with the electronic type of electrical conductivity decreases, and with the p -type of conductivity increases. Regardless of the obtaining conditions at $x > 0.5$, it is possible to obtain the solid solutions layers mainly with n -type conductivity when the solid solution properties are determined by AlN.

Ключевые слова: карбид кремния, тип проводимости, твердый раствор, парциальное давление.

Keywords: silicon carbide, type of conductivity, solid solution, partial pressure.

Введение

Карбид кремния (SiC) является базовым материалом для полупроводни-

ковых устройств, эффективно работающих в экстремальных условиях, в частности, при температурах порядка

1000°C и в условиях повышенной радиации и агрессивных сред. Значительные успехи в развитии технологии SiC за последние десятилетия позволили разработать и создать на его основе практически все типы полупроводниковых приборов, в том числе и первые интегральные микросхемы. Сегодня продолжается разработка технологических методов изготовления полупроводниковых приборов и исследования их параметров [1]. Будущее карбида кремния довольно оптимистично. Твердые растворы в системе с SiC позволили бы получать материалы для электронной техники с заданными свойствами, в первую очередь, шириной запрещенной зоны и подвижностью [2-6].

Получение качественных малодофектных кристаллов SiC и карбидкремниевых твердых растворов определенного политипа сопряжено с рядом трудностей, и одна из них – эффективная система управления процессом роста кристалла [6]. Поэтому была предпринята попытка установить взаимосвязь между технологией получения карбидкремниевых твердых растворов и типом проводимости.

Результаты исследований и обсуждение

Исследования, проведенные при различных технологических режимах получения эпитаксиальных слоев (ЭС) твердых растворов $(SiC)_{1-x}(AlN)_x$, позволили заключить, что существует прямая связь технологии получения с типом электропроводности ЭС твердых растворов. Изучение типа проводимости осуществлялось с помощью термозонда, ВАХ, ВФХ и эффекта Холла.

Обнаружено, что в зависимости от

условий роста, полученные ЭС твердых растворов $(SiC)_{1-x}(AlN)_x$ могут обладать как n -типом, так и p -типом электропроводности. Причем тип проводимости в определенной степени зависит от соотношения парциальных давлений азота и аргона в газовой фазе.

На рисунке а, б приведены зависимости типа проводимости карбидкремниевых твердых растворов от соотношения парциального давления азота к общему составу газовой фазы в процессе роста и парциального давления азота. Все данные, подвергшиеся обработке при построении зависимостей, являются экспериментальными. На графике приведены две зависимости, для n - и p -типа проводимости, соответственно.

В атмосфере чистого азота растут преимущественно слои твердых растворов с электронным типом проводимости. По мере введения аргона, выполняющего роль транспортера, доля образцов с электронным типом электропроводности падает, а с p -типом проводимости – растет. Вероятно, наличие аргона связывает атомы азота, снижая долю встраиваемых атомов азота. В этом случае нарушается стехиометрия в пользу алюминия, что стимулирует рост образцов с дырочной проводимостью.

Анализ зависимостей, приведенных на рисунке, показал, что при $P_{N_2}/P_{общ.} < 0,3$ выращенные слои имеют преимущественно p -тип проводимости, а некоторые являются высокоомными. В промежуточной области $0,3 \leq P_{N_2}/P_{общ.} \leq 0,5$ удается получить как n -, так и p -тип электропроводности в слоях твердых растворов. Хорошо видно, что рост P_{N_2} в газовой фазе позволяет получить

слои твердых растворов с n -типом проводимости. При этом доля образцов с

дырочной проводимостью уменьшается.

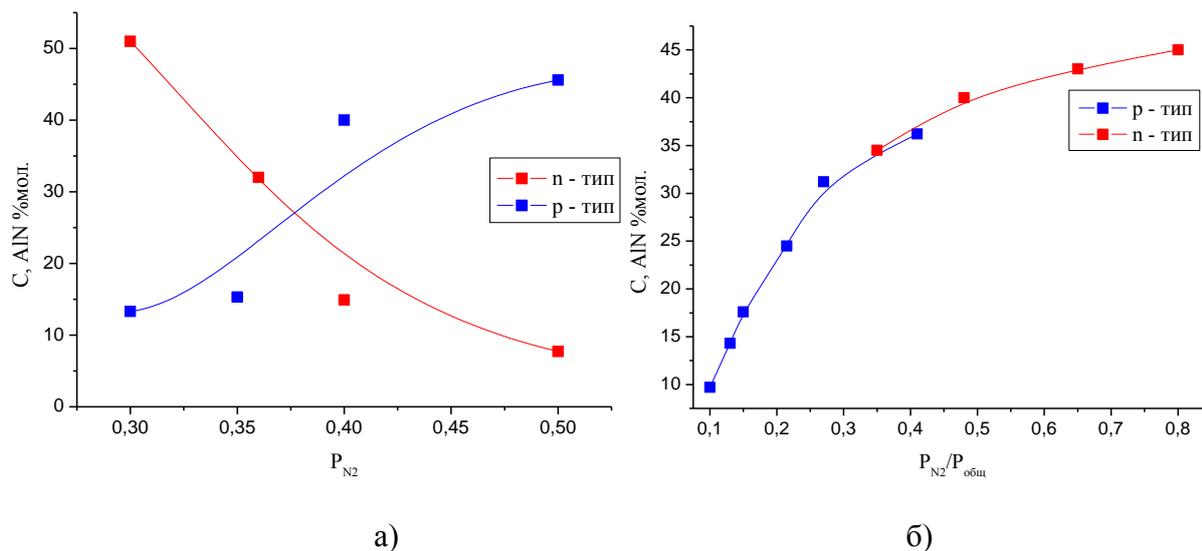


Рисунок – Зависимость типа проводимости от: а) парциального давления азота P_{N_2} б) соотношения парциальных давлений P_{N_2} и $P_{\text{общ}}$.

Можно предположить, что p -тип электропроводности связан с наличием избыточного свободного алюминия у поверхности роста эпитаксиального слоя. Недостаток азота в зоне роста приводит к росту слоев с относительно низким содержанием AlN , легированных избыточным свободным Al . С увеличением P_{N_2} концентрация AlN в ЭС растет, достигая насыщения для данного источника. Это, по-видимому, и приводит к тому, что при увеличении P_{N_2} растут слои с электронной проводимостью.

Похоже, что при максимальном давлении азота ($\sim 0,5$ атм.) весь свободный Al , образующийся при диссоциации в поликристаллическом спёке, связывается с азотом и встраивается в кристаллическую решетку растущего слоя твердого раствора $(SiC)_{1-x}(AlN)_x$. Это приводит лишь к росту слоев с другим типом электропроводности, а именно, к росту ЭС с n -типом проводимости.

Следует отметить и еще одну особенность. Независимо от условий полу-

чения при толщине $x > 0,5$ большей частью удается получить слои твердых растворов n -типа проводимостью. При $x > 0,7$, получить образцы с p -типом проводимости представляется весьма затруднительным.

Как видно из рисунка p -тип имеют образцы, содержащие менее 45% AlN . При больших составах (51% на рисунке), несмотря на ухудшающееся структурное совершенство [2], получаем слои с электронным типом проводимости.

Известно [7], что при $x > 0,7$ происходит перестройка зонной структуры твердого раствора $(SiC)_{1-x}(AlN)_x$. С ростом значения величины x , вероятно, ведущую роль в определении свойств твердого раствора будет играть AlN , образцы которого обладают преимущественно n -типом проводимости, как и большинство нитридов. Это обусловлено нестехиометрическим вхождением азота в вышеупомянутые соединения.

Поэтому согласно авторам [7], мож-

но предположить, что и слои твердых растворов $(SiC)_{1-x}(AlN)_x$ с большим значением x будут иметь преимущественно n -тип проводимости. Это вытекает из теоретических расчетов и подтверждается экспериментально [2].

Свободный избыточный алюминий, образующий при диссоциации AlN и достигнувший растущей поверхности ЭС, связывается с N_2 и образует кристаллическую решетку ЭС твердого раствора. Дальнейшее увеличение P_{N_2} приводит к перекомпенсации алюминия азотом и инверсии типа электропроводности. Таким образом, варьируя состав рабочего газа в зоне роста, можно управлять ти-

пом проводимости ЭС твердых растворов $(SiC)_{1-x}(AlN)_x$.

Заключение

Таким образом установлено, что соотношение парциальных давлений P_{N_2} и $P_{полн}$ влияет на электрофизические свойства твердых растворов и, в первую очередь, на тип проводимости. Таким образом, твердые растворы $(SiC)_{1-x}(AlN)_x$ позволяют получать материалы для экстремальной электроники, как с n -, так и с p -типом проводимости со свойствами, присущими и карбиду кремния и нитриду алюминия.

Библиографический список

1. Агеев О.А., Беляев А.Е., Болтовец Н.С., Киселев В.С. и др. Карбид кремния: технология, свойства, применение. – Харьков: ИСМА, 2010. – 532 с.
2. Сафаралиев Г.К. Твердые растворы на основе карбида кремния. – М.: Физматлит, 2011. – 296 с.
3. Гусейнов М.К., Курбанов М.К., Сафаралиев Г.К., Билалов Б.А. Получение пленок твердых растворов $(SiC)_{1-x}(AlN)_x$ методом магнетронного распыления // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 31. Вып. 4. С.13 - 16.
4. Каргин Н.И., Сафаралиев Г.К., Харламов Н.А., Кузнецов Г.Д., Рындя С.М. Кинетические особенности получения пленок твердого раствора $(SiC)_{1-x}(AlN)_x$ ионным распылением // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2013. № 6 (175). С. 118-121.
5. Патент RU № 2482229. Способ получения эпитаксиальных пленок твердого раствора $(SiC)_x(AlN)_{1-x}$ // Рамазанов Ш.М., Курбанов М.К., Билалов Б.А., Сафаралиев Г.К. Опубликовано: 20.05.2013. Бюл. №14.
6. Офицерова Н.В., Савина В.И., Лабазанов Х.У. Математическое прогнозирование технологических условий получения твердых растворов в системе $SiC-AlN$ // Вестник Дагестанского государственного университета. Сер. Естественные науки. 2017. Т.32. Вып.4. С. 7 - 13.
7. Нурмагомедов Ш.А., Сафаралиев Г.К., Сорокин Н.Д., Таиров Ю.М., Цветков В.Ф. Особенности получения эпитаксиальных слоев твердых растворов $(SiC)_{1-x}(AlN)_x$ // Изв. АН СССР. Неорг. Материалы. 1986. Т. 22. № 10. С. 1672-1674.

References

1. Ageev O.A., Belyaev A.E., Boltovets N.S., Kiselev V.S. i dr. Karbid kremniya: tekhnologiya, svojstva, primeneniye. – Har'kov: ISMA, 2010. – 532 s.

2. Safaraliev G.K. Tverdye rastvory na osnove karbida kremniya. – M.: Fizmatlit, 2011. – 296 s.
3. Gusejnov M.K., Kurbanov M.K., Safaraliev G.K, Bilalov B.A. Poluchenie plenok tverdyh rastvorov (SiC)_{1-h}(AlN)_x metodom magnetronnogo raspyleniya // Pis'ma v ZHTF. 2006. T. 31. Vyp. 4. S.13 - 16.
4. Kargin N.I., Safaraliev G.K., Harlamov N.A., Kuznecov G.D., Ryndya S.M. Kineti-cheskie osobennosti polucheniya plenok tverdogo rastvora (SiC)_{1-x}(AlN)_x ionnym raspyle-niem // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki. 2013. № 6 (175). S. 118-121.
5. Patent RU № 2482229. Sposob polucheniya epitaksial'nyh plenok tverdogo ras-tvora (SiC)_i-x(AlN)_x // Ramazanov SH.M., Kurbanov M.K., Bilalov B.A., Safaraliev G.K. Opublikovano: 20.05.2013. Byul. №14.
6. Oficerova N.V., Savina V.I., Labazanov H.U. Matematicheskoe prognozirovanie tekhnologicheskikh uslovij polucheniya tverdyh rastvorov v sisteme SiC–AlN // Vestnik Da-gestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye nauki. 2017. T.32. Vyp.4. S. 7 - 13.
7. Nurmagomedov SH.A., Safaraliev G.K., Sorokin N.D., Tairov YU.M., Cvetkov V.F. Oso-bennosti polucheniya epitaksial'nyh sloev tverdyh rastvorov (SiC)_{1-x}(AlN)_x// Izv. AN SSSR. Ne-ogr. Materialy. 1986. T. 22. № 10. S. 1672-1674.

Статья поступила 13.12.2020 г.

© И.В. Офицерова, Т.И. Исабекова, И.С. Сулейманов, 2021

Сведения об авторах
List of Authors

Офицерова Наталья Васильевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры инженерной физики Дагестанского государственного университета.

Natalya Oficerova – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Physics, Daghestan State University.

Исабекова Тамила Илахидиновна – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой прикладной математики и информатики Дагестанского государственного технического университета.

Tamila Isabekova – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Applied Mathematics and Informatics of the Daghestan State Technical University.

Сулейманов Ислам Сулейманович – студент физического факультета Дагестанского государственного университета.

Islam Suleimanov – Student of the Physics Department, Daghestan State University.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ

А.М. Денгаев

Дагестанский государственный технический университет
Махачкала
dacademia@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены модели и методы математического моделирования процесса прогнозирования заболеваний на ранних стадиях. Приведены основные этапы формализации задачи автоматизированной диагностики. Указано, что применение математических моделей и алгоритмов в решении задач прогнозирования и диагностики заболеваний позволяет провести автоматизированную диагностику заболевания, максимально точно и информативно распознать медицинские образы, выявлять причины возникновения болезни, выбрать эффективный метод лечения, прогнозировать результаты лечения.

Abstract. Models and methods of mathematical modeling of the process of predicting diseases in the early stages are considered. The main stages of formalization of the problem of automated diagnostics are presented. It is indicated that the use of mathematical models and algorithms in solving problems of predicting and diagnosing diseases allows automated diagnosis of the disease, as accurately and informatively as possible to recognize medical images, identify the causes of the onset of the disease, choose an effective treatment method, and predict the results of treatment.

Ключевые слова: математическое моделирование, прогнозирование, автоматизированная диагностика, формализация задачи, вероятностный метод.

Keywords: mathematical modeling, forecasting, automated diagnostics, problem formalization, probabilistic method.

Введение

В последнее время наблюдается значительный рост применения автоматизированных технологий в медицине и здравоохранении. Мощным толчком компьютеризации медицины стало появление высокотехнологических методов диагностики и прогнозирования за-

болеваний на ранней стадии. Широкое распространение в медицине получают системы искусственного интеллекта, методы машинного обучения, системы поддержки принятия решений, методы математического моделирования.

Аналитики подсчитали, что к 2025 году почти половина медицинских орга-

низаций предложат пациентам услуги на базе искусственного интеллекта [1]. В настоящее время все усилия специалистов и ученых направлены на разработку методов и алгоритмов автоматизированного решения задач диагностики и прогнозирования заболеваний.

Сегодня разработкой «умных» медицинских продуктов занимаются такие известные компании как General Electric, IBM, Microsoft, Apple, Google и др. Функционирование и эффективность таких программных продуктов зависит от логически обоснованных математических моделей и алгоритмов [1]. Очень часто методы математического моделирования являются единственно возможным вариантом решения проблемы. Они позволяют прогнозировать развитие эпидемий, диагностировать болезни на раннем этапе, информативно и точно распознавать медицинские изображения.

Методы и модели исследования

Моделирование представляет собой общенаучный метод познания. Под моделью понимается упрощенное знание, несущее вполне определенную, ограниченную информацию об объекте. Модель позволяет описать структуру объекта, основные свойства, внутренние связи и отношения, взаимодействие с окружающей средой и прогнозировать его развитие под воздействием разных факторов.

Математическое моделирование представляет собой знаковое формальное моделирование, при котором объект описывается с помощью математического языка, а исследование модели проводится с помощью математических методов.

На рисунке 1 приведены формализованные методы и модели прогнозирования.

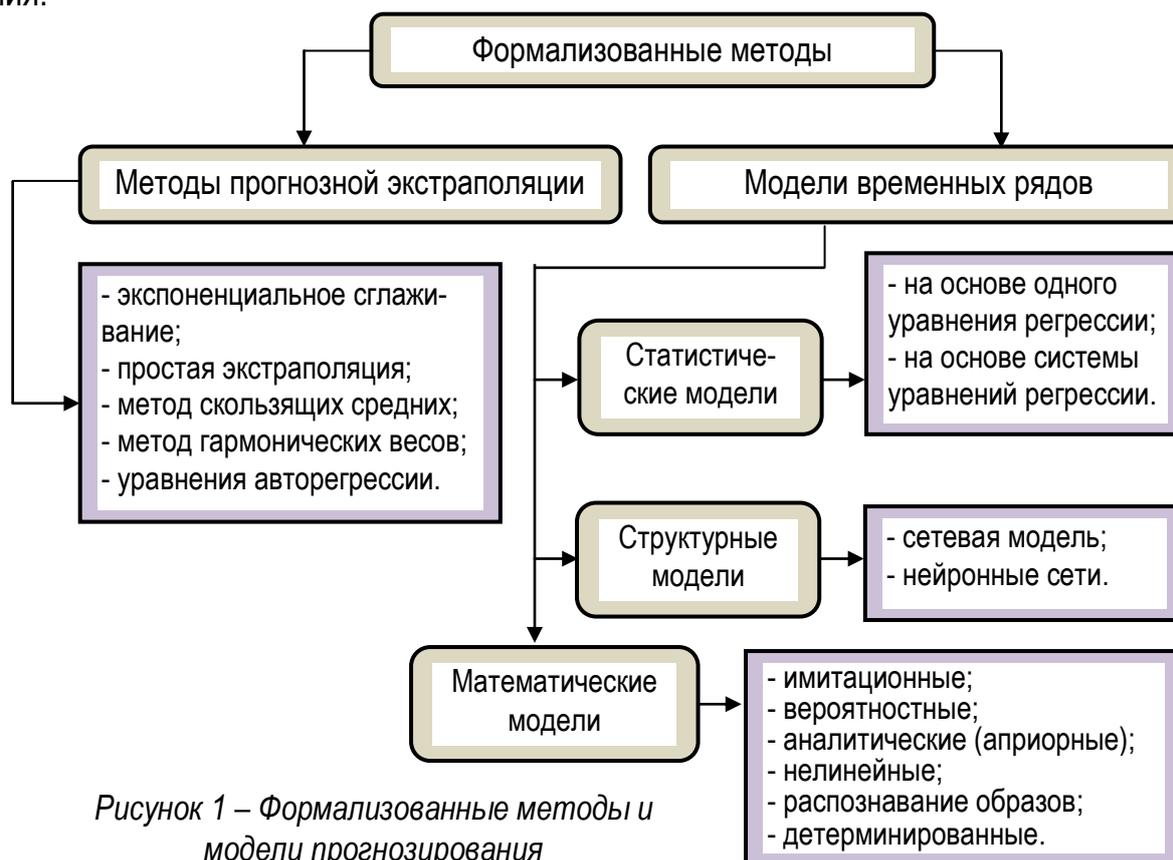


Рисунок 1 – Формализованные методы и модели прогнозирования

Во многих задачах медицины, где присутствует неопределенность, например, разброс показателей наблюдений, неопределенность условий протекания наблюдаемых процессов, гигантские объемы информации о болезнях, успешно применяются вероятностно-статистические методы.

Формализация задачи автоматизированной диагностики

Формализация задачи представляет собой отображение содержательного знания в знаково-символьном виде. Для его выполнения нужно обладать умением выделять в предметной области важные характеристики для решения поставленных задач.

Схематически процесс математического моделирования автоматизированной диагностики можно представить следующим образом (рисунок 2).



Рисунок 2 – Схема математического моделирования автоматизированной диагностики

Формализация задачи автоматизированной диагностики состоит из следующих этапов [2]:

1. Постановка задачи. Исследование, анализ и формирование базы знаний о болезни. Обобщение опыта и наблюдений. Определение задач.

2. Построение математической модели. Математическая формулировка задачи.

3. Выбор метода исследования. Подбор программного и технического обеспечения для решения сформулированной задачи.

4. Проведение исследования. Автоматизированная диагностика.

5. Оценка согласованности модели с опытными данными. Анализ данных. Экспертное заключение.

6. Выбор метода лечения.

Рассмотрим задачу построения математической модели процесса диагностики пациента, заболевшего алопецией. Суть медицинской диагностики состоит в распознавании одного из состояний пациента из конечного набора его состояний. Предположим, что вектор $x = (\gamma_1, \dots, \gamma_n)$ есть вектор параметров, характеризующих состояние волос на голове y человека. Пусть $y = (\eta_1, \dots, \eta_m)$ – вектор параметров, оказывающих воздействие на организм человека. С помощью методов дискриминантного анализа можно осуществить диагностику, ставя в соответствие $(n + m)$ -мерному вектору $(x : y) = (\gamma_1, \dots, \gamma_n, \eta_1, \dots, \eta_m)$ класс людей, страдающих алопецией. Для распознавания образа и соотнесения его к определенному классу необходимо создать множество, состоящее из

состояний, характеризующихся по определенным признакам [3].

В более практически важных случаях связь между состояниями пациента и наблюдаемыми признаками имеет вероятностный характер: совокупность признаков представляет собой случайный вектор, имеющий для различных состояний пациента различные распределения вероятностей. В этом случае задача приобретает более сложный характер, что в итоге может привести к появлению конечных вероятностей ошибочных решений.

Применение формализованных методов прогнозирования в медицине

Прогнозирование является достаточно сложной областью клинической медицины. Достоверность прогноза напрямую зависит от точности диагностики. Важнейшее значение для достоверного прогноза имеют научные знания об особенностях зарождения и развития той или иной болезни.

Для математического моделирования прогноза ранних заболеваний используются методы корреляционно-регрессионного анализа [4]. Суть этих методов состоит не только в выявлении связей между несколькими факторами, оказывающими воздействие на исследуемый объект, но и в установлении конкретной формы зависимости и закономерности. Регрессионный анализ выявляет характер связи между признаками исследуемого объекта, а корреляционная связь определяет степень выраженности связи, т.е. силу связи между переменными. Корреляция может быть представлена в виде таблицы, графика или коэффициента корреляции. Табли-

цы и графики дают лишь представление о наличии и направлении связи. Так, между температурой воздуха и числом случаев бронхита существует корреляционная связь. При этом с повышением температуры воздуха число бронхитов уменьшается. Об этой закономерности можно судить по данным, представленным в таблице и на графике. Однако измерить и оценить статистическую достоверность этой связи можно лишь при помощи специального коэффициента корреляции и его средней ошибки.

Для прогнозирования неврологических болезней используются вероятностные методы, основанные на байесовских или априорных вероятностях. Рассмотрим пример использования вероятностного метода в прогнозировании болезни.

Для этого процесс прогнозирования можно разбить на несколько этапов. Первый этап представляет собой интуитивное представление насколько вероятно болезнь у пациента. Врач, опираясь на свой предыдущий опыт или на знания медицинской литературы, определяет степень болезни. Оценка веро-

ятности, вынесенная на этом этапе, называется априорной, так как может быть усовершенствована при дальнейшем исследовании. Следующий этап состоит в проведении диагностических исследований, определении предрасположенности пациентов к заболеваниям и усовершенствовании оценки вероятности болезни на основе результатов диагностики. Третий этап – это корректировка первоначальной вероятности, выбор метода лечения и прогнозирование результатов лечения в краткосрочном и долгосрочном периодах [2].

В настоящее время широкое распространение в прогнозировании заболеваний получают методы экстраполяции (рисунок 1).

Рассмотрим пример построения прогноза заболеваемости коронавирусом в регионе, например, Дагестане, используя метод скользящих средних. Применяя этот метод можно элиминировать случайные колебания и получить значения, соответствующие влиянию главных факторов. В таблице приведены данные по коронавирусу за последние 5 месяцев.

Таблица – Статистические данные по коронавирусу в Республике Дагестан[5]

	Октябрь 2020 г.	Ноябрь 2020 г.	Декабрь 2020 г.	Январь 2020 г.	Февраль 2020 г.
Среднее количество случаев заболеваний за месяц	2580	3240	4260	3870	2233

Построим прогноз на три месяца: март, апрель, май 2021 года (рисунок 3). Сначала определяем величину интервала сглаживания n . Например, $n = 3$. Далее рассчитываем скользящую

среднюю m для трех рядом стоящих месяцев.

m (ноябрь) = $(2580+3240+4260) / 3 = 3360$, m (декабрь) = 3790, m (январь) = 3454.

Далее строим прогноз на следующий месяц по формуле:

$$Y_{t+1} = m_{t-1} + \frac{1}{n} \cdot (Y_t - Y_{t-1})$$

где, Y – прогнозируемый показатель, t – прогнозируемый период.

Таким образом, прогноз на март получится $Y = 3454 + 1/3 \cdot (2233 - 3870) = 2908$ на апрель – 3228, на май – 2895.

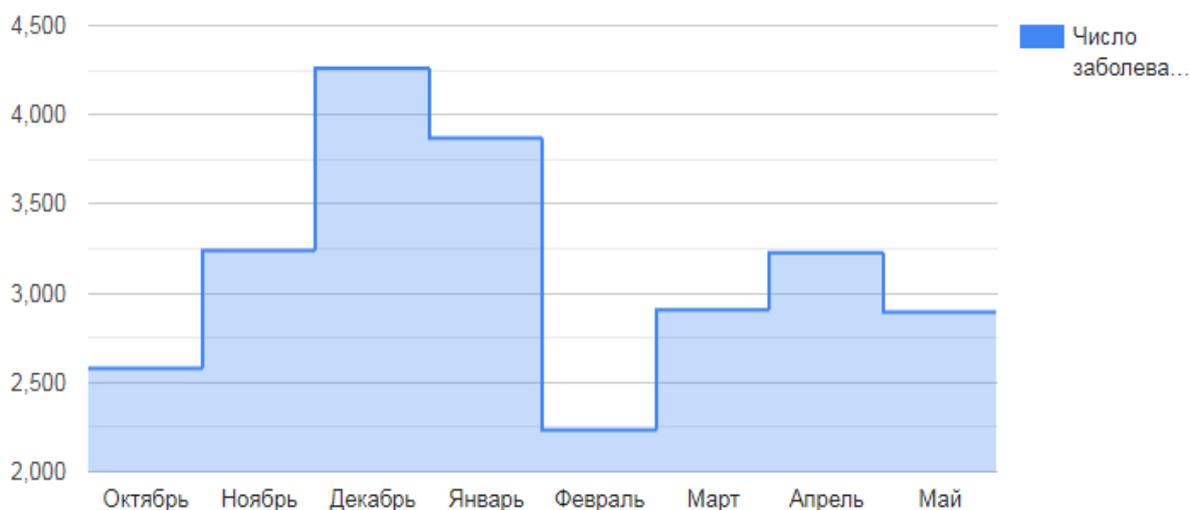


Рисунок 3 – Прогнозный график

В настоящее время для автоматизированной диагностики и прогнозирования заболеваний широкое применение получают системы распознавания медицинских образов. Построение систем распознавания образов изучает область математической кибернетики и искусственного интеллекта [6]. Главная задача системы распознавания образов – оптимальный выбор признаков, наиболее информативно описывающих образ. Поэтому на сегодняшний день все усилия специалистов и ученых направлены на разработку методов и алгоритмов автоматизированного решения задач диагностики и распознавания медицинских изображений.

Заключение

Использование математического моделирования в задачах диагностики и прогнозирования имеет такие преимущества как экономичность и дешевизна проводимых экспериментов, универсальность программного и технического обеспечения, простота многоаспектного анализа, большая точность прогнозирования.

Моделирования в медицине позволяет установить связи между теоретическими знаниями и практикой. Следует помнить, что методы моделирования не заменяют эксперименты, но помогают провести исследования при имеющихся обстоятельствах.

Библиографический список

1. Королук И.П. Медицинская информатика. - Самара: ООО «Офорт»: ГБОУ ВПО «СамГМУ», 2012. - 244 с.
2. Кувайскова Ю.Е., Клячкин В.Н. Статистические методы прогнозирования. - Ульяновск: УлГТУ, 2019. - 197 с.

3. Статистические методы в медицине и здравоохранении: учеб. пособие: / сост.: Н.Х. Шарафутдинова, Э.Ф. Киреева, И.Е. Николаева, М.Ю. Павлова, Р.М. Халфин, М.А. Шарафутдинов, М.В. Борисова, А.Б. Латыпов, А.Ш. Галикеева. – Уфа: ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России, 2018. – 131 с.

4. Звонарев С.В. Основы математического моделирования. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. - 112 с.

5. Коронавирус Республика Дагестан [Электронный ресурс]. URL: https://coronavirusstat.ru/country/respublika_dagestan/ (дата обращения: 20.02.2021).

6. Ирзаев Г.Х., Муслимова Ф.Н. Интеллектуальные информационные технологии. – Махачкала: Формат, 2017. – 190 с.

References

1. Korolyuk I.P. Medicinskaya informatika. - Samara: ООО «Ofort»: GBOU VPO «SamGMU», 2012. - 244 s.

2. Kuvajskova YU.E., Klyachkin V.N. Statisticheskie metody prognozirovaniya. - Ul'yannovsk: UIGTU, 2019. - 197 s.

3. Statisticheskie metody v medicine i zdravooхранenii: ucheb. posobie: / sost.: N.H. SHarafutdinova, E.F. Kireeva, I.E. Nikolaeva, M.YU. Pavlova, R.M. Halfin, M.A. SHarafutdinov, M.V. Borisova, A.B. Latypov, A.SH. Galikeeva. – Ufa: FGBOU VO BGMU Minzdrava Rossii, 2018. – 131 s.

4. Zvonarev S.V. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya. - Ekaterinburg: Izd vo Ural. un ta, 2019. - 112 s.

5. Koronavirus Respublika Dagestan [Elektronnyj resurs]. URL: https://coronavirusstat.ru/country/respublika_dagestan/ (data obrashcheniya: 20.02.2021).

6. Irzaev G.H., Muslimova F.N. Intellektual'nye informacionnye tekhnologii. – Mahachkala: Format, 2017. – 190 s.

Статья поступила 27.02.2021 г.

© А.М. Денгаев, 2021

Сведения об авторе **List of Author**

Денгаев Ахмед Магомедович – аспирант доцент кафедры биотехнических и медицинских аппаратов и систем Дагестанского государственного технического университета.

Akhmed Dengaev – Post-graduate student of the Department of Biotechnical and Medical Devices and Systems, Daghestan State Technical University.

ТЕХНОЛОГИИ, ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

УДК 664.65:664.292

doi: 10.21822/2713-220X-2021-2-1-50-56

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КУКУРУЗНОЙ МУКИ И ПЕКТИНА НА КАЧЕСТВО ПЕСОЧНОГО ПЕЧЕНЬЯ

С.Т. Беретарь

Майкопский государственный технологический университет, Майкоп
kaf_tppop@mkgtu.ru

Аннотация. В статье исследовано использование кукурузной муки и разных видов пектина в рецептуре песочного печенья для придания функциональной направленности и определения качественных характеристик готовых изделий. Полученные результаты свидетельствуют о том, что мучные кондитерские изделия из кукурузной муки, приготовленные по разработанной рецептуре, имеют высокое качество и не уступают по вкусовым характеристикам традиционным изделиям из пшеничной муки, могут использоваться для детского и диетического питания.

Abstract. The article explores the use of corn flour and different types of pectin in the formulation of shortbread cookies to give a functional focus and determine the quality characteristics of finished products. The results obtained indicate that flour confectionery products made from corn flour, prepared according to the developed recipe, are of high quality and are not inferior in taste characteristics to traditional products made from wheat flour, can be used for baby and diet food.

Ключевые слова: мучные кондитерские изделия, свекловичный и яблочный пектин, кукурузная мука, пшеничная мука, песочное тесто, органолептические показатели, песочное печенье.

Keywords: flour confectionery, beet and apple pectin, corn flour, wheat flour, shortbread dough, organoleptic characteristics, shortbread cookies.

Введение

Анализ структуры питания населения России показал, что мучные кондитерские изделия занимают лидирующее место в питании человека. Это обусловлено тем, что продукты самые до-

ступные и наиболее распространенные. Мучные кондитерские изделия характеризуются высокой пищевой ценностью, привлекательным внешним видом и приятным вкусом, они играют существенную роль в восполнении энергетиче-

ческого баланса человека, благодаря своему составу. Отметим, что средняя цена печенья в 2020 году осталась на уровне прошлого года и составила примерно 150 руб. за кг, при этом продажи выросли на 4 %. С 2015 по 2020 гг. производство мучных кондитерских изделий в России выросло на 11%. Наибольший прирост отмечается в 2019 г – на 3,4% относительно предыдущего года. В 2019 году в России произведено 0,74 млн. т или 36,1% мучных кондитерских изделий, а именно, печенья. Прогнозируется, что в 2024 году объем производства мучных кондитерских изделий в России достигнет 2,18 млн. т и превысит значение 2019 года на 6,4%.

По прогнозам в 2021...2024 гг. производство мучных кондитерских изделий в России продолжит расти на 0,8...1,8% в год, в основном, за счет расширения ассортимента и выпуска новых видов кондитерских изделий [3]. Объем российского рынка мучных кондитерских изделий – около 1 млн. т, из которых импортная продукция составляет примерно 7% рынка.

В настоящее время актуальным является разработка продуктов питания функционального направления, в том числе и мучных кондитерских изделий. Создание продуктов здорового питания заставляет производителей совершенствовать ассортимент с учетом потребностей в изделиях с повышенной пищевой и биологической ценностью.

В специализированных продуктах питания функционального назначения нуждается широкий круг потребителей. Продукты функционального питания предназначены для каждодневного употребления и оказывают положительное действие на физиологические функции

организма. Важная роль в рациональном здоровом питании населения отводится созданию сбалансированных по составу и обогащенных функциональными ингредиентами продуктов.

Песочное печенье: особенности и функциональные ингредиенты

Важно, чтобы в процессе создания продуктов функционального питания, их питательные качества и потребительские характеристики не ухудшались. При добавлении нескольких функциональных компонентов всегда следует учитывать их сочетаемость, как в плане химического взаимодействия в продукте питания, так и биосовместимость в пищеварительном тракте [4].

В производстве функциональных продуктов питания широкое применение получили различные пектинопродукты (сухой пектин, пектиновые концентраты, пасты и другие), получаемые в промышленных объемах из яблочных, абрикосовых и сливовых выжимок, жомов свеклы, корзинок подсолнечника, корок цитрусовых плодов, арбуза, тыквы, оболочек сои и другого сырья [2].

Основным компонентом мучных кондитерских изделий являются различные виды муки, отличающиеся по происхождению и сортам. Кукурузная мука, наряду с пшеничной, достаточно широко используется в технологии мучных изделий, но значительно реже – в кондитерских. Кукурузная сеяная мука тонкого помола на ощупь и по виду напоминает пшеничную, используется как составная часть бисквитной муки, частично заменяя пшеничную.

Она представляет собой ценный диетический продукт, обладающий высокими питательными и лечебными

свойствами.

Кукурузная мука, в отличие от пшеничной, содержит большое количество сахара, витамины В₁, В₂ и РР, соли калия, кальция, магния, железа, фосфора, также каротин, крахмал, важные для организма аминокислоты и другие органические вещества. Также она чрезвычайно богата клетчаткой, что позволяет использовать ее для детского питания.

В первую очередь, кукурузная мука известна своими выводящими свойствами: она способствует выведению различных вредных веществ, радионуклидов и токсинов из организма человека. Благодаря высокому содержанию полезной природной клетчатки, использование этой муки в повседневной пище способствует очищению желудка и кишечника, а также благотворно влияет на микрофлору желудочно-кишечного тракта любого человека.

Песочное печенье – мучное кондитерское изделие. Мука является важнейшим рецептурным ингредиентом любого теста, и поэтому ее свойства оказывают существенное влияние на качество теста и готовых изделий. При производстве изделий из песочного теста требуется использование пшеничной муки высшего сорта. Для песочного теста муку берут со средним количеством клейковины (28...36 %).

Песочное тесто готовят с большим количеством масла примерно 26% и сахара 18%, при этом тесто должно получиться очень густым, и влажность его не должна превышать 20%. Тесто представляет собой однородную, плотную, эластичную маслянистую массу серо-желтого цвета. Изделия из такого теста рассыпчатые и хорошо набухают. Характеристики песочного печенья долж-

ны соответствовать стандарту [6].

В качестве функциональных ингредиентов для песочного печенья предлагается использовать пектиновые вещества: высокоочищенный свекловичный пектин, как эффективный комплексообразователь по отношению к ионам тяжелых и радиоактивных металлов, яблочный пектин, обладающий высокими функционально-технологическими свойствами и кукурузная мука из белой пищевой кукурузы, которая представляет собой ценный диетический продукт, обладающий высокими питательными и лечебными свойствами. Кукурузная мука сбалансирована по составу белков, жиров и углеводов, богата клетчаткой [2].

Основным компонентом мучных кондитерских изделий являются различные виды муки, отличающиеся по происхождению и сортам. Использование кукурузной муки в производстве песочных полуфабрикатов позволит получать рассыпчатые, незатяжистые изделия вследствие низкой способности белков к набуханию, что затрудняет образование клейковины. Поэтому в нашей работе кукурузная мука использовалась для улучшения качества, а также увеличения пищевой ценности и уменьшения калорийности мучных кондитерских изделий.

Цель исследования – обогащение песочного теста пектиновыми веществами и кукурузной мукой из белой пищевой кукурузы для производства продукта функциональной направленности.

Решением задачи является повышение биологической и пищевой ценности, улучшение органолептических и физико-химических свойств песочного

печенья, а также придание ему функциональной направленности и конкурентоспособности.

Задача достигается особым способом приготовления песочного печенья. Он предусматривает смешивание компонентов, предусмотренных рецептурой, формование полученной смеси, выпекание изделий. Согласно новому подходу в рецептуру вносят муку из белой пищевой кукурузы и высокоочищенный пектин. Кукурузная мука представляет собой ценный диетический

продукт, обладающий высокими питательными и лечебными свойствами, а высокоочищенный свежковичный пектин обладает комплексообразующей способностью.

Экспериментальная часть

Нами определены физико-химические показатели кукурузной муки из белой пищевой кукурузы «Адыгейская». Результаты представлены в таблице.

Таблица – Физико-химические показатели кукурузной муки из белой пищевой кукурузы «Адыгейская»

Показатель	Значение
Массовая доля влаги, %	7,2 ± 0,28
Массовая доля жира, %	2,4 ± 0,57 г/100г
Массовая доля золы, %	1,3 ± 0,035
Массовая доля сырой клейковины, %	0
Массовая доля белка, г/100 г	7,5 ± 0,14
Витамин А, мг/100 г	–
Витамин В ₁ , мг/100 г	0,28 ± 0,08
Витамин В ₂ , мг/100 г	0,09 ± 0,02
Са, мг/100 г	28,29 ± 3,79
К, мг/100 г	144,01 ± 33,88
Mg, мг/100 г	27,98 ± 2,62
Сырая клетчатка, %	0,56

Как показывают данные таблицы, массовая доля влаги 7,2% в исследуемом образце соответствует требованиям стандарта. Массовая доля белка в муке из белой пищевой кукурузы «Адыгейская» выше, чем в муке из желтой кукурузы и меньше, чем в пшеничной муке высшего сорта. Однако известно, что усвояемость муки из белой пищевой кукурузы значительно выше пшеничной. Кукурузная мука, в отличие от пшеничной, не содержит сырую клейковину.

Содержание массовой доли жира в

исследуемом образце соответствует нормативному значению и почти в 3 раза выше, чем в пшеничной муке высшего сорта. Содержание в кукурузной муке витаминов группы В и минеральных веществ превышает их количество в пшеничной муке высшего сорта. Содержание сырой клетчатки в исследуемом образце в 5 раз выше, чем в пшеничной муке.

Для приготовления песочного печенья функционального назначения использовался высокоочищенный свежко-

вичный пектиновый экстракт сухой (патент № 2124848), а также мука из белой пищевой кукурузы [1].

Способ производства песочного печенья включает: смешивание кукурузной муки из белой пищевой кукурузы с рецептурными компонентами, формование и выпечку, дополнительно внесение высокоочищенного свекловичного и

(или) яблочного пектинов (в соотношении 1:1) в количестве 0,5 % к массе муки. В приготовленных образцах песочного теста из пшеничной муки высшего и первого сортов с различной дозировкой свекловичного и яблочного пектина определяли влажность. Результаты полученных данных приведены на рисунках 1 и 2.

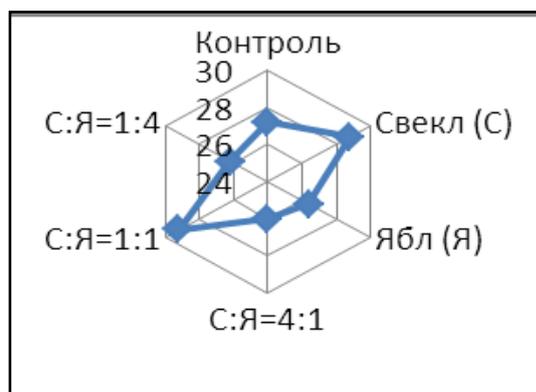
Рисунок 1 – Влияние пектина на влажность песочного теста из муки высшего сорта.

С – свекловичный пектин; Я – яблочный пектин; 1 вариант – С:Я = 4:1; 2 вариант – С:Я = 1:1; 3 вариант – С:Я = 1:4



Рисунок 2 – Влияние пектина на влажность песочного теста из муки 1 сорта.

С – свекловичный пектин; Я – яблочный пектин; 1 вариант – С:Я = 4:1; 2 вариант – С:Я = 1:1; 3 вариант – С:Я = 1:4



Влажность песочного теста в анализируемых образцах составляла 25,6...32%. Как показывают данные, влияние пектина на влажность теста зависит от вида пектина и его дозировки. Так, при добавлении свекловичного пектина влажность теста выше, чем при добавлении яблочного. Такое же изменение влажности наблюдается при использовании комбинаций пектинов. Причем характер изменения влажности

теста практически одинаков при использовании муки высшего и первого сортов. Это объясняется разной влагоудерживающей способностью используемых пектинов, у свекловичного она выше в 2 раза.

Заключение

На основе базовой рецептуры разработаны опытные образцы с добавлением пшеничной и кукурузной муки. Для

придания функциональных свойств использовали яблочный и свекловичный пектин в количестве 5 % к массе муки [1].

По разработанной рецептуре выпекали два вида песочного печенья функциональной направленности с яблочным и свекловичным пектином. Нами определены органолептические показатели опытных образцов печенья. Как показывают данные, печенье со свекловичным пектином имеет более темную коричневую окраску, чем печенье с яблочным пектином, а также темные вкрапления видны на изломе печенья. Печенье с яблочным пектином имеет приятный фруктовый аромат и незначительный хруст. Печенье со свекловичным пектином имеет приятный кислый вкус и меньшее ощущение хруста.

Полученные результаты свидетельствуют о влиянии пектиновых веществ на качество песочного теста. При добавлении кукурузной муки можно улуч-

шить качественные характеристики готовых изделий.

Таким образом, применение пектина в песочном тесте из кукурузной муки оказывает положительное эффект, а именно, лучше происходит связывание рецептурных компонентов с образованием однородной консистенции. Яблочный пектин формирует лучшую структуру песочного теста, чем свекловичный, благодаря выраженной студнеобразующей способности. Органолептические показатели готового печенья выше, чем в образце из кукурузной муки без внесения пектина. Применение свекловичного пектина придает песочному печенью функциональную направленность за счет высокой комплексообразующей и антибактериальной способности.

Использование предлагаемого способа позволит улучшить качество мучных кондитерских изделий и повысить их функциональную направленность.

Библиографический список

1. Беретарь С.Т., Хатко З.Н. Инновационные технологии в производстве пектиносодержащих пищевых продуктов и средств функционального назначения: монография. – Майкоп: Изд. ИП «Кучеренко В.О», 2013. – 206 с.
2. Донченко Л.В. Технология пектина и пектинопродуктов. – М.: ДеЛи, 2000. – 354 с.
3. Драгилев А.И., Сезанаев Л.М. Производство мучных кондитерских изделий. – М.: ДеЛи, 2000. – 448 с.
4. Шаizzo Р.И., Касьянов Г.И. Функциональные продукты питания. – М.: Колос, 2000. – 248 с.
5. Кузнецов О.А., Волошин Е.В., Сагитов Р.Ф. Реология пищевых масс. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. - 106 с.
6. ГОСТ 24901-2014. Печенье. Общие технические условия. – М.: СтандартИнформ, 2015. – 18 с.

References

1. Beretar' S.T., Hatko Z.N. Innovacionnye tekhnologii v proizvodstve pektinosoderzhashchih pishchevyh produktov i sredstv funkcionaln'nogo naznacheniya: monografiya. – Majkop: Izd. IP «Kucherenko V.O», 2013. – 206 s.
2. Donchenko L.V. Tekhnologiya pektina i pektinoproduktov. – M.: DeLi, 2000. – 354 s.

3. Dragilev A.I., Sezanaev L.M. Proizvodstvo muchnyh konditerskih izdelij. – M.: DeLi, 2000. – 448 s.
4. SHazzo R.I., Kas'yanov G.I. Funkcional'nye produkty pitaniya. – M.: Kolos, 2000. – 248 s.
5. Kuznecov O.A., Voloshin E.V., Sagitov R.F. Reologiya pishchevyh mass. – Orenburg: GOU OGU, 2005. - 106 s.
6. GOST 24901-2014. Pechen'e. Obshchie tekhnicheskie usloviya. – M.: StandartInform, 2015. – 18 s.

*Статья поступила 19.11.2020 г.
© С.Т. Беретарь, 2021*

Сведения об авторе
List of Author

Беретарь Сусанна Теучежевна – старший преподаватель кафедры пищевых продуктов и организации питания Майкопского государственного технологического университета.
Susanna Beretar – Senior Lecturer of the Department of Food Products and Catering Services, Maikop State Technological University.

ПОДБОР ЗАКВАСОЧНЫХ КУЛЬТУР ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ФЕРМЕНТИРОВАННОГО КИСЛОМОЛОЧНОГО НАПИТКА ИЗ КОЗЬЕГО МОЛОКА

М.А. Гашева

Майкопский государственный технологический университет, Майкоп
kaf_tppop@mkgtu.ru

Аннотация. В статье представлены данные экспериментальных исследований влияния трех видов заквасочных культур на качество кисломолочного напитка из козьего молока. Изучены процессы сквашивания. Дана балльная оценка органолептических свойств кисломолочных напитков.

Abstract. The article presents the data of experimental studies of the influence of three types of starter cultures on the quality of a fermented milk drink made from goat milk. The processes of fermentation have been studied. A point assessment of the organoleptic properties of fermented milk drinks is given.

Ключевые слова: козье молоко, органолептическая оценка, вязкость, заквасочная культура, кисломолочный напиток.

Keywords: goat milk, organoleptic evaluation, viscosity, starter culture, fermented milk drink.

Введение

С развитием молочного козоводства в России расширяется ассортимент молочной продукции на основе молока этих видов сельскохозяйственных животных.

Получение кисломолочного напитка из козьего молока – шаг к промышленной переработке молока козы, и это вполне обосновано, так как кисломолочные напитки содержат все жизненно необходимые компоненты питания, являются вкусными, диетическими и биологически полноценными, сбалансированными продуктами [1, 2].

Используя управляемые биотехно-

логические способы производства, можно получить кисломолочные напитки не только с приемлемыми органолептическими параметрами, но и с заданными функциональными свойствами.

Цель научно-исследовательской работы – подбор заквасочных культур и обоснование технологических процессов производства кисломолочного напитка на основе козьего молока для дальнейшей разработки рецептуры и технологии, адаптированной к промышленным условиям [3].

Одна из основных задач при подборе заквасочных культур – получение

кисломолочного напитка с несвойственным козьему молоку вкусом и запахом.

Микрофлора заквасок выполняет следующие функции [4, 5]:

- осуществляет трансформацию основных компонентов молока в соединения, обуславливающие вкусовые и ароматические свойства ферментированных молочных продуктов, их питательную ценность;

- участвует в формировании структуры и консистенции продуктов;

- подавляет рост и метаболизм технически вредных и опасных (патогенных) для человека микроорганизмов;

- ускоряет синерезис молочных сгустков во время выработки сыров, повышая активную кислотность сырной массы и сыворотки;

- придаёт продуктам диетические и лечебно-профилактические свойства.

Экспериментальная часть

Для проведения эксперимента брались образцы козьего пастеризованного молока и вносились заквасочные культуры прямого внесения:

- ВД-3, которые используются при производстве йогуртов, в состав входит термофильный стрептококк и болгарская палочка;

- St-Body-4, которые используются при производстве ряженки, в состав входит термофильный стрептококк;

- АВТ-5-Probio-Тес™, которые используют в производстве комбинированных кисломолочных продуктов и напитков, простокваши, различных биопродуктов, содержащих консорциумы термофильных микроорганизмов в сочетании с мезофильными культурами.

Сквашивание проводилось при температуре 37...39°C в течение 6...8 часов. За основные показатели, характеризующие качество заквасок, принято считать предел кислотообразования, время сквашивания, вязкость и органолептические свойства напитка.

В ходе исследований нарастание кислотности происходило равномерно, а в конце сквашивания кислотность контрольных образцов отличалась незначительно. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Титруемая кислотность в конце сквашивания

Заквасочные культуры	Титруемая кислотность, °Т		
	ВД-3	St-Body-4	АВТ-5 - Probio-Тес™
Образец 1	85...87	78...80	87...89
Образец 2	83...85	81...83	86...88
Образец 3	84...86	82...84	88...90

Структурно-механические свойства (вязкость) определяли по времени истечения определенного объема жидкости через капилляр с помощью простейшего вискозиметра ВЗ-246.

Для проведения эксперимента бра-

ли по 100 см³ напитка из трех образцов, заквашенных разными культурами, вносили в колбу. Далее снимали с верхнего отверстия указательный палец, включали секундомер и засекали время истечения продукта.

Для проведения эксперимента брались 3 образца: образец 1 – Advance 2.0, образец 2 – St-Body-4, образец 3 – АВТ-5 - Probio-Тес™.

Наибольшее время истечения имел образец 2, который обладал более гу-

стой консистенцией. Образцы, сквашенные заквасочными культурами Advance 2.0 и АВТ-5 - Probio-Тес™, имели менее вязкую консистенцию, о чём свидетельствует диаграмма на рисунке.

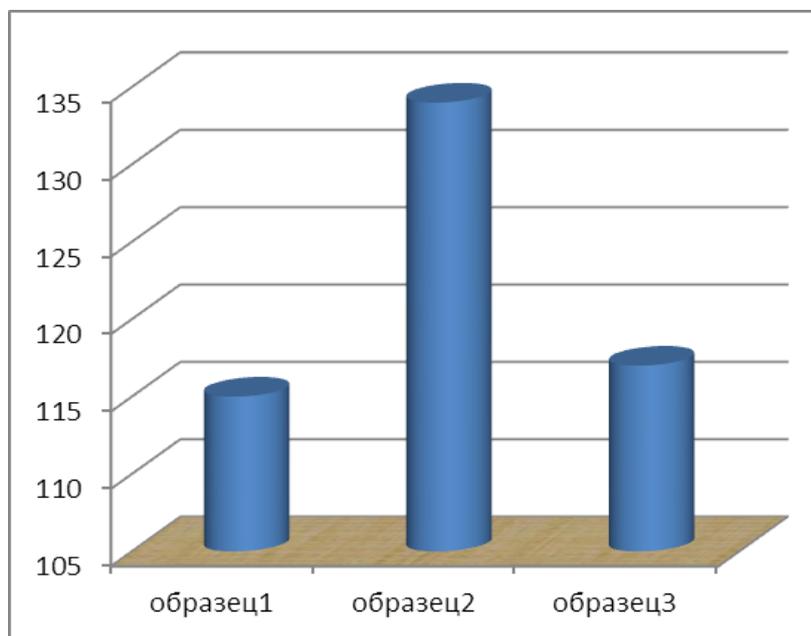


Рисунок – Время истечения (вязкость) контрольных образцов кисломолочных напитков

Немаловажное значение для производства ферментированных напитков, в частности, из козьего молока имеют органолептические показатели, поскольку козье молоко обладает специфическим запахом.

Органолептическую оценку проводили по общепринятой 100-бальной шкале. Наивысшую оценку получил образец, сквашенный заквасочными культурами АВТ-5 - Probio-Тес™ [6]. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Бальная оценка органолептических показателей напитков

Наименование продукта	Цвет	Вкус	Послевкусие	Запах	Консистенция	Общее число баллов
Образец 1	20	18	17	18	18	91
Образец 2	20	17	15	16	17	85
Образец 3	20	19	19	19	20	97

Заключение

Таким образом, в качестве заквасочной культуры для производства кисломолочного напитка из козьего молока можно использовать АВТ-5 - Probio-

Тес™, использование которой позволяет получить кисломолочный напиток с однородной нежной консистенцией, кисломолочным вкусом и ароматом без выраженного привкуса козьего молока.

Библиографический список

1. Гаврилова Н.Б., Щетинина Е.М. Козье молоко – биологически полноценное сырье для специализированной пищевой продукции // Хранение и переработка сельхозсырья. 2019. № 1. С. 66-71.
2. Остроумова Т.Л., Фриденберг Г.В., Волкова Л.Г. Козье молоко – натуральная формула здоровья // Молочная промышленность. 2005. № 8. С. 69-70.
3. Суюнчев О.А., Самойлов В.А., Нестеренко П.Г. Новые технологии продуктов из козьего молока // Сыроделие и маслоделие. 2006. № 1. С. 44-45.
4. Хамагаева И.С., Бояринаева И.В., Потапчук Н.Ю. Исследование пробиотических свойств комбинированной закваски // Техника и технология пищевых производств. 2013. № 1. С. 1-5.
5. Сарафанова Л.А. Современные пищевые ингредиенты. Особенности применения. - СПб.: Профессия, 2009. - 208 с.
6. Гашева М.А. Подбор сырья и основных компонентов для производства кисломолочного напитка из козьего молока // Новые технологии. 2020. Т. 16 № 6. С. 13-19.

References

1. Gavrilova N.B., SHCHetinina E.M. Koz'e moloko – biologicheski polnocennoe syr'e dlya specializirovannoj pishchevoj produkcii // Hranenie i pererabotka sel'hozsyr'ya. 2019. № 1. S. 66-71.
2. Ostroumova T.L., Fridenberg G.V., Volkova L.G. Koz'e moloko – natural'naya formula zdorov'ya // Molochnaya promyshlennost'. 2005. № 8. S. 69-70.
3. Suyunchev O.A., Samojlov V.A., Nesterenko P.G. Noveye tekhnologii produktov iz koz'ego moloka // Syrodellie i maslodellie. 2006. № 1. S. 44-45.
4. Hamagaeva I.S., Boyarineva I.V., Potapchuk N.Y. Issledovanie probioticheskikh svojstv kombinirovannoj zakvaski // Tekhnika i tekhnologiya pishchevyh proizvodstv. 2013. № 1. S.1-5.
5. Sarafanova L.A. Sovremennye pishchevye ingredienty. Osobenno-sti primeneniya. - SPb.: Professiya, 2009. - 208 s.
6. Gasheva M.A. Podbor syr'ya i osnovnyh komponentov dlya proizvodstva kislomolochnogo napitka iz koz'ego moloka // Noveye tekhnologii. 2020. T. 16 № 6. S. 13-19.

Статья поступила 16.11.2020 г.

© М.А. Гашева, 2021

Сведения об авторе

List of Author

Гашева Марзият Асланчериевна – кандидат технических наук, доцент кафедры пищевых продуктов и организации питания Майкопского государственного технологического университета.

Marziyat Gasheva – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food Products and Catering, Maikop State Technological University.

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ НА СКАЛЫВАНИЕ ДЕРЕВЯННЫХ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНЫМ АНТИСЕПТИРОВАНИЕМ

О.С. Емельянова, А.А. Ефимов

Тюменский индустриальный университет, Тюмень
oksana-emelyanova-98@mail.ru

Аннотация. Разрушение древесины, вызванное высоким уровнем касательных напряжений, называется скалыванием. Скалывание, наряду с растяжением поперек волокон, является наиболее слабым видом сопротивления древесины. Характер разрушения – хрупкий. В строительные нормы введен параметр, учитывающий влияние дополнительного касательного на итоговую величину. Проведен обзор изменения строительных нормативов и предложен способ повышения прочности деревянных внецентренно сжатых элементов на скалывание, вызванное касательными напряжениями, за счет пропитки антисептическими составами под давлением.

Abstract. The destruction of wood caused by a high level of shear stresses is called chipping. Chipping, along with stretching across the grain, is the weakest form of wood resistance. The nature of the destruction is fragile. A parameter has been introduced into building codes that takes into account the effect of an additional tangent on the total value. A review of changes in building standards is carried out and a method is proposed to increase the strength of wooden eccentrically compressed elements against shear stress caused by impregnation with antiseptic compounds under pressure.

Ключевые слова: деревянные конструкции, прочность на скалывание, внецентренное сжатие, касательные напряжения, модификаторы.

Key words: wooden structures, shear strength, eccentric compression, shear stresses, modifiers.

Введение

Древесина, как строительный материал, отличается высокими механическими, теплотехническими свойствами, имеет ценные конструктивные свой-

ства. При низкой плотности древесина имеет высокую прочность (коэффициент конструктивного качества), обеспечивает индивидуальность изготовления строительных деталей. Все это обу-

славливает экономическую целесообразность широкого применения древесины для изготовления деревянных конструкций.

Зачастую в практике строительства упускаются из виду известные с давних времен средства и способы совершенствования древесины, которые не могли быть оценены ранее в силу отсутствия тогда современных технологий и возможностей. Сегодня они могли бы приобрести новую силу и расширить ареал применения древесины.

«Переоткрывание» старых способов и методов улучшения свойств материала требует больших затрат финансов и времени, но изучение архивных работ может ускорить исследование и навести на правильное направление дальнейшего использования старого опыта. Основополагающими открытиями в области консервирования древесины стали работы В.И. Герценштейна, А.В. Сапожникова, С.И. Ванина. Защиту пиломатериалов изучали профессора А.А. Юницкий, Г.С. Судейкин, Н.Ф. Слудский, В.В. Миллер [1].

Прочность древесины реальных элементов конструкций резко снижается за счет неоднородности строения древесины [2]. Согласно положениям сопротивления материалов и научным основам проектирования и конструирования надёжных изделий, при приложении внешней нагрузки, кроме нормальных напряжений, могут возникать и касательные, действующие в плоскости поперечного сечения и вызывающие сдвиг слоев древесины. Наибольшие касательные напряжения действуют по площадке, делящей пополам угол между наибольшим и наименьшим главным напряжением. Они равны половине

разницы между главными напряжениями.

Оценка прочности древесины при скалывании вдоль волокон является наиболее распространенной, потому что при проведении данного вида испытаний моделируется часто встречаемый тип нагрузки балок и ферм большой длины в процессе их эксплуатации. Это особенно важно для элементов, имеющих криволинейную форму и изготовленных путем склеивания [3].

Согласно актуальному СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции» расчет на прочность по скалыванию внецентренно сжатых элементов производится по формуле [4]:

$$\frac{QS'_{бр}}{I_{бр}b_{рас}} + \Delta\tau \leq R_{ск},$$

где первое слагаемое учитывает касательное напряжение от действия поперечной силы, а второе слагаемое – дополнительное касательное напряжение при эксцентричной передаче продольной силы во внецентренно сжатые элементы.

Цель данного исследования заключается в определении степени влияния $\Delta\tau$ на общую величину касательных напряжений и нахождении способа повышения прочности древесины при этом типе воздействия.

Параметр $\Delta\tau$ появился в строительных нормах в 2011 году в СП 64.13330.2011 (формула 35 п. 6.18) [5]. В предыдущих редакциях этого документа (СНиП II-V.4-62, СНиП II-V.4-71*, СНиП II-25-80) дополнительное касательное напряжение не учитывалось, и расчет сжато-изгибаемых и внецентренно сжатых элементов на прочность по скалыванию не осуществлялся [6-8].

Ввиду этого, актуальной задачей является определение более точного влияния внецентренной нагрузки на напряженно-деформированное состояние деревянных конструкций.

Проблематика научного исследования выбранной темы заключена в том, что, несмотря на изучение и использование новых нормативных документов инженерами-конструкторами, вопрос появления нового компонента формулы не освещался в научной литературе, а результаты экспериментальных исследований, предшествующих изменениям в своде правил, отсутствуют в публичном доступе. Это требует развития данного направления исследований.

Принципы проектирования, заложенные в 1940-1950-х годах, обеспечивают надёжность зданий и сооружений, однако часто приводят к необоснованному перерасходу материалов, отклонению результатов расчета от фактического распределения внешних усилий, «...особенно в элементах, находящихся в сложном напряженном состоянии»[9]. Развитие теории расчетов строительных конструкций на надежность получило большой скачок после монографии [10].

Заведующий лабораторией деревянных конструкций ЦНИИСК им. Кучеренко и руководитель разработки СП 64.13330.2011 Погорельцев А.А. подчеркивает, что «постоянно проводятся работы по совершенствованию норм проектирования конструкций из дерева и конструктивных пластиков» [11].

После ряда сравнительных вычислений различных внецентренно сжатых конструкций очевидно, что новый компонент $\Delta\tau$ значительно влияет на величину касательных напряжений. Неучет

этой нагрузки может существенно сказаться на величине и характере распределения касательных напряжений, которые могут повлечь разрушение от скалывания в приопорных зонах, особенно при больших нагрузках, что и делает актуальным вопрос модифицирования древесины.

Материалы и методы исследования

Основными методами исследования были выбраны эксперимент, измерение и расчет. В качестве объектов исследования принята широко распространенная в строительной отрасли хвойная древесина второго сорта. Модифицирование древесины осуществлялось 10% раствором тетрабората натрия (буры) и борной кислоты в соотношении компонентов 1,54:1. Борная кислота, согласно [1], обладает антисептическими и антипиренными свойствами. Кроме того, древесину, пропитанную данным антисептиком, можно утилизировать – сжечь (этот вид антисептиков относится к IV классу опасности по ГОСТ 12.1.007-76 [12], специальные меры для утилизации золы не требуются).

Пропитка антисептическими составами в автоклаве под давлением (импрегнация) – наиболее эффективный метод защиты древесины. При такой обработке антисептический состав проникает глубоко в поры древесины и заполняет ее. Антисептирование с использованием способа «вакуум-давление-вакуум» позволяет ввести в древесину наибольшее количество раствора на наибольшую глубину. Для лучшего проникновения антисептического раствора в поры древесины перед началом обработки из автоклава отка-

чивается весь воздух, после чего в него поступает антисептический раствор, который под действием избыточного гидравлического давления заполняет освобожденные от воздуха поры древесины. Благодаря понижению давления в древесине, при восстановлении атмосферного давления в автоклаве, раствор с поверхности втягивается внутрь пиломатериала.

Десять образцов были помещены в автоклав при вакууме 0,07 МПа на 60 минут, затем под давлением 1 МПа на 2,5 часа, и при повторном вакууме 0,07 МПа на 40 минут для просушки материала. Геометрические размеры исполь-

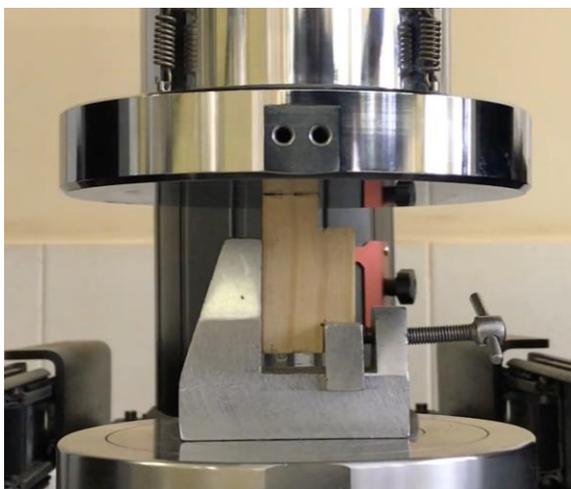
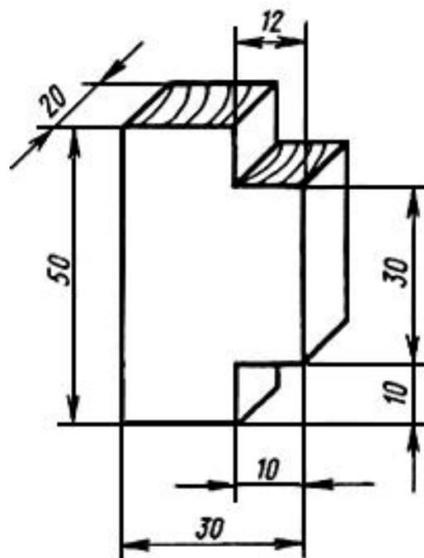
зованных образцов представлены на рисунке 1.

Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 16483.5-73 «Древесина. Методы определения предела прочности при скалывании вдоль волокон» [13].

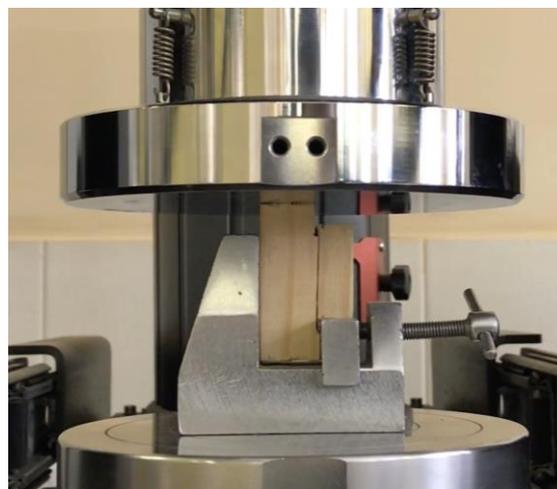
Результаты

На испытательной машине были проверены 10 образцов влажностью 30% без модификаций и 10 образцов, подвергнутых вакуумному антисептированию. На рисунке 2 представлен образец до приложения нагрузки и после разрушения.

Рисунок 1 – Геометрические характеристики испытываемых образцов



а)



б)

Рисунок 2 – Образец до проведения испытания (а) и после разрушения (б)

Результаты с учетом коэффициента пересчета по влажности, полученные в ходе эксперимента, приведены в таблице. Рост прочности древесины на скалывание при вакуумном антисептировании наглядно виден из рисунка 3.

Таблица – Прочность образцов на скалывание в кг/см²

Образец	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9	№ 10	Ср.знач.
Без пропитки	43.4	40.5	42.8	42.0	42.2	43.2	40.3	40.2	43.7	42.9	42.1
С пропиткой	47.8	49.9	48.0	47.7	48.9	48.4	47.9	49.8	49.5	49.6	48.7

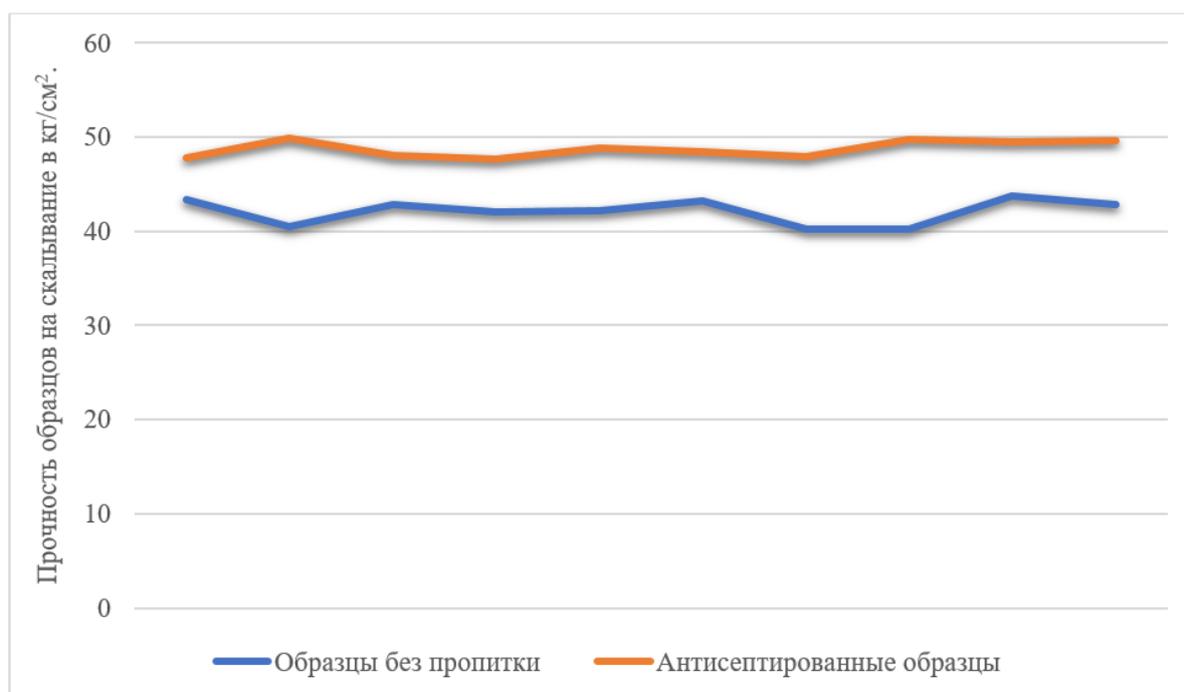


Рисунок 3 – Результаты испытания образцов на прочность при скалывании вдоль волокон

Заключение

Данные испытаний показывают, что пропитка антисептиком увеличивает прочность на скалывание более чем на 15%. На основе проведенного эксперимента можно сделать вывод, что вакуумное антисептирование 10% раствором тетрабората натрия и борной кислоты является эффективным модификатором древесины, так как не только защищает материал от огневых и биологических воздействий, но и повышает прочность строительной конструкции и надежность всего сооружения. Дре-

вина, прошедшая подобную обработку, может быть использована для наружного применения в условиях постоянного контакта с грунтом и атмосферного воздействия.

В перспективе будут проведены исследования с увеличением количества образцов для получения достоверной выборки и уточнения результатов эксперимента. Будут сравниваться различные модификаторы древесины для нахождения оптимального способа улучшения свойств материала с минимальными затратами.

Библиографический список

1. Горшин С.Н. Консервирование древесины. – М.: Лесная промышленность, 1977. – 336 с.
2. Устарханов Т.О., Ирзаев Г.Г., Вишталов Р.И. Усиление напряженных зон дощатоклееной балки армированием углеродной тканью // Научные исследования: итоги и перспективы. 2020. Т. 1. № 3. С. 38-44.
3. Чубинский А.Н., Тамби А.А., Варанкина Г.С., Федяев А.А., Чубинский М.А., Швец В.Л., Чаузов К.В. Физические методы испытаний древесины. - СПб.: СПбГЛТУ, 2015. - 125 с.
4. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80: утв. Министерством строительства и ЖКХ РФ 27.02.2017: введ. в действие с 28.08.2017. – М.: Минстрой России, 2017. - 105 с.
5. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80: утв. Министерством строительства и ЖКХ РФ 28.12.2010: введ. в действие с 20.05.2011. – М.: Минстрой России, 2011. – 92 с.
6. СНиП II-В.4-62. Деревянные конструкции: утв. Госстрой СССР 20.01.1962: введ. в действие с 01.04.1962. – М.: Госстрой СССР, 1962. – 83 с.
7. СНиП II-В.4-71*. Деревянные конструкции: утв. Госстрой СССР 06.10.1971: введ. в действие с 01.07.1971. – М.: Госстрой СССР, 1978. – 77 с.
8. СНиП II-25-80. Деревянные конструкции: утв. Госстрой СССР 18.12.1980: введ. в действие с 01.01.1982. – М.: Госстрой СССР, 1985. – 33 с.
9. Ведяков И.И., Погорельцев А.А., Пятикрестовский К.П. Перспективы совершенствования норм проектирования деревянных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 4. С. 28-32.
10. Ротштейн Д.М. Вероятностные методы в расчетах надежности строительных конструкций: монография. – Тюмень: ТИУ, 2017. – 92 с.
11. Погорельцев А.А., Пятикрестовский К.П. Дальнейшее развитие и совершенствование норм проектирования конструкций из древесины // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 3. С. 35-41.
12. ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – М.: Изд. стандартов, 1976. - 7 с.
13. ГОСТ 16483.5-73. Древесина. Методы определения предела прочности при скалывании вдоль волокон. – М.: Изд. стандартов, 1973. - 7 с.

References

1. Gorshin S.N. Konservirovanie drevesiny. – M.: Lesnaya promyshlennost', 1977. – 336 s.
2. Ustarhanov T.O., Irzaev G.G., Vishtalov R.I. Usilenie napryazhennykh zon doshchatokleenoj balki armirovaniem uglerodnoj tkan'yu // Nauchnye issledovaniya: itogi i perspektivy. 2020. T. 1. № 3. S. 38-44.
3. SHubinskij A.N., Tambi A.A., Varankina G.S., Fedyaev A.A., SHubinskij M.A., SHvec V.L., SHauzov K.V. Fizicheskie metody ispytaniy drevesiny. - SPb.: SPbGLTU, 2015. - 125 s.
4. SP 64.13330.2017. Derevyannye konstrukcii. Aktualizirovannaya redakciya SNiP II-25-80: utv. Ministerstvom stroitel'stva i ZHKKH RF 27.02.2017: vved. v dejstvie s 28.08.2017. – M.: Minstroj Rossii, 2017. - 105 s.
5. SP 64.13330.2011. Derevyannye konstrukcii. Aktualizirovannaya redakciya SNiP II-25-80: utv. Ministerstvom stroitel'stva i ZHKKH RF 28.12.2010: vved. v dejstvie s 20.05.2011. – M.:

Minstroy Rossii, 2011. – 92 s.

6. SNiP II-V.4-62. Derevyannye konstrukcii: utv. Gosstroj SSSR 20.01.1962: vved. v dejstvie s 01.04.1962. – M.: Gosstroj SSSR, 1962. – 83 s.

7. SNiP II-V.4-71*. Derevyannye konstrukcii: utv. Gosstroj SSSR 06.10.1971: vved. v dejstvie s 01.07.1971. – M.: Gosstroj SSSR, 1978. – 77 s.

8. SNiP II-25-80. Derevyannye konstrukcii: utv. Gosstroj SSSR 18.12.1980: vved. v dejstvie s 01.01.1982. – M.: Gosstroj SSSR, 1985. – 33 s.

9. Vedyakov I.I., Pogorel'cev A.A., Pyatikrestovskij K.P. Perspektivy sovershenstvovaniya norm proektirovaniya derevyannykh konstrukcij // Promyshlennoe i grazhdanskoje stroitel'stvo. 2015. № 4. S. 28-32.

10. Rotshtejn D.M. Veroyatnostnye metody v raschetah nadezhnosti stroitel'nykh konstrukcij: monografiya. – Tyumen': TIU, 2017. – 92 s.

11. Pogorel'cev A.A., Pyatikrestovskij K.P. Dal'nejshee razvitie i sovershenstvovanie norm proektirovaniya konstrukcij iz drevesiny // Promyshlennoe i grazhdanskoje stroitel'stvo. 2019. № 3. S. 35-41.

12. GOST 12.1.007-76. Sistema standartov bezopasnosti truda. Vrednye veshchestva. Klassifikaciya i obshchie trebovaniya bezopasnosti. – M.: Izd. standartov, 1976. - 7 s.

13. GOST 16483.5-73. Drevesina. Metody opredeleniya predela prochnosti pri ska-lyvanii vdol' volokon. – M.: Izd. standartov, 1973. - 7 s.

Статья поступила 14.12.2020 г.

© О.С. Емельянова, А.А. Ефимов, 2021

Сведения об авторах
List of Authors

Емельянова Оксана Сергеевна – магистрант кафедры строительных конструкций строительного института Тюменского индустриального университета.

Oksana Emelyanova – Master student, Department of Building Structures, Building Institute, Tyumen Industrial University.

Ефимов Александр Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций строительного института Тюменского индустриального университета.

Alexander Efimov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Building Structures, Building Institute, Tyumen Industrial University.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АККУМУЛЯТОРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Ф.А. Рябцев, А.В. Климов, И.В. Ухов, М.Ю. Карелина

Московский автомобильно-дорожный государственный технический
университет, Москва
ryabtsev.fedor@yandex.ru

Аннотация. Разработана имитационная модель шасси электрического грузового автомобиля для расчёта электрических параметров тягового электрооборудования. Математическое моделирование в среде программ Simulink и Power System Blockset позволяет провести верификацию выполнения требований к компонентам тягового электрооборудования, используемого на грузовом электромобиле.

Abstract. A simulation model of the chassis of an electric truck has been developed for calculating the electrical parameters of traction electrical equipment. Mathematical modeling in the Simulink and Power System Blockset software environment allows verification of the fulfillment of the requirements for the components of traction electrical equipment used on an electric truck.

Ключевые слова: имитационная модель, тяговое электрооборудование, электромобиль, тяговый электрический привод, тяговая аккумуляторная батарея, Matlab, Simulink.

Keywords: simulation model, traction electrical equipment, electric vehicle, traction electric drive, traction battery, Matlab, Simulink.

Введение

В последнее время в связи с развитием ряда таких факторов, как истощение нефтяных ресурсов, повышение экологических требований к автомобилям и других, стали разрабатываться и приобретать популярность электромобили. Сложность проведения реальных

испытаний электрического транспортного средства (ТС), а также необходимость снижения временных и материальных затрат обусловили разработку и использование имитационного моделирования [1]. Помимо этого имитационная модель позволяет более подробно описать процессы управления тяговым

электрооборудованием и подобрать подходящую компонентную номенклатуру для ее реализации. С помощью имитационных моделей, описывающих поведение систем, разработчики имеют возможность гибко и оптимально предъявлять требования как к компонентам, так и ко всему транспортному средству, а также проводить верификацию выполнения требований к ним [2]. Модель позволяет производить выбор и отладку стратегии и алгоритмов управления системами, что особенно важно при проектировании новых перспективных образцов аккумуляторных транспортных средств с тяговым электрическим приводом.

Экспериментальная часть

Система Matlab со своими пакетами расширения принята в качестве основ-

ного инструмента изучения и расчета энергетических показателей электро-мобиля, потому что она позволяет решить широкий спектр задач, связанных с расчётом и обработкой данных в реальном времени, с использованием встроенных функций и алгоритмов [3].

Основными пакетами расширения, которые использованы при исследовании, являются Simulink [4] и Power System Blockset. Широко развитое расширение Simulink в наибольшей степени приспособлено для анализа и синтеза различных систем. Разработанные тематические модели в Sim Power Systems и SimDriveline могут быть объединены в одну общую модель. Для расчётов было выбрано аккумуляторное ТС с тяговым электрическим приводом, характеристики которого указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры транспортного средства

№	Параметр	Обозначение	Значение
1	Полная масса автомобиля, кг	m	11900
	на переднюю ось, кг		4350
	на заднюю ось, кг		7550
2	Снаряжённая масса, кг	m_c	5700
3	Колёсная формула транспортного средства		4x2
4	Максимальная скорость автомобиля, км/ч	V_{max}	90
5	Габаритная высота, м	H	3,8
6	Габаритная ширина, м	B	2,55
7	Размер шины	-	245/70R19,5
8	Масса колеса, кг	m_k	63

Для описания поведения систем тягового электрического привода и соответствующих законов управления [5, 6] необходимо сформировать обобщенную имитационную модель электро-мобиля, состоящую из следующих основных узлов: модели электрической машины (электродвигателя); модели тяго-

вой аккумуляторной батареи [7, 8]; модели устройства механического сопряжения электродвигателя с колесами; модели несущей системы, ходовой части, движителя – ведущих колес. Структурная схема предлагаемой обобщенной модели изображена на рисунке 1.

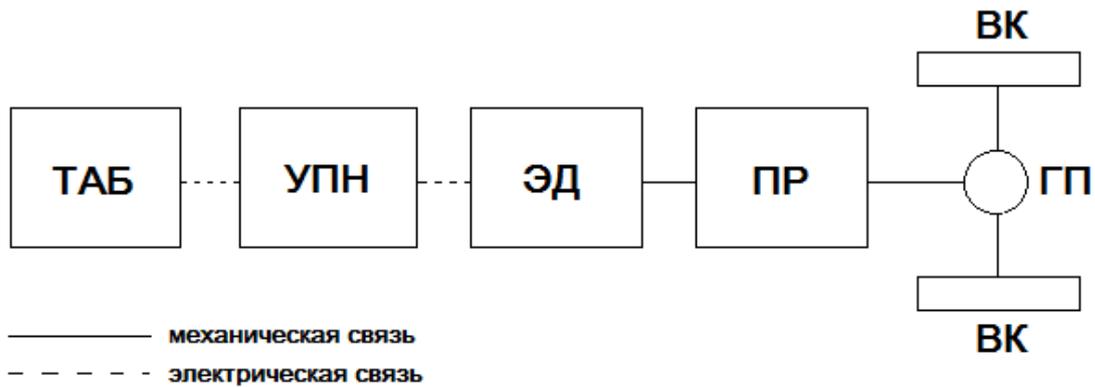


Рисунок 1 – Структурная схема модели электромобиля

ТАБ – тяговая аккумуляторная батарея; УПН – устройство преобразования напряжения; ЭД - электродвигатель; ПР – привод; ВК – ведущее колесо; ГП – гидропривод

Функциональная схема обобщенной модели системы тягового электрооборудования электромобиля представлена на рисунке 2 [9].

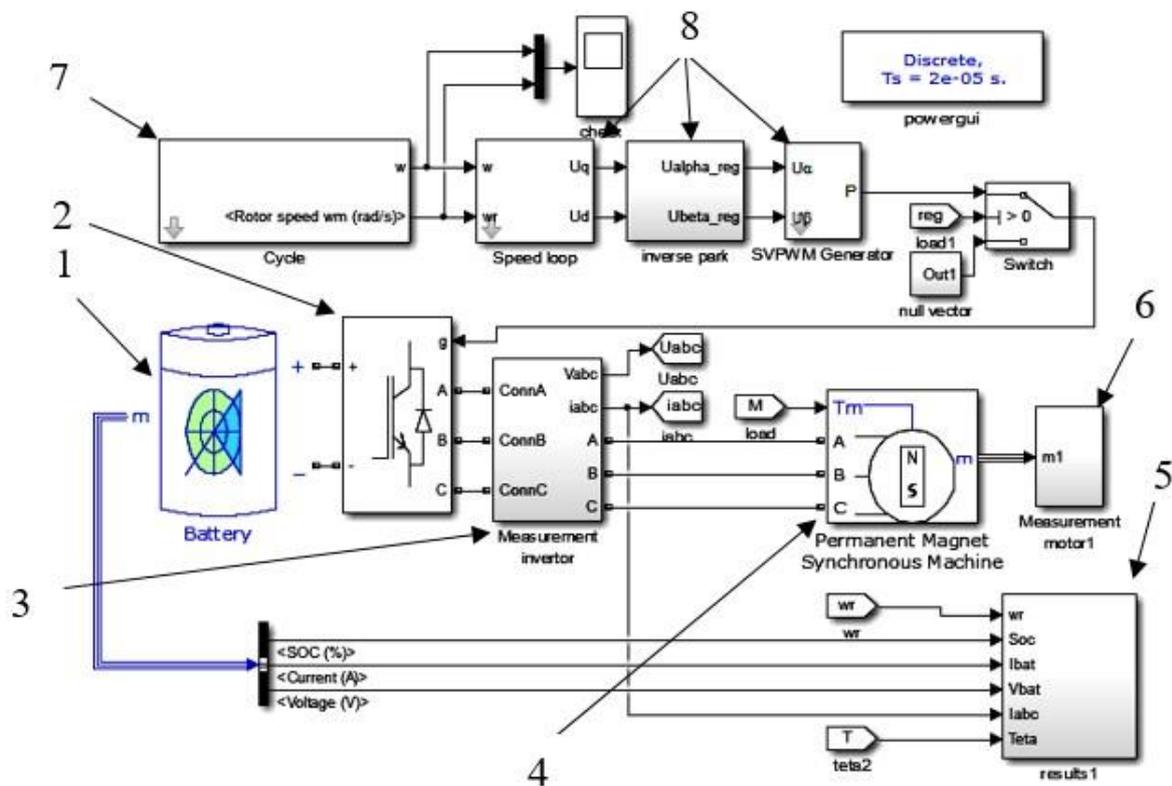


Рисунок 2 – Имитационная модель тягового электрооборудования грузового автомобиля

1 – тяговая аккумуляторная батарея, 2 – тяговый инвертор, 3 – блок преобразования физических величин, 4 – синхронный электродвигатель с постоянными магнитами, 5 – блок вывода параметров батареи, 6 – блок вывода параметров электродвигателя, 7 – имитационная модель несущей системы, ходовой части и движителя, 8 – система управления приводом имитационная модель расчёта нагрузки

Результаты

Данная имитационная модель позволяет проводить исследования работы тягового электрооборудования автомобиля [10, 11], результаты которых представлены на рисунках ниже. На рисунке 3 представлен цикл движения для типовых исследований энергоэффективности транспортных средств.

График зависимости мощности, ча-

стоты вращения, крутящего момента от времени показан на рисунке 4. Энергетические характеристики в испытательном цикле показаны на рисунке 5. Степень заряженности батареи в цикле показана на рисунке 5. В конце движения зарядность батареи составила 90 %.

Результаты исследования для рассматриваемого транспортного средства приведены в таблице 2.

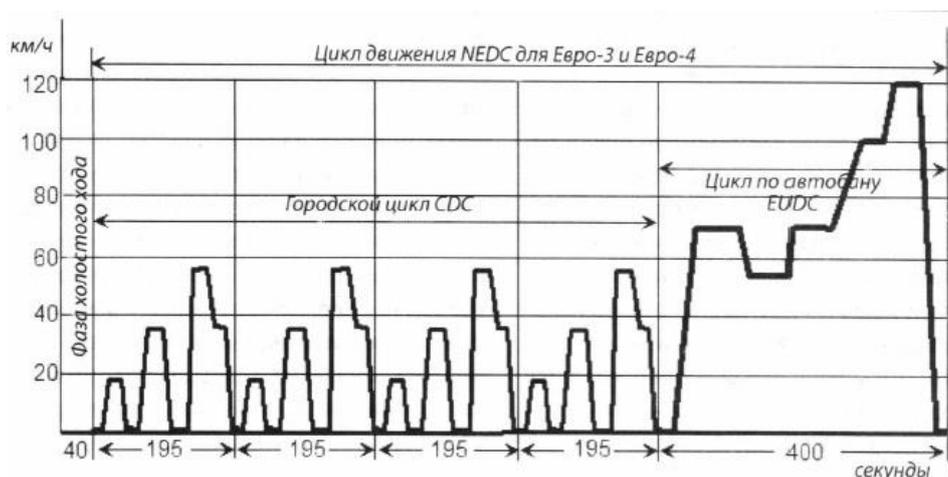


Рисунок 3 – Цикл движения

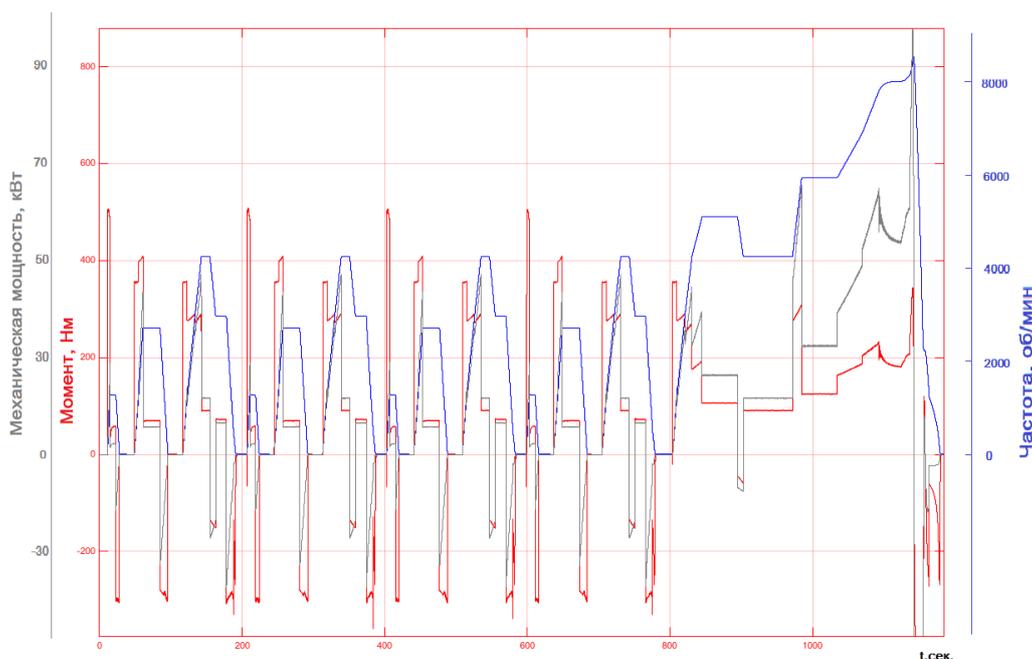


Рисунок 4 – Результаты моделирования в среде Matlab Simulink

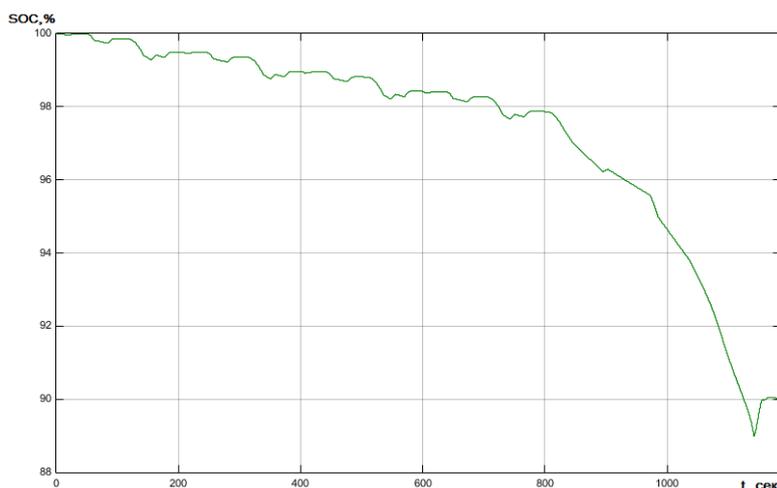


Рисунок 5 – Степень заряженности батареи в цикле

Таблица 2 – Удельный расход энергии

V_{cp} , км/ч	M_{TC} , кг	
	6200	11900
18,77	1,116	1,378
33,60	1,449	1,764

На основании расчетных данных было составлено эмпирическое уравнение, позволяющее определить удель-

ный расход энергии (кВт·ч/км) для исследуемого транспортного средства в натуральных переменных:

$$E_{y\partial} = 0,463 + 19,7 \cdot 10^{-3} v_{cp} + 37,6 \cdot 10^{-6} M_{mc} + 0,47 \cdot 10^{-6} v_{cp} M_{mc}$$

где M_{TC} – масса ТС, кг; v_{TC} – средняя эксплуатационная скорость движения ТС, км/ч.

энергетических характеристик и других транспортных средств при их разработке и выборе параметров основного источника энергии.

Из уравнения видно, что большее влияние на величину удельного расхода оказывает скоростной режим движения на маршруте при выполнении транспортной работы в качестве средней эксплуатационной скорости цикла движения. Описанная математическая модель и эмпирическое уравнение могут быть использованы при анализе

Заключение

Разработанная имитационная модель дает возможность проводить эксперименты в виде виртуального моделирования транспортного средства в различных дорожных и эксплуатационных условиях.

Библиографический список

1. Литвинов А.С., Фаробин Я.Е. Автомобиль. Теория эксплуатационных свойств. - М.: Машиностроение, 1989. - 240 с.
2. Климов А.В., Ухов И.В., Рябцев Ф.А., Карелина М.Ю. Об эквивалентных режимах работы трансмиссий транспортных средств с тяговым электроприводом // Научные исследования: итоги и перспективы. 2020. Т. 1. № 1. С. 61-68.

3. Matlab [электронный ресурс]: [официальный сайт]. Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/examples.html> (дата обращения 05.04.2020).
4. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений / Под общ. ред. В.Г. Потемкина. - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. - 496 с.
5. Инженерные решения // Интеграция систем контроля, автоматизации и мониторинга [электронный ресурс]: www.engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm (дата обращения 05.04.2020).
6. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование, заметки практика [электронный ресурс]: [официальный сайт]. http://www.privod-news.ru/docs/Vector_Kalachev.pdf (дата обращения 10.04.2020).
7. Chan C.C. and Chau K.T. Modern Electric Vehicle Technology, Oxford University Press; 1 edition (November 15, 2001).
8. Котиев Г.О., Горелов В.А., Бекетов А.А. Математическая модель движения вездеходного транспортного средства // Журнал автомобильных инженеров. 2008. № 1 (48). С. 50-54.
9. ГОСТ Р EN 1986-1-2011. Автомобили с электрической тягой. Измерение энергетических характеристик. Ч. 1. Электромобили. - М.: Стандартинформ, 2012. - 40 с.
10. Климов А.В., Кондрашкин В.В. Применение техники с комбинированными энергоустановками в коммунальном хозяйстве // Труды НАМИ. 2014. № 257. С. 76-82.
11. Смирнов А.А., Пикалов Н.А. Определение потребной энергоемкости накопителей электробуса методами имитационного моделирования // Инженерный вестник. 2016. № 12. С. 43-52.

References

1. Litvinov A.S., Farobin YA.E. Avtomobil'. Teoriya ekspluatatsionnykh svoystv. - M.: Mashinostroenie, 1989. - 240 s.
2. Klimov A.V., Uhov I.V., Ryabcev F.A., Karelina M.YU. Ob ekvivalentnykh rezhimakh raboty transmisiy transportnykh sredstv s tyagovym elektroprivodom // Nauchnye is-sledovaniya: itogi i perspektivy. 2020. T. 1. № 1. S. 61-68.
3. Matlab [электронный ресурс]: [официальный сайт]. Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/examples.html> (дата обращения 05.04.2020).
4. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений / Под общ. ред. В.Г. Потемкина. - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. - 496 с.
5. Инженерные решения // Интеграция систем контроля, автоматизации и мониторинга [электронный ресурс]: www.engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm (дата обращения 05.04.2020).
6. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование, заметки практика [электронный ресурс]: [официальный сайт]. http://www.privod-news.ru/docs/Vector_Kalachev.pdf (дата обращения 10.04.2020).
7. Chan C.C. and Chau K.T. Modern Electric Vehicle Technology, Oxford University Press; 1 edition (November 15, 2001).
8. Котиев Г.О., Горелов В.А., Бекетов А.А. Математическая модель движения вездеходного транспортного средства // Журнал автомобильных инженеров. 2008. № 1 (48). С. 50-54.
9. ГОСТ Р EN 1986-1-2011. Автомобили с электрической тягой. Измерение энергетических характеристик. Ч. 1. Электромобили. - М.: Стандартинформ, 2012. - 40 с.

10. Klimov A.V., Kondrashkin V.V. Primenenie tekhniki s kombinirovannymi energo-ustanovkami v kommunal'nom hozyajstve // Trudy NAMI. 2014. № 257. S. 76-82.

11. Smirnov A.A., Pikalov N.A. Opredelenie potrebnoy energoemkosti nakopitelej elektrobusa metodami imitacionnogo modelirovaniya // Inzhenernyj vestnik. 2016. № 12. S. 43-52.

Статья поступила 18.09.2020 г.

© Ф.А. Рябцев, А.В. Климов, И.В. Ухов, М.Ю. Карелина, 2021

Сведения об авторах
List of Authors

Рябцев Федор Александрович – студент Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета.

Fyodor Ryabtsev – Student of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University.

Климов Александр Владимирович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры деталей машин и теории механизмов Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета.

Alexander Klimov – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Machine Parts and Theory of Mechanisms, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University.

Ухов Иван Владимирович – студент Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета.

Ivan Ukhov – Student of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University.

Карелина Мария Юрьевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой деталей машин и теории механизмов Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета.

Maria Karelina – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Machine Details and Theory of Mechanisms, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University.

**НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ:
итоги и перспективы
2021 № 1 (Том 2)**

**SCIENTIFIC RESEARCHES:
results and prospects
2021 № 1 (Vol. 2)**

Ответственный за выпуск – Ирзаев Г.Х.
Компьютерная верстка – Алиева П.А.
Дизайн обложки – Тагиев М.Х.

Подписано в печать 15.03.2021 г. Дата выхода в свет 27.03.2021 г.
Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 9,47. Уч.-изд. л. 3,92. Тираж 500. Заказ № 759

Электронная версия журнала
«Научные исследования: итоги и перспективы»
размещена на сайте www.dstu.ru

Учредитель/редакция/издатель
Дагестанский государственный технический университет
Адрес: 367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70.
Тел. +7 (8722) 62 37 15
E-mail: naukajournal@mail.ru

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ИП Тагиева Р.Х.
г. Махачкала, ул. Батырая, 149. Тел.: 8 928 048 10 45

“ ф о р м а т ”