АКАДЕМИЯ ECTECTBO3HAHИЯ «ACADEMY OF NATURAL HISTORY»

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED AND FUNDAMENTAL RESEARCH

Журнал основан в 2007 году The journal is based in 2007 ISSN 1996-3955 Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,564

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,312

№ 8 2022 Научный журнал Scientific journal

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

Подписной индекс по электронному каталогу «Почта России» – ПИ140

Электронная версия размещается на сайте <u>www.rae.ru</u>
The electronic version takes places on a site www.rae.ru

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР к.м.н. Н.Ю. Стукова Ответственный секретарь к.м.н. М.Н. Бизенкова EDITOR Natalia Stukova Senior Director and Publisher Maria Bizenkova

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED AND FUNDAMENTAL RESEARCH

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ.

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

Журнал представлен в ведущих библиотеках страны и является рецензируемым. Журнал представлен в НАУЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ БИБЛИОТЕКЕ (НЭБ) — головном исполнителе проекта по созданию Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) и имеет импакт-фактор Российского индекса научного цитирования (ИФ РИНЦ).

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,564. Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,312.

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

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

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

ISSN 1996-3955

Тел. редакции — 8-(499)-704-13-41 Факс (845-2)-47-76-77

E-mail: edition@rae.ru

Зав. редакцией Т.В. Шнуровозова Техническое редактирование и верстка Е.Н. Доронкина Корректор Е.С. Галенкина, Н.А. Дудкина

Подписано в печать -31.08.2022 Дата выхода номера -30.09.2022

Формат 60х90 1/8 Типография ООО НИЦ «Академия Естествознания» 410035, Саратовская область, г. Саратов, ул. Мамонтовой, д. 5

Распространение по свободной цене

Усл. печ. л. 10,75 Тираж 500 экз. Заказ МЖПиФИ 2022/8

© ООО НИЦ «Академия Естествознания»

СОДЕРЖАНИЕ

7
15
20
25
32
40
45
51

О НИКЕЛЕ И ХРОМЕ И ИХ СПЛАВАХ Тягунов Г.В., Тягунов А.Г., Барышев Е.Е., Вандышева И.В., Зайцева Н.А., Шмакова К.Ю., Вандышев Д.Н.	56
НАУЧНЫЙ ОБЗОР	
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДА В КАЧЕСТВЕ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЯ <i>Шатманов О.Т., Исманов Ю.Х., Маматкасымова А.Т., Бекболот К.Б.</i>	63
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ	
СТАТЬЯ	
ДВИЖЕНИЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ НЕМОНОПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ Сенницкий В.Л.	72
ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ	
СТАТЬЯ	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КАРБОНАТА КАЛИЯ ДЛЯ ВСКРЫТИЯ НЕФЕЛИНОВЫХ СИЕНИТОВ САНДЫКСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ	
Шаршенбек кызы А., Кочкорова З.Б., Мурзубраимов Б.М.	76
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ	
СТАТЬЯ	
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ПРЕДПРИЯТИЙ	81
1 000000 P /I	\times 1

CONTENTS

BIOLOGICAL SCIENCES	
ARTICLES	
ACCUMULATION OF HEAVY METALS IN EPIPHYTIC LICHENS IN DIFFERENT MICROHABITATS ON EUROPEAN SPRUCE IN THE MIDDLE TAIGA SUBZONE Kataeva M.N., Belyaeva A.I.	7
CELL DEATH AND FUNCTIONAL ACTIVITY OF NEUTROPHILS IN PATIENTS WITH CHRONIC HEART FAILURE WITH ENDOTOXEMIA Yurinskaya M.M., Vinokurov M.G., Suslikov A.V.	15
GEOLOGICAL AND MINERALOGICAL SCIENCES	
ARTICLE	
SIMPLE SOLUTIONS FOR SAFE AND EFFICIENT WELL GEOLOGY STUDIES IN THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA) Rudykh I.V.	20
MEDICAL SCIENCES	
ARTICLE	
CLINICAL AND IMMUNOLOGICAL CHARACTERISTICS AND CELL ENERGY METABOLISM ENZYMES DURING CHRONIC OBSTRUCTIVE PULMONARY DISEASE WITH FREQUENT EXACERBATIONS Kosyakova N.I., Akulenko M.V., Prokhorenko I.R.	25
REVIEW	
FEATURES OF REHABILITATION OF ATHLETES ON THE BACKGROUND OF POST-COVID SYNDROME Galimov F.Kh., Tonkachev A.S., Kaskinova I.I., Kaskinova R.I., Khalikov A.A.	32
TECHNICAL SCIENCES	
ARTICLES	
POLYMER COMPOSITE MATERIAL FOR THERMAL INSULATION AT ELEVATED TEMPERATURES Akimova A.S., Filippova L.S.	40
SLOW PYROLYSIS OF FLAX STRAW WITH OBTAINING SEMI-COKE Asilbekov A.K., Gorshkov A.S., Larionov K.B.	45
METHODS AND MEANS OF INCREASING THE EFFICIENCY OF THE TRANSFORMER HEATER Vadova L.Yu.	51
ABOUT NICKEL AND CHROME AND THEIR ALLOYS Tyagunov G.V., Tyagunov A.G., Baryshev E.E., Vandysheva I.V.,	
Zavtseva N.A. Shmakova K.Yu. Vandyshev D.N.	56

REVIEW	
PROSPECTS FOR USING HYDROGEN AS AN ENERGY CARRIER Shatmanov O.T., Ismanov Yu.Kh., Mamatkasymova A.T., Bekbolot K.B.	63
PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES	
ARTICLE	
MOTION OF A HYDROMECHANICAL SYSTEM UNDER NON-MONO-PERIODIC INFLUENCES Sennitskiy V.L.	72
CHEMICAL SCIENCES	
ARTICLE	
POSSIBILITY OF POTASSIUM CARBONATE APPLICATION FOR EXPOSURE NEPHELINE SYENITES OF THE SANDYNK DEPOSIT Sharshenbek kyzy A., Kochkorova Z.B., Murzubraimov B.M.	70
ECONOMIC SCIENCES	
ARTICLE	
DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DIGITAL TRANSFORMATION OF BUSINESS PROCESSES OF ENTERPRISES Sergeev R.A.	81

СТАТЬИ

УДК 574.472:582.29

НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ЭПИФИТНЫХ ЛИШАЙНИКАХ В РАЗЛИЧНЫХ МИКРОМЕСТООБИТАНИЯХ НА ЕЛИ ЕВРОПЕЙСКОЙ В ПОДЗОНЕ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ

Катаева М.Н., Беляева А.И.

Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург, e-mail: mkmarikat@gmail.com

В работе сравниваем концентрации микроэлементов в эпифитных лишайниках и их субстратах в болотных и лесных сообществах подзоны средней тайги для уточнения оценок фоновых значений. Определено содержание химических элементов в двух видах эпифитных лишайников, *Pseudevernia furfuracea* (L.) Zopf. и *Platismatia glauca* (L.) W. L. Culb. et C. F. Culb. (Parmeliaceae), на территории Ладожско-Онежского перешейко (Ленинградская область). Изучено содержание тяжелых металлов в *P. furfuracea* в связи с влиянием кроны ели европейской в разных микроместообитаниях слынка кустарничково-сфагнового. Установлено влияние кроны двух форофитов в пологе леса на накопление микроэлементов в лишайниках. В лишайниках и субстратах обнаружены низкие содержания тяжелых металлов, которые отнесены к фоновому уровню. Талломы лишайников на стволах березы отличаются более высокими концентрациями Zn по сравнению с ветвями ели (в 2–2,8 раза) и повышенным уровнем Mn (до 6 раз). На ветвях ели в микроместообитаниях в лишайниках сильнее варьируют концентрации Pb, Cd, Mn и Fe, чем других элементов. При слабом влиянии крон в лишайниках на сухих ветвях ели в 2,26 раза снижается концентрация Mn. Концентрация Fe в лишайниках на сухих ветвях ели повышается (до 2,24 раз). Содержание Mn в лишайниках изменяется более резко под влиянием сомкнутой кроны ели.

Ключевые слова: эпифитные лишайники, средняя тайга, microelements, Pseudevernia furfuracea, Picea abies, Betula pendula

ACCUMULATION OF HEAVY METALS IN EPIPHYTIC LICHENS IN DIFFERENT MICROHABITATS ON EUROPEAN SPRUCE IN THE MIDDLE TAIGA SUBZONE

Kataeva M.N., Belyaeva A.I.

Komarov Botanical Institute RAS, Saint Petersburg, e-mail: mkmarikat@gmail.com

In this study we compare of concentrations of microelements in lichens and substrates in mire and forest communities in the middle taiga subzone to refine estimates of background values. The content of chemical elements in two species of epiphytic lichens *Pseudevernia furfuracea* (L.) Zopf. and *Platismatia glauca* (L.) W. L. Culb. et C. F. Culb. (Parmeliaceae) on the territory of the Ladoga-Onega Isthmus, Leningrad Region was determined. The content of heavy metals in *P. furfuracea* was studied in connection with the influence of the European spruce crown in different microhabitats of the dwarf shrub-sphagnum spruce type forest. The influence of crown of two phorophytes in the forest canopy on the accumulation of microelements in lichens was established. Concentrations of heavy metals in lichens and substrates that were found are referred background level. Lichen thalli on birch trunks differ from habitat on spruce branches by higher zinc concentrations (2–2,8 times) and higher Mn level (up to 6 times). On spruce branches in microhabitats in lichens the variation of concentrations of Pb, Cd, Mn, and Fe prevails over other elements. Due to weak influence of crowns in the dwarf shrub-sphagnum spruce type forest the concentration of Mn in lichens on died branches of spruce is decreased by 2.26 times. The concentration of Fe in lichens growing on died branches of spruce is higher (up to 2.24 times). The content of Mn is increased more strongly in lichens under influence of closed crown of spruce.

Keywords: epiphytic lichens, middle taiga, microelements, Pseudevernia furfuracea, Picea abies, Betula pendula

При возрастающем влиянии техногенного загрязнения на лесные сообщества необходимо изучение и оценка их состояния в естественных условиях. В регионе северо-запада европейской части мало изучен уровень загрязнения эпифитных лишайников и не установлены фоновые концентрации тяжелых металлов. Фоновые значения представляют точку отсчета для сравнений концентраций загрязняющих веществ в природных объектах.

Еловые леса, в особенности заболоченные, могут длительное время существовать, не испытывая нарушений, таких как пожа-

ры, ветровалы. В ельниках образуются разнообразные экологические условия, с ними связано высокое биологическое разнообразие лишайников. Влияние сомкнутого древостоя формирует в пространстве крон градиенты влажности и температуры. Известно, что благоприятные для роста и развития эпифитных лишайников микроклиматические условия образуются вблизи оснований стволов деревьев, в связи с поступлением осадков и испарением мохово-лишайникового яруса, другой зоной с развитием лишайников является крона деревьев. В стволовой части взрослых деревьев ели поступление

осадков меньше, условия обычно более сухие, что приводит к менее активному росту и развитию лишайников.

Развитая крона деревьев способствует задерживанию атмосферных осадков, в зависимости от древесной породы. В кроне деревьев осадки распределяются неоднородно. В кроне ели осадки распределяются по краям кроны. Для березы характерен собирающий тип кроны, с интенсивным стоком осадков по стволам. Ель имеет сбрасывающий тип кроны.

Известно, что для роста и развития лишайников важен влагообмен с атмосферой. Под пологом лесного сообщества образуется влажный микроклимат, который благоприятен для роста и развития лишайников. Древостой изменяет условия влажности в разных типах леса и на разных высотах полога. В условиях заболоченных сообществ и болот с разреженным древесным ярусом на эпифитные лишайники действуют такие экологические факторы, как высокая относительная влажность воздуха и сильная освещенность. Градиент влажности, обычный для условий под пологом леса, на болотах изменяется. Высокая влажность воздуха на болотах связана с испарением с поверхности мохово-лишайникового покрова.

Данных по накоплению тяжелых металлов в лишайниках в связи с влиянием кроны ели европейской мало. В зависимости от экологической амплитуды видов и характеристик микроместообитания содержание тяжелых металлов в видах эпифитных лишайников сем. Parmeliaceae и их субстратах не было изучено.

Цель исследования — определить фоновые концентрации металлов в эпифитных лишайниках сем. Parmeliaceae, растущих в сообществах ельников в дренированных и гидроморфных условиях на разных видах форофитов в средней тайге.

Материалы и методы исследования

Эпифитные лишайники Pseudevernia furfuracea (L.) Zopf. и Platismatia glauca (L.) W. L. Culb. et C. F. Culb. собирали в ельнике кустарничково-зеленомошном в дренированных условиях и в ельнике кустарничково-сфагновом в условиях края болота в июле – августе 2018–2019 гг. Район исследования находится в подзоне средней тайги, на северо-западе европейской части в южной части Ладожско-Онежского перешейка, юго-восток побережья Ладожского озера. Территория находится на северо-востоке Ленинградской области, Лодейнопольский район, в бассейне р. Свирь. Высота фитоценозов над уровнем моря 24-26 м. В районе отсутствуют локальные источники атмосферного загрязнения.

В ельнике кустарничково-зеленомошном в древостое основное участие принимает ель европейская *Picea abies* (L.) Кагst., присутствует береза повислая *Betula pendula* Roth. В древесном ярусе и подлеске встречаются также рябина, сосна, реже можжевельник. В мохово-лишайниковом ярусе ельника распространены зеленые мхи, из которых преобладает *Pleurozium schreberi*. Возраст этого сообщества 90—110 лет, без признаков повреждения пожаром. На ветвях ели присутствуют кустистые лишайники, виды р. *Bryoria* и *Usnea*.

Возраст низкорослых елей (2,0–2,2 м) в ельнике кустарничково-сфагновом – 95 лет, определен по радиальным спилам основания стволов. В кронах деревьев ели и на стволиках тонких берез под кронами, на ветвях, встречаются разные виды эпифитных лишайников. При интенсивном освещении в разреженном ельнике кустарничковосфагновом на ветвях, сучьях и стволах сухостойной ели более распространены темноокрашенные виды рода *Bryoria*.

Для изучения содержания тяжелых металлов были выбраны виды эпифитных лишайников с широкой экологической амплитудой, встречающиеся на разных форофитах, из групп по отношению к водному режиму гигромезофитов и мезофитов. В дренированных условиях ельника сопоставляли два типа местообитаний лишайников на разных форофитах. Образцы лишайников собирали на высоте 1,3 м, в нижней части кроны на сухих ветвях ели европейской и на стволах березы повислой. В ельнике кустарничково-сфагновом лишайники собирали на ели в трех типах микроместообитаний, на живых ветвях ели в разреженных кронах, по краям на их частях, сухих ветвях ели длиной 8-12 см и отдельно на сухих ветвях, диаметр ветвей 0,4–0,6 см.

В фитоценозе образцы лишайников собирали на двух-трех разных деревьях вида форофита. Размер талломов лишайников составил 4-7 см. В местообитаниях лишайников также собирали пробы корки ели, отслаивающиеся пластины, субстрат лишайников - древесину нижних сухих ветвей в кроне ели без корки толщиной 0,7-1,0 см, и гладкую корку стволов березы. Образцы лишайников складывали в бумажные пакеты, высушивали в лаборатории до воздушно-сухого веса. Пробы озоляли при 450 °C в муфеле, золу растворяли при нагревании в 2N HCl. Концентрации химических элементов определяли на ААС Квант-АФА (Россия) в двух аналитических и повторностях. Для обработки данных использовали стандартный пакет Microsoft Excel 2010.

Результаты исследования и их обсуждение

Эпифитные лишайники Pseudevernia furfuracea и Platismatia glauca — обычные виды в лесных сообществах, которые встречаются на хвойных и лиственных породах, предпочитают довольно освещенные местообитания. В зрелом сообществе ельника на ветвях в нижней части крон образуются благоприятные условия микроклимата для роста лишайников: изменяется тепловой режим, снижено влияние инсоляции, меньше освещенность, испарение, возрастает влагоудерживающая способность кроны, сглаживается интенсивный ветер. В нижнюю часть кроны ели поступают осадки с элементами питания лишайников.

В результате анализа выявлено, что в лишайниках в ельнике кустарничково-зеленомошном на ветвях ели и стволах березы содержатся довольно низкие концентрации металлов, компонентов техногенных выбросов — Ni, Cu, Pb, Cd. На разных видах форофитов концентрации этих элементов в лишайниках изменяются гораздо менее резко, в отличие от содержания в них Zn и Mn (табл. 1).

В составе осадков под пологом леса Zn и Mn – обычные биогенные элементы. По содержанию этих элементов лишайники в ельнике на разных форофитах, на ветвях ели и стволах березы, различаются более резко. Особенность состава лишайников на стволах березы – накопление высоких концентраций Zn, *P. furfuracea* содержит 72,5 мг/кг, *P. glauca* – 71,3 мг/кг. Содержание Zn в этих видах на стволах березы выше в 2,15 раза

и 2,83 раза соответственно концентраций элемента в них на ветвях ели. Лишайники на стволах березы накапливают также довольно высокие концентрации Мп, 610-739 мг/кг. Концентрации Mn в *P. furfuracea* на стволах березы выше в 3,31 раза, Р. glauca – в 6,16 раза. Более резкие различия в *P. glauca* достигаются как за счет возрастания уровня Мп на стволах березы, так и слабого накопления Мп в талломах этого вида на ветвях ели. Концентрация Мп в Р. glauca на ветвях ели ниже, по сравнению с Fe, во втором виде выше содержание Mn. В талломах P. glauca накопление Mn снижено. В среднем составе обоих видов лишайников на стволах березы содержание Мп выше в 4,44 раза, Zn – в 2,44 раза.

В лесном сообществе различается интенсивность растворения и смыва веществ с крон разных древесных пород. Состав осадков, стекающих по коре стволов деревьев, обогащается более длительное время и в большей степени, чем при поступлении сквозь листья кроны.

На лишайники влияют экологические условия внутри лесного сообщества. По сравнению с влиянием выбросов промышленного загрязнения и городской среды, данные о влиянии форофита на химический состав лишайников немногочисленны. Состав осадков под пологом леса связан с содержанием химических элементов в листьях и хвое. Листья березы и хвоя ели довольно интенсивно накапливают Mn [1]. В фоновых условиях листья березы содержат высокие концентрации Mn до 1600 мг/кг, а также Zn – до 156 мг/кг [1, 2].

 Таблица 1

 Средние концентрации металлов в лишайниках в ельнике на разных форофитах, мг/кг

Вид	Ni	Cu	Cd	Pb	Fe	Mn	Zn
		Сухие вет	ви ели, нижн	яя часть кро	ны, высота	1,3 м	
Pseud-evernia furfuracea	0,58±0,08	1,92±0,08	0,100±0,02	2,26±0,36	126±12	184±10	33,7±2,4
Platis-matia glauca	0,55±0,08	1,61±0,07	0,073±0,01	2,04±0,32	155±11	120±15	25,2±1,0
			Стволы бер	езы, высота	1,3 м		
Pseud-evernia furfuracea	0,76±0,04	1,97±0,11	0,185±0,04	2,10±0,30	137±13	610±194	72,5±4,6
Platis-matia glauca	0,84±0,08	1,87±0,06	0,180±0,01	2,86±0,08	164±4	739±40	71,3±10
		Средние кон	центрации в	видах лишай	ников на ф	орофите	
Ель, среднее и ошибка средней	0,57±0,02	1,77±0,16	0,087±0,01	2,15±0,11	141±15	152±32	29,5±4,2
Береза, среднее и ошибка средней	0,80±0,04	1,92±0,05	0,183±0,01	2,48±0,38	151±13	675±64	71,9±0,6

Концентрации в листьях древесных пород могут изменяться в зависимости от лесорастительных или почвенных условий, фазы развития. Дождевые осадки после прохождения через кроны березы вымывают минеральные элементы. В осадках в лесных сообществах средней тайги под кронами березы установлено возрастание поступления водорастворимых форм Zn и Mn [3]. Осадки, проходящие через кроны березы и стекающие по стволам, обогащаются минеральными элементами, что приводит к их накоплению в лишайниках. Состав эпифитных лишайников на стволах березы и повышение в них концентраций Zn и Mn соответствует особенностям состава листьев, обогащению стока осадков. Содержание Zn и Mn в лишайниках на разных форофитах варьирует больше, чем содержание других микроэлементов.

Градиент экологических условий в кроне ели влияет на видовой состав и состояние лишайников. Строение кроны ели способствует концентрированию осадков. На ветвях по краю кроны ели образуется сочетание благоприятных условий для поселения, развития и питания лишайников. По краям кроны ели возрастает поступление осадков, характерна более сильная фильтрация дождевых осадков по сравнению со средней частью кроны ели и зоной около ствола, где больше осадков задерживается и к почве поступает их меньшая часть. Градиент для распределения видов лишайников по вертикали в кроне ели представляет освещенность. Ветви в верхней части кроны ели активнее заселяют виды лишайников, предпочитающие условия освещения, с темными пигментами в коровом слое, имеющих защитную функцию, виды р. *Bryoria*, тогда как виды рода *Usnea*, содержащие усниновую кислоту, поселяются на ветвях в нижней части кроны ели [4]. В местообитаниях лишайников на субгоризонтальных ветвях ели в нижней части кроны более влажные условия и больше осадков, чем в стволовой части, что благоприятно для роста кустистых лишайников.

При расположении местообитаний в средней части ветвей, под пологом ельника, на сухих нижних ветвях ели *P. furfuracea* накапливает более высокие концентрации элементов, кроме Mn, по сравнению с *P. glauca*. Накопление Pb в обоих видах невысокое – 2,04–2,86 мг/кг, слабо отличается на разных форофитах и субстратах. Содержание Fe в двух видах также мало различается. На краях ветвей ели содержание Fe в обоих видах — 126—155 мг/кг.

Типичное техногенное влияние на лесные экосистемы в западноевропей-

ских странах создает кислые осадки с высокими концентрациями тяжелых металлов в растворимой форме и твердой форме аэрозолей. Тяжелые металлы – компоненты промышленных выбросов обнаруживаются в составе природных объектов не только на окружающих локальных территориях, но и широко распространяются в отдаленные регионы. Известно, что после контакта с пологом леса осадки преобразуются, происходит растворение и вымывание аэрозольного материала с листовой поверхности, увеличивается доля растворимой, более геохимически активной части тяжелых металлов. Кадмий и свинец относятся к числу наиболее опасных металлов, загрязняющих экосистемы все более широко, с дальним переносом выбросов. Кадмий важен экологически, обладает высокой токсичностью при низких концентрациях, подвижен в водной и газовой фазах, способен к вторичному накоплению в различных биологических объектах. При накоплении тяжелых металлов катионообменные свойства клеточных стенок рассматриваются как главный механизм, который определяет поступление элементов в таллом лишайников [5].

Сопоставляли состав лишайников на разных видах форофитов для выявления специфических особенностей. В среднем составе лишайников на стволах березы повышается содержание Cd в 2,11 раза, до 0,183 мг/кг. Это, по-видимому, связано с влиянием питания лишайников на стволах березы обогащенным микроэлементами стоком, вымыванием Cd из листьев кроны березы, собирающей осадки. В условно фоновых условиях заповедника «Кивач» на территории Карелии в листьях разных видов берез определены концентрации Cd до 0,67 мг/кг [2]. Хвоя ели содержит низкие следовые концентрации Cd, всего 0,02 мг/кг, концентрации Cd в листьях березы повислой сопоставимы с лишайниками, 0,184 мг/кг [6]. По-видимому, поступление Cd в лишайники с осадками на стволах березы происходит как за счет концентрирования в кронах с осадками из пылевых фракций воздуха, так и вымывания из листьев. Концентрации Cd в лишайниках дренированного ельника низкие (0.073-0.185 мг/кг), могут рассматриваться в качестве фоновых. Установлено фоновое содержание Cd в других видах [6]. Не превышает фоновых концентраций в лишайниках Pb ($\bar{2}$,0–2,9 мг/кг).

По площади фитоценоза под кронами деревьев осадки выпадают неравномерно, что показано при прямых методах учета осадков под пологом леса. Распределение осадков в фитоценозе зависит от развития и состава древесного полога. В заболочен-

ных ельниках и на болотах древесный ярус из-за неблагоприятных условий роста и водного режима местообитаний ослаблен. Разнообразные местообитания лишайников образуют сухие и усыхающие ветви крон ели, гладкие стволы с опавшей коркой. В сырых местообитаниях заболоченных лесов и болот условия менее подходящие для эпигейных лишайников, и их мало. В благоприятных условиях влажности на эпифитные лишайники негативно действует отсутствие древесного полога и сильная освещенность открытых местообитаний болот.

Содержание тяжелых металлов в лишайниках в ельнике кустарничково-сфагновом представлено в табл. 2.

Концентрации в лишайнике P. furfuracea отличаются от состава этого вида в ельнике кустарничково-зеленомошном. Во-первых, в ельнике кустарничково-сфагновом содержание Cd в талломах P. furfuracea на сухих ветвях ели (0,130 мг/кг) несколько выше концентрации в этом виде на сухих ветвях ели под кронами ельника. Во-вторых, при слабом влиянии кроны ели в ельнике кустарничково-сфагновом, в условиях всех микроместообитанияй P. furfuracea содержит более высокие концентрации Fe. В среднем для всех микроместообитаний накопление Fe в лишайнике в 2,18 раза выше. На сухих ветвях ели Fe еще выше, в 2,24 раза. В-третьих, в лишайнике при слабом влиянии крон средняя концентрация Рb на всех типах ветвей ели ельника кустарничково-сфагнового также в 1,58 раза выше, (3,57 мг/кг). На сухих ветвях ели содержание Pb в талломах P. *furfuracea* близкое. В-четвертых, концентрация Мп, напротив, в лишайнике при слабо развитой кроне ели в ельнике кустарничково-сфагновом (на сухих ветвях 81,4 мг/кг) ниже в 2,26 раза. В этом ельнике в талломах лишайников содержание Fe преобладает над Мп. В условиях влияния крон ельника кустарничково-зеленомошного содержание Мп в лишайниках выше, чем Fe, и соотношение обратное. На концентрации Zn в талломах лишайников кроны ели существенно не влияют. По сравнению с дренированным ельником, в разных микроместообитаниях на ветвях ели в лишайниках слабо повышены концентрации Cd, Ni и Cu (в 1,19–1,35 раз). В обоих видах лишайников на стволах березы дренированного ельника слабо повышаются концентрации Ni, в среднем в 1,42 раза, что, вероятно, связано со стоком осадков по стволу и собирающим типом кроны.

Известно, что химический состав эпифитных лишайников с их атмосферным способом питания тесно связан с поступлением осадков в фитоценозе. Загрязняющие вещества поступают в фитоценоз при осаждении аэрозолей, пыли, также в виде растворенных соединений со снеговыми и дождевыми осадками. Содержание металлов в лишайниках в этих фитоценозах, по-видимому, определяется под влиянием разных типов осадков и уровнем их загрязнения тяжелыми металлами (Fe, Pb, Cd). В ельник кустарничково-сфагновый, по-видимому, поступает более значительное количество снеговых осадков, аккумулирующих загрязняющие вещества за длительное время.

Выявлено, что состав обоих видов лишайников на березе с более высоким накоплением Cd согласуется с тенденцией к повышению концентраций элемента в листьях. Строение собирающей осадки кроны березы способствует обогащению стока по стволу, что приводит к накоплению отдельных металлов в талломах лишайников на стволе березы. Для ели европейской во взрослом возрасте характерен другой тип кроны, сбрасывающей и рассеивающей осадки. Поступление осадков выше по краям кроны ели. Местообитания лишайников на стволах берез с интенсивным стоком могут являться первыми индикаторами поступления Cd с осадками в фитоценоз.

Таблица 2 Концентрации металлов в лишайнике *Pseudevernia furfuracea* в ельнике кустарничково-сфагновом в разных микроместообитаниях

Микроместо- обитание	Ni	Cu	Cd	Pb	Fe	Mn	Zn
		Живые	ветви с хвоей	і в кроне елі	ı		
1	$0,82\pm0,02$	2,51±0,02	$0,119\pm0,01$	6,68±0,2	235±20	110±15	24,9±5
Cyx	ие ветви по	краю живь	ых ветвей с хо	воей в кроне	г ели, длина	8–12 см	
2	$0,76\pm0,08$	2,58±0,01	$0,108\pm0,01$	1,68±0,35	310±25	112±17	16,7±1
		Сух	сие ветви в кр	оне ели			
3	$0,78\pm0,10$	2,67±0,15	$0,130\pm0,02$	2,35±0,23	282±31	81,4±23	29,5±10
Среднее m±sd	0,79 ±0,03	2,59 ±0,08	0,119 ±0,01	3,57 ±2,71	276 ±37,9	101 ±17	23,7 ±6
Коэффициент вариации, CV, %	3,88	3,10	9,24	76,0	13,8	16,9	27,4

 Таблица 3

 Концентрации металлов в субстратах эпифитных лишайников ельников на разных типах ветвей ели и стволах березы

Субстрат	Ni	Cu	Cd	Pb	Fe	Mn	Zn
	E.	льник кустар	эничково-зелен	юмошный			
Древесина, сухие ветви ели	0,23±0,02	0,86±0,2	0,051±0,002	2,35±0,03	25±0,6	65,3±4	11±2
Корка березы	$0,22\pm0,04$	3,82±0,5	0,060±0,001	1,0±0,06	22±8	265±42	37±1
Корка стволов ели	0,31±0,4	2,0±0,07	0,302±0,01	2,11±0,07	46±5	480±14	87±1,0
		Ельник куст	арничково-сф	агновый			
Кора ветвей ели	1,30±0,12	3,69±0,5	0,240±0,09	6,90±3,2	154±10	136±11	96±16
Древесина сухие ветви ели 5–6 мм	0,13±0,0	0,89±0,2	0,034±0,001	0,38±0,03	30±5	40±10	20±6
Корка ствола низкорослой ели, 2 м	0,42±0,08	1,85±0,4	0,131±0,02	4,90±0,33	77±10	251±9	109±10
Сухие ветви сухостоя ели, 2,5 м, серые, <i>Bryoria</i> sp.	0,18±0,0	0,93±0,03	0,090±0,02	2,40±0,10	44±10	39±4	20±0,8

Концентрации элементов в субстратах лишайников в различных микроместообитаниях на ветвях ели в сравнении с другими условиями приведены в табл. 3.

Субстрат в микроместообитаниях лишайника P. furfuracea – древесина сухих ветвей ели в ельнике кустарничково-сфагновом содержит самые низкие концентрации металлов. В корке ветвей ели в этом ельнике содержание биогенных элементов Mn, Fe и Zn, а также Ni, Cu, Cd и особенно Рь (6,90 мг/кг) выше, по сравнению с сухой древесиной ветвей ели. Содержание тяжелых металлов, сопоставимое в сухих ветвях сухостойных деревьев ели на высоте 1,3 м и в субстрате лишайника, в древесине сухих веточек ели, за исключением более высокого содержания Рb в ветвях сухостоя ели -2,40 мг/кг. Содержание Pb слегка повышено в сухой древесине ветвей и коре ели, что, вероятно, связано с загрязнением осадками самого поверхностного слоя. Сухие ветви в кронах ели в ельнике кустарничково-зеленомошном содержат низкие концентрации элементов, их состав от аналогичного субстрата лишайника в кустарничково-сфагновом ельнике отличается мало. Кроме ветвей ели, в условиях влажного микроклимата болота эпифитные лишайники растут на корке тонких стволов ели. В более длительно существующем субстрате, в корке ствола низкорослой ели, накапливаются Pb до 4,90 мг/кг, Cu (1,85 мг/кг), Cd (0,131 мг/кг), Zn (109 мг/кг). Корка стволов ели в дренированном ельнике слабо накапливает Cd, (0,302 мг/кг) и Pb (2,11 мг/кг), Zn (87 мг/кг).

Концентрации тяжелых металлов в субстрате лишайников — сухих ветвях ели в микроместообитаниях изменяются в пределах естественных фоновых значений. В сухих ветвях ели в разных сообществах обнаружены крайне низкие содержания элементов (Pb < 2.5, Ni < 1.0, Cu < 1.0, Cd < 0.09 мг/кг), обычных компонентов техногенных выбросов, что свидетельствует об отсутствии влияния загрязнения. Лишайник *P. furfuracea* накапливает в большем количестве все элементы, по сравнению с субстратом, сухими ветвями ели.

В работе установлено, что в обоих видах лишайников в дренированном ельнике наиболее сильно изменяется содержание Мп и Zn в связи с влиянием разных форофитов (состава и распределения осадков). Марганец и цинк — компоненты состава осадков под пологом леса, Мп интенсивно накапливается в хвое ели и листьях березы, Zn в листьях березы. В двух видах лишайников на стволах березы выше содержание Zn и Mn.

Выявлено, что в связи с влиянием крон в лишайниках в различных условиях дренированного ельника и разреженного ельника различаются концентрации Мп, Fe и Pb. При слабом влиянии крон ели в лишайниках снижаются концентрации Мп, обычного микрокомпонента осадков под пологом леса, и накапливаются более высокие концентрации Fe, также Pb. Концентрации металлов в лишайниках на стволах березы могут использоваться как фоновые, за исключением Zn, в связи с накоплением в листьях березы.

Для сохранения видового разнообразия лишайников необходимо сохранение сообществ заболоченных лесов и болот. В лесных сообществах вблизи Ладожского озера в перспективных охраняемых территориях зарегистрировано довольно высокое видовое разнообразие лишайников [7–9]. Нужны данные о влиянии загрязнения на лишайники и возможностях сохранения лесных сообществ. Сравнительные данные об уровне загрязнения лишайников в сопоставлении с соседними регионами северо-запада европейской части отсутствуют. В заповеднике «Кивач» на соседней территории в Карелии более детально изучен видовой состав в лишайниках, установлены концентрации тяжелых металлов в индикаторных видах [10]. При этом современных данных оценки загрязнения лишайников не имеется. Результаты позволяют охарактеризовать полученные значения в качестве фоновых, выявить влияние на лишайники разных форофитов, видовые различия.

Определен уровень естественного варьирования содержания тяжелых металлов в лишайниках в связи с экологическими условиями, типом сообщества и форофита на фоновой территории. На состав лишайников влияют условия в кроне деревьев в различных микроместообитаниях. В лишайниках определены низкие концентрации тяжелых металлов. Выявлено влияние вида форофита на накопление металлов (Mn, Zn) в обоих видах лишайников. Вид Pseudevernia furfuracea имеет более высокую способность к накоплению металлов, P. glauca менее подходит для такого рода наблюдений в связи со слабым накоплением, небольшим обилием, более узкой экологической амплитудой.

В условиях влияния кроны ели и слабого влияния кроны показаны различия концентраций элементов в талломах лишайников. В составе эпифитных лишайников в местообитаниях под пологом ельника и в разреженном ельнике на деревьях ели близкого возраста имеются различия в содержании тяжелых металлов, компонентов техногенных выбросов – Pb, Cd, Fe. Получены данные о влиянии условий в кроне деревьев ели европейской, в микроместообитаниях на отдельных типах ветвей на состав P. furfuracea. Под влиянием крон сообществ на лишайники наиболее резкими являются различия концентраций марганца, обычного микрокомпонента осадков под пологом ельников в фоновых условиях. В разреженном ельнике влияние крон на состав лишайников минимально и поступление тяжелых металлов в большей степени определяется атмосферными источниками.

Заключение

Состав лишайников как интегральных биоиндикаторов позволяет оценивать общее количество тяжелых металлов, поступивших в таллом за длительное время. Использование лишайников в этом качестве позволяет выявить элементы с повышенными концентрациями в составе атмосферных выпадений. Содержание микроэлементов в воздушной среде является более лабильным показателем, по сравнению с лишайниками. В лесном пологе изменяется растворимость тяжелых металлов, способность к миграции, в связи с этим состав лишайников связан с действием экологических условий в фитоценозе. Необходимо учитывать и выделять влияние вида форофита на состав лишайников при биоиндикации загрязнения.

На территории района в юго-восточном Приладожье отсутствует значительная аэротехногенная нагрузка. Концентрации элементов в лишайниках Pseudevernia furfuracea и Platismatia glauca в ельнике кустарничково-зеленомошном на разных видах форофитов характеризуют фоновые значения. Содержание Zn в лишайниках на стволах березы выше, *P. furfuracea* в 2,15 раз, *P. glauca* в 2,83 раза, по сравнению с концентрациями на ветвях ели. Концентрация Мп в талломах возрастает на березе до 6,2 раз. В двух видах лишайников под пологом ели определены низкие концентрации тяжелых металлов Cd, Pb, Ni, Cu. Загрязнения эпифитных лишайников и субстратов тяжелыми металлами в ельниках не обнаружено.

В кустарничково-сфагновом ельнике в разных микроместообитаниях в лишайнике *P. furfuracea* более сильно варьирует содержание следующих металлов: Pb (76,0%), Mn (16,9%), Fe (13,8%), Cd (9,24%). Концентрация Mn, одного из преобладающих микроэлементов в осадках под пологом ели, в лишайнике в кустарничково-сфагновом ельнике снижается в 2,26 раза. В лишайнике на ветвях ели при слабом влиянии крон содержание Cd выше на 19%.

В юго-восточной части побережья Ладожского озера возможно возрастание количества аэропромышленных выбросов и тяжелых металлов в их составе вблизи от развитых регионов Карелии, г. Санкт-Петербурга, европейских стран, в том числе Финляндии. В этом районе возможно также увеличение мощностей производства минеральных удобрений и выбросов. В современных условиях энергетического кризиса и возрастании масштабов использования бурого угля на теплоэлектростанциях, в европейской части России возможно усиление влияния воздушных переносов выбросов

на леса. Результаты фоновых концентраций элементов можно применять для оценки уровня загрязнения лишайников.

Работа выполнена по плановой теме НИР 2021—2023 гг. № 121032500047-1 «Растительность европейской части России и северной Азии: разнообразие, динамика и принципы организации».

Список литературы

- 1. Сухарева Т.А. Особенности накопления химических элементов древесными растениями северотаежных лесов на фоновых и техногенно нарушенных территориях // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2017. № 14. С. 438-441.
- 2. Кузнецова Т.Ю., Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Аккумуляция тяжелых металлов в различных органах и тканях березы в зависимости от условий произрастания // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 1 С. 86–94.
- 3. Шильцова Г.В., Ласточкина В.Г. Влияние полога соснового и березового леса на химический состав осадков в заповеднике «Кивач» // Труды Карельского научного центра РАН. 2006. № 10. С. 180–184.
- 4. Gauslaa Y., Lie M., Ohlson M. Epiphytic lichen biomass in a boreal Norway spruce forest. Lichenologist. 2008. No. 40 (3). P. 257–266.

- 5. Табаленкова Г.Н., Далькэ И.В., Головко Т.К. Элементный состав биомассы некоторых видов лишайников бореальной зоны на Европейском Северо-Востоке // Известия Самарского НЦ РАН. 2016. № 18 (2). С. 221–225.
- 6. Катаева М.Н., Беляева А.И. Накопление тяжелых металлов в эпифитных лишайниках ельника подзоны средней тайги // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 7. С. 17–21.
- 7. Ликсакова Н.С., Сорокина И.А. Редкие растительные сообщества на проектируемых для охраны территориях на востоке Ленинградской области // Ботанический журнал. 2017. Т. 102. № 2. С. 232–248.
- 8. Сорокина И.А., Степанчикова И.С., Гимельбрант Д.Е., Ликсакова Н.С., Спирин В.А., Кушневская Е.В., Гагарина Л.В., Ефимов П.Г. Краткие очерки трех планируемых ООПТ востока Ленинградской области // Ботанический журнал. 2017. Т. 102. № 9. С. 1270–1289.
- 9. Степанчикова И.С., Гагарина Л.В., Тагирджанова Г.М., Гимельбрант Д.Е. Лишайники можжевеловых сообществ мыса Шурягский (Ленинградская область) // Вестник Тверского государственного университета. Сер. Биология и экология. 2015. № 2. С. 121–126.
- 10. Дьяконов В.В., Козлов В.А., Коржицкая З.А. Оценка загрязнения тяжелыми металлами и серой лесных экосистем Республики Карелия. В кн.: Проблемы антропогенной трансформации лесных биогеоценозов Карелии. 1996. Петрозаводск. С. 167–182.

УДК 616.12-008.46:612.017.11:612.112.91

КЛЕТОЧНАЯ ГИБЕЛЬ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ НЕЙТРОФИЛОВ У БОЛЬНЫХ ХРОНИЧЕСКОЙ СЕРДЕЧНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТЬЮ ПРИ ЭНДОТОКСЕМИИ

^{1,2}Юринская М.М., ^{1,2}Винокуров М.Г., ²Сусликов А.В.

¹Институт биофизики клетки Российской академии наук — обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пущинский научный центр биологических исследований Российской академии наук», Пущино, e-mail: mg-vinokurov@mail.ru; ²ФГАУЗ «Больница Пущинского научного центра Российской академии наук», Пущино

Целью данной работы явилось изучение клеточной гибели (апоптоза и нетоза) и функциональной активности нейтрофилов у больных хронической сердечной недостаточностью с эндотоксемией. Проведено исследование 20 пациентов с диагнозом хроническая сердечная недостаточность (ХСН), у которых LALтестом выявлена эндотоксемия. Также были обследованы здоровые индивидуумы (n = 19) обоих полов. Уровень эндотоксинов в крови больных определяли с использованием LAL-теста. Генерацию активных форм кислорода (АФК) в клетках определяли с использованием красителя нитросинего тетразолия (НСТ). Апоптоз, некроз и нетоз регистрировали методом флуоресцентной микроскопии. Уровни ТNFа и интерлейкинов IL-1β и IL-6 были определены с использованием метода иммуноферментного анализа ELISA. Уровень рецепторов TLR4 в клеточной мембране нейтрофилов определяли на проточном цитометре с использованием апti-TLR4 антител. Полученные нами результаты по сравнению функциональных показателей контрольных нейтрофилов и нейтрофилов больных XCH показали, что при эндотоксемии значительно увеличивается уровень TNFа, IL-1β, IL-6, АФК, уровень рецепторов TLR4 в клеточной мембране нейтрофилов. Также при эндотоксемии значительно снижается апоптоз нейтрофилов и увеличивается их нетоз, что важно в патогенезе хронической сердечной недостаточности.

Ключевые слова: хроническая сердечная недостаточность, эндотоксемия, нейтрофилы, апоптоз, нетоз

CELL DEATH AND FUNCTIONAL ACTIVITY OF NEUTROPHILS IN PATIENTS WITH CHRONIC HEART FAILURE WITH ENDOTOXEMIA

1,2 Yurinskaya M.M., 1,2 Vinokurov M.G., 2 Suslikov A.V.

¹Institute of Cell Biophysics, Russian Academy of Sciences, Puschino, e-mail: mg-vinokurov@mail.ru; ²Hospital of the Puschino Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Puschino

The aim of this work was to study cell death (apoptosis and netosis) and functional activity of neutrophils in patients with chronic heart failure with endotoxemia. A study was conducted on 20 patients diagnosed with chronic heart failure (CHF), in whom endotoxemia was detected by the LAL test. Healthy individuals (n=19) of both sexes were also examined. The level of endotoxins in the blood of patients was determined using the LAL test. The generation of reactive oxygen species (ROS) in cells was determined using the dye nitroblue tetrazolium (NBT). Apoptosis, necrosis and netosis were recorded by fluorescent microscopy. The levels of TNF α and interleukins IL-1 β and IL-6 were determined using the ELISA method. The level of TLR4 receptors in the cell membrane of neutrophils was determined on a flow cytometer using anti-TLR4 antibodies. Our results comparing the functional parameters of control neutrophils and neutrophils in CHF patients showed that endotoxemia significantly increases the level of TNF α , IL-1 β , IL-6, ROS, the level of TLR4 receptors in the neutrophil cell membrane. Also, with endotoxemia, apoptosis of neutrophils is significantly reduced and their netosis increases, which plays an important role in the pathogenesis of chronic heart failure.

Keywords: chronic heart failure, endotoxemia, neutrophils, apoptosis, netosis

Хроническая сердечная недостаточность (ХСН) является одной из самых важных проблем современной медицины [1]. В России распространенность ХСН І–ІV функционального класса (ФК), по классификации New York Heart Association Functional (NYHA), составляет 7–10% случаев, а абсолютное число больных ХСН по состоянию на 2018 г. равняется 12,35 млн чел., годовая смертность пациентов с сердечной недостаточностью составляет в России примерно 12%. В патогенезе сердечной недостаточности критическую роль играют воспалительные процессы. Значительным инициатором воспаления являются

эндотоксины (липополисахариды (LPS)). При сердечной недостаточности довольно часто наблюдается эндотоксемия, которая возникает вследствие поступления молекул LPS из бактерий микробиома кишечника человека в кровяное русло [2]. Работы последнего времени показали, что состав кишечной микробиоты связан с воспалением, ожирением и с нарушением обмена веществ. Установлено, что диета с большим количеством жиров и углеводов вызывает метаболическую эндотоксемию в крови больных с этими патологиями [3].

Поступающие в кровь LPS, связываясь с мембранными рецепторами TLR4, прай-

мируют нейтрофилы, после чего активационный сигнал от рецептора передается к различным внутриклеточным сигнальным путям, что приводит к продуцированию провоспалительных цитокинов, активных форм кислорода (АФК), оксида азота, фактора некроза опухолей (TNFα) [4]. Гибель кардиомиоцитов играет ключевую роль при СН. Выявлено, что в механизмах активации апоптоза кардиомиоцитов принимают участие рецептор липополисахаридов TLR4 и NADPH-оксидаза 4 сердца [5].

В физиологических условиях нейтрофилы находятся в кровотоке не более одних суток, затем поступают в ткани, где могут дополнительно функционировать 1–2 дня до активации апоптотической гибели. Далее макрофаги осуществляют эффероцитоз нейтрофилов, что обеспечивает безвоспалительное удаление этих клеток из организма [6].

LPS вызывает ингибирование апоптоза нейтрофилов при бактериальной инфекции (грамотрицательный сепсис), сахарном диабете, сердечно-сосудистых, нейродегенеративных заболеваниях [7]. Под действием LPS в нейтрофилах увеличивается продукция АФК, провоспалительных цитокинов и различных медиаторов воспаления [8]. Следует отметить, что поступающие в кровь липополисахариды воздействуют не только на нейтрофилы. LPS увеличивают продукцию АФК и провоспалительных цитокинов моноцитов, макрофагов и клеток эндотелия. LPS ускоряют апоптоз этих клеток.

Помимо апоптоза и некроза нейтрофилы могут погибать посредством нетоза программируемой клеточной гибели, сопровождаемой выбросом из погибающих нейтрофилов экстраклеточных ловушек нейтрофилов Neutrophil extracellular traps (NET), содержащих фрагменты ДНК, ядерные белки, миелопероксидазу и эластазу. Нейтрофильные экстраклеточные ловушки захватывают и убивают бактериальные клетки [9]. Однако когда воспаление продолжается или сохраняется возбудитель, нейтрофилы, высвобождая NET, усугубляют повреждение тканей и усиливают воспалительные процессы в организме [10]. Недавние исследования показывают, что нетоз участвует не только в инфекциях, но и в других заболеваниях. Совсем недавно было показано, что образование NET способствует венозной тромбоэмболии, а также и прогрессированию атеросклероза, вызывая венозный и артериальный тромбозы. В NET попадают тромбоциты, эритроциты, моноциты, что, в свою очередь, вызывает образование больших тромбов в сосудистом русле. Обнаружено присутствие NET в просвете атеросклеротических сосудов человека и препаратах коронарных артерий, полученных от больных после острого инфаркта миокарда [11].

Целью исследования явилось изучение клеточной гибели (апоптоза и нетоза) и функциональной активности нейтрофилов у больных хронической сердечной недостаточностью при эндотоксемии.

Материалы и методы исследования

В процессе проведения исследования были сформированы группы наблюдения по критериям включения и данным клинического и биохимического анализов крови, проведена верификация диагноза, набрано 20 пациентов с диагнозом хроническая сердечная недостаточность. Критериями включения являлись: возраст больных ≥ 30 лет, III функциональный класс хронической сердечной недостаточности по классификации NYHA, π фракция выброса $\leq 40\%$. У включенных в исследование больных уровень сывороточного мозгового натрийуретического пептида (BNP) составлял ≥ 150 пг/мл или N-концевого про-BNP $(NT-proBNP) \ge 600$ пг/мл, если пациенты были госпитализированы в стационар по поводу сердечной недостаточности в течение года до включения в исследование, то уровень BNP составлял ≥ 100 пг/мл, а NTproBNP ≥ 400 пг/мл. Для выявления эндотоксемии у больных с ХСН определяли уровень LPS в плазме крови с использованием LAL-теста $(0.25\pm0.02\ \text{ед/мл}\ \text{(контрольная}$ группа – менее 0,16 ед/мл)). Средний возраст больных XCH 64.2 ± 8.0 , женщины – 9 чел, мужчины – 11 чел., количество пациентов, перенесших инфаркт миокарда, -3 чел., количество пациентов, перенесших операцию на сердце, - 6 чел. Также были обследованы здоровые индивидуумы (n = 19) обоих полов (доноры-добровольцы), средний возраст $53,6 \pm 9,9$.

Нейтрофилы выделяли из периферической крови больных, участвующих в исследовании, с помощью метода дифференциального центрифугирования на двухслойном градиенте плотности перколла (70% и 55%). Осаждённые клетки ресуспендировали в фосфатно-солевом буфере или в культуральной среде DMEM, содержащей 10% термоинактивированной эмбриональной сыворотки теленка, тестированной на присутствие эндотоксинов, 2 мМ L-глутамина, стандартный набор антибиотиков (все реактивы фирмы Sigma-Aldrich, США).

Генерацию активных форм кислорода (АФК) в клетках определяли с использованием красителя нитросинего тетразолия (НСТ) [12]. Продукцию АФК нейтрофилами контрольной группы принимали за 100%.

Регистрацию гибели клеток (апоптоз, некроз и нетоз) проводили методом флуоресцентной микроскопии (инвертированный микроскоп Кеуепсе, Япония). Для регистрации апоптоза и некроза использовали флуоресцентные зонды Hoechst 33342 и Propidium iodide (PI). Выделенные нейтрофилы (106 клеток/мл) культивировали в CO, инкубаторе в течение 15 ч (37 °C, 5% СО, в полной культуральной среде. Далее добавляли на 30 мин к клеткам 1 мкг/мл Hoechst 33342 и за 5 мин до регистрации 30 мкМ РІ. Для регистрации нетоза использовали флуоресцентный зонд Sytox Green (Invitrogen, США). Нейтрофилы инкубировали 3 ч в тех же условиях, что и для обнаружения апоптоза. Затем к клеткам на 30 мин добавляли 0,8 мкМ Sytox Green. Регистрировали нетоз, активированный 20 нМ форбол-12-миристат-13-ацетатом (РМА), и спонтанный нетоз (без РМА).

Уровни TNFα и интерлейкинов IL-1β и IL-6 были определены с использованием метода иммуноферментного анализа ELISA. Бесклеточные супернатанты собирали для определения концентрации цитокинов с использованием наборов: набор реагентов для иммуноферментного определения концентрации фактора некроза опухолей – альфа «Альфа-ФНО-ИФА-БЕСТ», набор реагентов для иммуноферментного определения концентрации человеческого интерлейкина-1 бета «Интерлейкин-1 бета- ИФА-БЕСТ», набор реагентов для иммуноферментного определения концентрации человеческого интерлейкина-6 «Интерлейкин-6- ИФА-БЕСТ», («ВЕКТОР-БЕСТ», Россия), в соответствии с протоколами производителя.

Уровень эндотоксинов в крови больных определяли с использованием LAL-теста по протоколу фирмы-производителя Sigma-Aldrich, США.

Использование ингибиторов

В работе исследовали действие следующих ингибиторов: ТАК242 – ингибитор TLR4-зависимого сигнального пути, SB203580 – ингибитор р38МАРК (р38 митоген-активируемая протеинкиназа), дифенилениодоний хлорида (DPI) ингибитор НАДФН-оксидазы, вортманнин - ингибитор фосфоинози-(Wortmannin) тол-3 киназы (PI3K) и SP600125 – ингибитор янус киназы (JNK). Рабочие концентрации ингибиторов подбирали по их минимальной токсичности. Ингибиторы добавляли к клеткам на 30 мин, после чего клетки отмывали от ингибиторов и использовали для дальнейшей работы.

Уровень TLR4 в клеточной мембране нейтрофилов определяли, используя антите-

ла Anti-TLR4 (Toll-Like Receptor 4, CD284), ковалентно меченые флуоресцентным зондом фикоэритрином (PE) (USBiological, T8050-34D). После выделения нейтрофилов их окрашивали Anti-TLR4 антителами согласно рекомендациям производителя при температуре 0 °С в течение 30 мин. Определение уровня TLR4 в нейтрофилах выполняли на проточном цитометре Cyto-Flex S (Beckman Coulter, CША) (сразу после завершения окрашивания), регистрируя Median Fluorescent Intensity (MFI), окрашенных антителами нейтрофилов.

Статистическая обработка данных

Экспериментальные результаты анализировали в SigmaPlot. Различия между экспериментальными группами определяли дисперсионным анализом ANOVA (Shapiro-Wilk's test, p < 0.05).

Результаты исследования и их обсуждение

Основными повреждающими ткани организма факторами являются АФК. Как известно, нейтрофилы, как и все фагоциты, при активации LPS продуцируют активные формы кислорода (АФК). Основной вклад в пул АФК, производимый нейтрофилами, вносит супероксид анион радикал, генерируемый НАДФН-оксидазой этих клеток. Активация НАДФН-оксидазы при действии LPS происходит вследствие активации различных сигнальных путей передачи сигнала от TLR4. Для поиска новых подходов к лечению сердечно-сосудистых патологий необходимо понимать механизмы, лежащие в основе увеличения уровня провоспалительных цитокинов при этих заболеваниях. Поэтому в работе были изучены различные сигнальные внутриклеточные пути, активацию которых вызывают липополисахариды.

В данном исследовании мы сравнили роль отдельных сигнальных путей нейтрофилов пациентов с ХСН (рис. 1, Б) с нейтрофилами здоровых доноров (рис. 1, А). Для этой цели клетки обрабатывали специфическими ингибиторами этих сигнальных путей. Ингибитор DPI использовали для подтверждения специфичности регистрируемых данных.

Полученные результаты показали, что все ингибиторы, за исключением Wortmannin (рис. 1, A, столбики 1–3, 5), немного снижают продукцию АФК нейтрофилами контрольной группы (рис. 1, A, столбик К). В группе больных с ХСН продукция АФК в нейтрофилах в пробах без ингибиторов была значительно выше, чем в нейтрофилах контрольной группы (рис.1, Б, К по сравнению с рис.1, A, K). При этом все ингибито-

ры снижали продукцию АФК нейтрофилами (рис. 1, Б, столбики 1–5) по сравнению с нейтрофилами без воздействия ингибиторов (рис. 1, Б, столбик К). Причем ингибирование всеми ингибиторами было значительно больше, чем для нейтрофилов контрольной группы (рис. 1).

Таким образом, полученные результаты показали, что в регуляции продукции АФК нейтрофилами больных с ХСН с эндотоксемией важную роль играют TLR4-, р38МАРК-, PI3К- и JNК-зависимые сигнальные пути. Использованные ингибиторы более эффек-

тивно снижают продукцию АФК нейтрофилами пациентов с XCH по сравнению с нейтрофилами контрольной группы лиц.

Действие LPS, помимо продуцирования AФК, вызывает синтез различных провоспалительных цитокинов [5, 7]. Наши исследования функциональных свойств нейтрофилов больных с XCH показали, что в данном случае наблюдается увеличение продукции провоспалительных цитокинов (по сравнению с нейтрофилами контрольной группы): TNFα, IL-1b, IL-6 (рис. 2, столбики 2 по сравнению со столбиками 1).

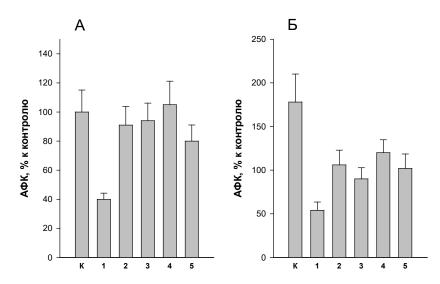


Рис. 1. Влияние ингибиторов сигнальных путей на продукцию $A\Phi K$ нейтрофилами больных с XCH. A — контрольная группа пациентов, B — больные с B — Контрольной группы (в отсутствии ингибиторов) принята за B — Ингибиторы: B — B

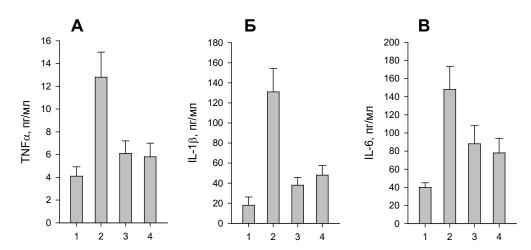


Рис. 2. Влияние ингибиторов сигнальных путей на продукцию TNFα, IL-1β, IL-6 нейтрофилами больных с XCH. 1 – контрольная группа, 2–4 – группа больных с XCH; 3 – воздействие ингибитора TAK242 (1 мкг/мл), 4 – воздействие ингибитора 1 мкМ SB203580

Изучение влияния ингибиторов на продукцию АФК нейтрофилами показало, что наибольшим ингибирующим эффектом обладал ингибитор р38МАРК (рис. 1, Б, 3). Поэтому далее было изучено действие SB203580 и ТАК242 (блокирующего передачу всех сигналов от TLR4) на продукцию ТNFα, IL-1b, IL-6. Полученные результаты показали, что ТАК242 значительно снижает продукцию $TNF\alpha$, $IL-1\beta$ (рис. 2, A и Б, столбики 3). Воздействие ТАК242 на продукцию IL-6 несколько слабее (рис. 2, B, столбик 3). Ингибитор SB203580 также значительно сильнее ингибировал продукцию TNFα, IL-1β (рис. 2, А и Б, столбики 4) по сравнению с воздействием на продукцию IL-6 (рис. 2, B, столбик 4).

Таким образом, полученные результаты показали, что в регуляции продукции ТNFα, IL-1b, IL-6 нейтрофилами больных с XCH с эндотоксемией важную роль играют TLR4- и р38MAPK-зависимые сигнальные пути.

В последние годы было показано, что АФК, продуцируемые НАДФНоксидазой, участвуют в качестве сигнальных молекул в активации апоптоза и нетоза нейтрофилов [13]. Сравнительный анализ клеточной гибели нейтрофилов пациентов с ХСН и нейтрофилов лиц из контрольной группы показал, что у пациентов с ХСН значительно ингибирован апоптоз нейтрофилов и увеличен спонтанный и активированный РМА нетоз (таблица).

Гибель нейтрофилов у здоровых лиц и у больных ХСН

Гибель нейтрофилов	Здоровые	Больные ХСН
Апоптоз,%	100±8	78±6
Спонтанный нетоз, %	1,5±0,8	5,9±1,5
Активированный нетоз. %	14,6±3,8	28,9±6,8

Полученные результаты по регистрации генерации АФК, ТNFа, IL-1b, IL-6 нейтрофилами с использованием ингибиторов сигнальных путей показали, что в процессах увеличения уровня этих медиаторов воспаления ключевую роль играют TLR4-зависимые и р38МАРК-зависимые сигнальные пути. Последующий анализ уровня TLR4 в клеточной мембране нейтрофилов, регистрируемый по уровню медианной интенсивности флуоресценции антител, показал, что изменение клеточной гибели и функциональной активности нейтрофилов при эндотоксемии в значительной степени обусловлено увеличением уровня

TLR4 в мембране нейтрофилов больных XCH (2021 \pm 140) (по сравнению с нейтрофилами контрольной группы- 1582 ± 140).

Заключение

Полученные нами результаты по сравнению функциональных показателей контрольных нейтрофилов и нейтрофилов больных ХСН показали, что при эндотоксемии значительно увеличивается уровень TNFα, IL-1β, IL-6, AΦK, уровень рецепторов TLR4, значительно снижается апоптоз нейтрофилов и увеличивается их нетоз, что имеет большое значение в патогенезе хронической сердечной недостаточности.

Работа выполнялась в рамках Госзадания по теме 0576-2020-0005, одобрена ЛЭК БПНЦ РАН, протокол № 14 от 04.09.2018 г.

Список литературы

- 1. Thandavarayan R.A., Chitturi K.R., Guha A. Pathophysiology of acute and chronic right heart failure. Cardiol Clin. 2020. Vol. 38. No. 2. P. 149–160.
- 2. Mohammad S., Thiemermann C. Role of metabolic endotoxemia in systemic inflammation and potential interventions. Front Immunol. 2021. Vol. 11. P. 594150.
- 3. Fuke N., Nagata N., Suganuma H., Ota T. Regulation of gut microbiota and metabolic endotoxemia with dietary factors. Nutrients. 2019. Vol. 11. No. 10. P. 2277.
- 4. Kuzmich N.N., Sivak K.V., Chubarev V.N., Porozov Y.B., Savateeva-Lyubimova T.N., Peri F. TLR4 Signaling Pathway Modulators as Potential Therapeutics in Inflammation and Sepsis. Vaccines (Basel). 2017. Vol. 5. No. 4. P. 34.
- 5. Chen X., Xu S., Zhao C., Liu B. Role of TLR4/NADPH oxidase 4 pathway in promoting cell death through autophagy and ferroptosis during heart failure. Biochem Biophys Res Commun. 2019. Vol. 516. No. 1. P. 37–43.
- 6. Kobayashi S.D., Malachowa N., DeLeo F.R. Influence of microbes on neutrophil nife and death. Frontiers in Cellular and Infection Microbiology. 2017. Vol. 7. P. 159.
- 7. Resende C.B., Borges I., Gonçalves W.A., Carneiro R., Rezende B.M., Pinho V., Nobre V., Teixeira M.M. Neutrophil activity in sepsis: a systematic review. Braz J Med Biol Res. 2020. Vol. 53. No. 12:e7851.
- 8. Suzuki K. Chronic inflammation as an immunological abnormality and effectiveness of exercise. Biomolecules. 2019. Vol. 9. No. 6. P. 223.
- 9. Hashemi P., Nouri-Vaskeh M., Alizadeh L., Baghbanzadeh A., Badalzadeh R., Askari E., Baradaran B. NETosis in ischemic/reperfusion injuries: An organ-based review. Life Sci. 2021. Vol. 22. P. 120158.
- 10. Castanheira F.V.S., Kubes P. Neutrophils and NETs in modulating acute and chronic inflammation. Blood. 2019. Vol. 133. No. 20. P. 2178–2185.
- 11. Mozzini C., Pagani M. Cardiovascular Diseases: Consider Netosis. Curr Probl Cardiol. 2021. Jul 3:100929. DOI: 10.1016/j.cpcardiol.2021.100929.
- 12. Yurinskaya M.M., Krasnov G.S., Kulikova D.A., Zatsepina O.G., Vinokurov M.G., Chuvakova L.N., Rezvykh A.P., Funikov S.Y., Morozov A.V., Evgenev M.B. H2S counteracts proinflammatory effects of LPS through modulation of multiple pathways in human cells. Inflamm Res. 2020. Vol. 69. No. 5. P. 481–495.
- 13. Pérez-Figueroa E., Álvarez-Carrasco P., Ortega E., Maldonado-Bernal C. Neutrophils: many ways to Die. Front Immunol. 2021. Vol. 4. No. 12. P. 631821.

СТАТЬЯ

УДК 622:55

ПРОСТЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ БЕЗОПАСНОГО И ЭФФЕКТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ГЕОЛОГИИ СКВАЖИН В РЕСПУБЛИКЕ САХА (ЯКУТИЯ)

Рудых И.В.

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», Якутск, e-mail: rudih@mail.ru

Цель статьи — выявить наиболее простые решения для безопасного и эффективного производства работ по исследованию геологии скважин в Республике Саха (Якутия). В статье приведены основные сведения о геологическом строении залежей нефти и газа в Российской Федерации, которые характеризуются специфическим стратиграфическим, формационным и фазово-химическим диапазоном нефтегазоносности с самыми разными глубинными условиями, что предопределяет особенности распределения, состава и условий эксплуатации залежей утлеводородов. В качестве материалов исследования выступали данные об особенностях геологии скважин в Республике Саха (Якутия), при этом использовались методы обобщения, систематизации и анализа научной литературы по проблематике исследования. Были определены простые решения для безопасного и эффективного производства работ по исследованию геологии скважин в Республике Саха (Якутия). Показано, что разработка месторождений скважин в Республике Саха (Якутия) в современных условиях нуждается в строительстве новых эксплуатационных скважин с предотвращением загрязнения призабойной зоны пласта при креплении и обеспечении надежной изоляции заколонного пространства. Достичь этого можно, применяя облегченные и легкие тампонажные растворы, которые делают невозможными большую депрессию на пласт и опасность непредвиденных поглощений тампонажной суспензии и гидроразрыва в пласте.

Ключевые слова: эффективность, исследования, скважины, геология, Республика Саха (Якутия), аномально высокое пластовое давление

SIMPLE SOLUTIONS FOR SAFE AND EFFICIENT WELL GEOLOGY STUDIES IN THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA) Rudykh I.V.

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, e-mail: rudih@mail.ru

The purpose of the article is to identify the simplest solutions for the safe and efficient production of work on the study of well geology in the Republic of Sakha (Yakutia). The article provides basic information about the geological structure of oil and gas deposits in the Russian Federation, which is characterized by a specific stratigraphic, formational and phase-chemical range of oil and gas potential with a variety of deep conditions, which predetermines the distribution, composition and operating conditions of hydrocarbon deposits. The study materials were data on the features of the geology of wells in the Republic of Sakha (Yakutia), while using the methods of generalization, systematization and analysis of scientific literature on the research issues. Simple solutions were identified for the safe and efficient execution of well geology surveys in the Republic of Sakha (Yakutia). It is shown that the development of well fields in the Republic of Sakha (Yakutia) in modern conditions requires the construction of new production wells to prevent contamination of the bottomhole formation zone during fastening and ensure reliable isolation of the annulus. This can be achieved by using lightweight and light cement slurries, which make it impossible for a large drawdown on the reservoir and the risk of unforeseen losses of the cement slurry and hydraulic fracturing in the reservoir.

Keywords: efficiency, research, wells, geology, Republic of Sakha (Yakutia), abnormally high formation pressure

Геологическое строение залежей нефти и газа в Российской Федерации характеризуется специфическим стратиграфическим, формационным и фазово-химическим диапазоном нефтегазоносности с самыми разными глубинными условиями, что предопределяет особенности распределения, состава и условий эксплуатации залежей углеводородов [1]. В сложных горно-геологических условиях имеются зоны с аномально высокими пластовыми давлениями (АВПД). Зоны с АВПД также могут образовываться искусственно в процессе добывания нефти, газа и воды, если нет компенсации пластовой энергии [2]. На се-

годняшний день большинство месторождений на территории Российской Федерации находятся на завершающей стадии разработки, а потому нужно максимально увеличить собственную добычу углеводородов из месторождений из АВПД [3]. Самым сложным является строительство качественной скважины с сохранением лучших фильтрационных характеристик продуктивной зоны пласта на эксплуатационных объектах, что находятся на поздней стадии разработки и с пониженными начальными пластовыми давлениями [4, 5]. Предпосылкой исполнения этих условий является применение облегченных тампо-

нажных растворов во время строительства новых скважин.

Исследователи [6] считают, что предпосылкой возникновения зон с аномально высоким давлением является тектоническая эрозия верхних наслоений породы. То есть когда верхние слои породы размываются, а вертикальные напряжения уменьшаются, матрица породы восстанавливается как эластичное тело, из-за чего объем пор в породе возрастает, а давление флюида в породе уменьшается. Исследованиями [7] определено, что гидродинамические условия флюидной системы в кавернозно -трещиноватых карбонатных коллекторах с АВПД существенно отличаются от обычных гранулярных коллекторов и коллекторов с небольшой трещиноватостью. Наибольшей проблемой во время их первичного раскрытия являются катастрофические поглощения, вызванные АВПД пластовых углеводородных систем и специфическими свойствами трещиноватого коллектора.

Цель статьи – определить простые решения для безопасного и эффективного производства работ по исследованию геологии скважин в Республике Саха (Якутия).

Материалы и методы исследования

В качестве материалов исследования выступали данные об особенностях геологии скважин в Республике Саха (Якутия), при этом использовались методы обобщения, систематизации и анализа научной литературы по проблематике исследования.

Результаты исследования и их обсуждение

Аномальность пластовых давлений обусловлена преимущественно геологическим строением месторождений и разницей плотности нефти, газа, воды и пород, которые их вмещают. Существенное влияние на изменение пластового давления в недрах Земли имеет форма залегания пород и их физическое состояние (уплотнение) [8]. На месторождениях аномально высокое давление может быть, если экранировочная покрышка залегает неглубоко, поверх нефтеносности высокий и нет активного напора пластовых вод. В таком случае, когда под покрышкой сверхнормальное давление нефти равно геостатическому, с увеличением глубины оно растет на величину столба нефти, плотность которой меньше плотности воды в пластовых условиях. Так что с увеличением глубины от экранировочной покрышки при наличии мощного горизонта нефтеносности наблюдаются пластовые давления меньше гидростатических.

Авторы [9] выделяют четыре основные причины образования зон с АВПД:

- 1. Превышение гипсометрической точки бурения скважины над гипсометрическим положением условной пьезометрической поверхности.
- 2. Падение пластового давления в природном резервуаре в результате миграции флюида по трещинам и большим разрывам до дневной поверхности со следующей дегазацией и непосредственным выходом жидкости.
- 3. Опускание коллекторов в герметичных условиях на низший гипсометрический уровень, что приводит к пластовым давлениям, меньшим, чем гидростатическое.
- 4. Формирование в осадочной толще земной коры в результате стрессовых тектонических движений полостей тектонических разрывов, что в определенных геологических условиях предопределяет формирование вакуумного пространства, куда возможна миграция флюидов из природных резервуаров.

Пласты из АВПД размещаются в толщах осадочных отложений между непроницаемыми породами с нормальными или аномально высокими и аномально высокими внутрипоровыми давлениями. Их также называют пьезоминимумами. Создание зон с АВПД в природных резервуарах связано с большим количеством факторов в земной коре, в частности обратной упругой деформацией скелетов из-за эрозии перекрывающих ее толщ, а затем привлечением участков снова в погружение и отложением осадочных толщ меньшей толщины; со снижением температур в коллекторах, а также разницей температурных коэффициентов расширения поровых вод и скелета пород. Согласно геодинамической концепции формирования земной коры, во время действия тектонических усилий в земной коре и смятения пластов коллекторов в складки происходит их механическая деформация, что обнаруживается в периферийных частях структур в уменьшении поровых пространств в пласте и формировании трещин сплющивания и образовании новых трещин, раскрытие которых увеличивается по направлению к своду складки. Итак, в верхней части складки (ее своде) могут образовываться немалые по размеру раскрытые тектонические нарушения.

В начале такого процесса в коллекторе, который заполнен флюидами и залегает под непроницаемыми породами — покрышками аномально высокого пластового давления (АВПД), образованными в результате внутрирезервуарной миграции флюидов

(чаще всего в сводах структур) в направлении замковых частей антиклиналей, с последующей деформацией пластов из-за трещин и больших тектонических нарушений флюиды под давлением мигрируют в породы, которые их вмещают. В склеповых участках складок над пластами АВПД образуются локализованные места вторжения с аномально высоким поровым давлением (АВПОД). Этот процесс на протяжении геологического времени приводит сначала к нивелированию давления в коллекторах, а затем, при хорошей проводимости тектонических зон нарушений и особенно при малых толщинах пород-покрышек, – к формированию АВПД. То есть если покрышки не имеют свойств удерживать высокое давление флюидов в коллекторе, то образуется прорыв флюидов из природного резервуара и в нем пластовое давление уменьшается даже в АВПД. В природных резервуарах АВПД наблюдаются в зонах дизьюнктивов, которые достигают дневной поверхности, четвертичных отложений или зон региональных дислокаций, где происходит выделение газа из нефтегазоводяных залежей со следующей разгрузкой энергии в результате прорыва из них флюидов или же в случае недостаточной мощности покрышек для сдерживания пластовой энергии.

Структурно-тектоническое строение геологического разреза Чаяндинского, Среднеботуобинского и Маччобинского нефтегазоконденсатных месторождений в Республике Саха (Якутия) формировалось под влиянием геодинамического режима многократной активации мелкоблочной тектоники, галакинеза и активных процессов тепломассопереноса в разные геологические эпохи. Это и определило трансгрессивно-регрессивные циклы формирования осадочного бассейна: изменение условий осадконакопления, зон выветривания горных пород, особенности миграции осадочного материала, мест его аккумуляции, дежурство коллекторов и покрышек в разрезе формирования и геологического развития резервуаров и производительных горизонтов в широком литолого-стратиграфическом диапазоне осадочного чехла и фундамента Чаяндинского, Среднеботуобинского и Маччобинского нефтегазоконденсатных месторождений в Республике Саха (Якутия). Осадочный чехол разреза девона, карбона, перми, триаса, юры состоит из таких типов коллекторов: поровых, порово-кавернозно- трещинных и трещинных. Самыми распространенными проблемами, которые мешают качественному строительству скважины, являются нестабильность значений пластовых давлений в пределах отложений

разных ярусов. Распространены пласты из АВПД, которые переслаиваются с пластами из АВПД. На каждом из этих месторождений наблюдаются АВПД с падением градиента пластового давления даже ниже показателя 0,5, кроме этого, эта тенденция и дальше будет продолжаться в результате максимального истощения эксплуатационных объектов. Строительство новых эксплуатационных скважин на этих площадях требует особого подхода к выбору буровых, технологических и тампонажных растворов. Особенно это касается плотности цементной суспензии. Для крепления скважин на этих площадях нужно применять тампонажные растворы с пониженной плотностью для предотвращения поглощения его в пласт и кольматации привлекательной зоны пласта. Месторождения с минимальными (0,6–0,8) значениями градиентов пластового давления нуждаются в использовании легких тампонажных растворов.

Существенное превышение давления столба тампонажного раствора над пластовым давлением может привести к гидроразрыву пласта, кольматации призабойной зоны, значительному проникновению частиц цемента в пласт, что делает невозможным прилив к скважине в будущем. Так, по данным [10] поглощение тампонажного раствора произошло в 2003 г. Одним из примеров последствий превышения плотности тампонажного раствора является цементирование эксплуатационных колонн скважин Чаяндинского, Среднеботуобинского и Маччобинского нефтегазоконденсатных месторождений в Республике Саха (Якутия) в условиях высоких пластовых давлений, где наблюдается поглощение фильтрата тампонажных жидкостей, а отсутствие эффективных буферных жидкостей стало причиной увеличения зоны смешивания технологических жидкостей в скважине. Образованный в таких условиях цементный камень оказался некачественным и неспособным обеспечивать нужную герметичность заколонного пространства, что засвидетельствовали результаты акустической цементометрии (АКЦ) [9].

Были определены простые решения для безопасного и эффективного производства работ по исследованию скважин с АВПД в России.

Описан опыт [7] применения блокирующих составов в процессе обеспечения безопасного текущего и капитального ремонта скважин АВПД. Безопасный контроль над поглощением технологических жидкостей в процессе текущего и капитального ремонта скважин — одна из актуальных задач для Чаяндинского, Среднеботуобин-

ского и Маччобинского нефтегазоконденсатных месторождений в Республике Саха (Якутия). Согласно проведенному исследованию объем поглощения достигает 300-600 м³ при фактической емкости скважин 60 м³. В условиях АВПД для глушения скважин применяются солевые растворы высокой плотности на основе дорогостоящих сухих компонентов. Поэтому выполнение текущего и капитального ремонта скважин в условиях катастрофического поглощения растворов приводит к существенному росту затрат. В этой связи продолжается поиск оптимальных блокирующих составов для использования в процессе текущего и капитального ремонта скважин и представлен опыт применения биополимерных композиций производства ТК «Шлюмберже» (Schlumberger) и ООО «ПСК «Буртехнологии» (г. Пермь).

Описан опыт бурения и освоения скважин в условиях АВПД при наличии зон интенсивного выщелачивания и карстования [8]. Осинский горизонт (Б1) нефтегазоконденсатного месторождения в Республике Саха (Якутия) представлен рифами кембрийского возраста, для которых характерно АВПД, а бурение и заканчивание скважин в этих объектах потребуют применения особых технологий. В ходе проведенных опытных работ наибольшую эффективность применительно к данным условиям показала технология бурения в режиме «грязевой шапки», или РМСD, – без выхода циркуляции и при наличии избыточного давления на устье скважины. Окончание скважин выполнено с использованием «глухого» хвостовика с последующим проведением прострелочно-взрывных работ после монтажа фонтанной арматуры.

В последние годы мы стали значительное внимание уделять автоматизации процессов, цифровой трансформации, развивать интеллектуальные сервисы скважин АВПД с целью обеспечения безопасности [9]. Представлен сервис по регистрации параметров закачиваемых в скважину жидкостей; технология глушения скважин с АВПД, геолого-техническое сопровождение при ремонте скважин, которые полноценно обеспечивают комплексную безопасность и эффективность исследования и эксплуатации скважин АВПД.

С целью устранения отрицательного воздействия на пласт жидкостей глушения при ремонте и заканчивании скважин в условиях АНПД и обеспечения безопасной работы бригады текущего и капитального ремонта скважин АВПД, эффективно используется универсальная технологическая жидкость на углеводородной основе плот-

ностью до 1,2 г/см³ и термостабильностью до 120 °C с регулируемыми в широком диапазоне характеристиками [8]. Использование такой жидкости обеспечивает безопасность выполнения таких технологических операций, как восстановление забоя скважины, разбуривание цементного моста, фрезерование постороннего предмета и др. Также, чтобы сделать процесс безопасным и контролируемым в скважинах АВПД, устье скважины плотно закрывают крышкой, прикрепленной болтами к фланцу верхней обсадной трубы.

Описан также опыт [5] использования в скважинах АВПД СО,, который является продуктом сгорания тепловых электростанций (дымовые газы). При традиционных способах сжигания жидкого органического топлива в среде воздуха, содержащего значительное количество азота, содержание СО, в продуктах сгорания не превышает 7-15%. Дымовые газы с таким низким содержанием СО, могут применяться только для поддержания пластового давления в нефтяных месторождениях, поскольку для эффективного вытеснения нефти содержание СО, в газовой смеси должно быть не менее 50-60%. Изъятие CO₂ из дымовых газов известными способами, например абсорбционным, основанным на применении моноэтаноламина, экономически невыгодно. Для оценки эффективности вытеснения остаточной нефти из обводненных нефтяных пластов с применением каймы СО, выполнены лабораторные исследования на цилиндрической горизонтальной модели пласта из несцементированного песка. Длина модели составляла 37,13 см, внутренний диаметр – 4 см, общий объем модели -466,3 см³, поровой объем -187,7 см³, коэффициент пористости – 40,2 %. Сначала в сухую модель пласта запомпировали углекислый газ в течение 1–2 ч. Затем в модель пласта запомпировалась вода с расходом 1 мл/мин. Для создания насыщенности пористой среды связанной водой в модель пласта закачивалась насосом нефть с расходом 0,5 мл/мин. Начальная нефтенасыщенность модели пласта составляла 95,9%. коэффициент Динамический вязкости нефти равен 1800-2000 мПа·с. В ходе экспериментов нефть вытеснялась из модели пласта 1 % раствором соленой воды (NaCl). Вода запомпировалась насосом с расходом 1,73 мл/мин при среднем давлении в модели пласта 8,3 МПа до отсутствия следов нефти в жидкости на выходе модели (или до незначительного количества нефти в жидкости) [10]. Результаты выполненных лабораторных исследований подтверждают высокую эффективность применения СО, для повышения коэффициента нефтеизвлечения месторождений нефти повышенной вязкости. Этот метод повышения безопасности и эффективности нефтеизвлечения может найти широкое применение на месторождениях Российской Федерации, большинство из которых находится на завершающей стадии разработки, обводнения и содержит значительные остаточные запасы нефти повышенной вязкости.

Во всех нефтегазоносных районах Российской Федерации имеются зоны с АВПД. Также, проанализировав падение градиента пластового давления на скважинах Чаяндинского, Среднеботуобинского и Маччобинского нефтегазоконденсатных сторождений в Республике Саха (Якутия), констатируем, что каждому из эксплуатационных объектов присуще его падение ниже 1, а у некоторых продуктивных горизонтов даже ниже значения 0,5. Разработка этих месторождений в современных условиях нуждается в строительстве новых эксплуатационных скважин с предотвращением загрязнения призабойной зоны пласта при креплении и обеспечении надежной изоляции заколонного пространства. Достичь этого можно, применяя облегченные и легкие тампонажные растворы, которые делают невозможными большую депрессию на пласт и опасность непредвиденных поглощений тампонажной суспензии и гидроразрыва в пласте.

Заключение

В статье были определены простые решения для безопасного и эффективного производства работ по исследованию скважин с АВПД в России. Показано, что разработка месторождений со скважинами АВПД в современных условиях нуждается в строительстве новых эксплуатационных скважин с предотвращением загрязнения призабойной зоны пласта при креплении и обеспечении надежной изоляции заколонного пространства. Достичь этого можно, применяя облегченные и легкие тампонажные раство-

ры, которые делают невозможными большую депрессию на пласт и опасность непредвиденных поглощений тампонажной суспензии и гидроразрыва в пласте.

Список литературы

- 1. Бородкин В.Н., Смирнов О.А., Курчиков А.Р., Лукашов А.В., Недосекин А.С., Погрецкий А.В., Смирнов А.С. К вопросу прогноза зон аномально высоких пластовых давлений в разрезе Баренцево-Карского шельфа с учетом данных бурения и сейсморазведки // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2019. № 4. С. 12—19.
- 2. Карасев Д.В., Карасева Т.В., Щербинина Н.Е. Особенности осложнений при проведении буровых работ на больших глубинах // Нефтегазовое дело. 2015. № 4. С. 19–31.
- 3. Корнев А.И. Анализ геологического параметра режим работы залежи, перспектива его изучения и использования для разработки месторождений // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXIII Международного симпозиума студентов и молодых учёных имени академика М.А. Усова, посвященного 120-летию со дня рождения академика К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К.В. Радугина (Томск, 08–12 апреля 2019 г.). Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. С. 49–52.
- 4. Орехов А.Н., Марсьяль А.М. Изучение зон аномального пластового давления с помощью анализа атрибутов сейсмических полей на примере месторождений Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 5. С. 46–56.
- 5. Прохоров П.Э., Волков В.А., Турапин А.Н., Афанасьев С.В. Технологические аспекты реализации газоциклической закачки диоксида углерода для увеличения добычи высоковязких нефтей // Нефть. Газ. Новации. 2018. № 8. С. 20–25.
- 6. Фомкин А.В., Жданов С.А. Тенденции и условия развития технологий повышения эффективности нефтеизвлечения в России и за рубежом // Нефтепромысловое дело. 2015. № 12. С. 3–5.
- 7. Abdolahi-Mansoorkhani H., Seddighi S. H₂S and CO₂ capture from gaseous fuels using nanoparticle. Energy. 2019. No. 168. P. 847–57.
- 8. Doan A.A., Holley A.C., Li L., Kellum M.G. A Novel Cement System to Ensure Slurry Stability in Horizontal Well. Oklahoma City Oil and Gas Symposium (Oklahoma City, 27–31 March 2017). Oklahoma, USA, 2017. P. 67–71.
- 9. Song Ge. Coupling model of transient temperature and pressure in gas wells. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- 10. Hao X., Junfeng Z., Chengzao J., Dazhen T., Wei Y. Influence of tectonic uplift-erosion on formation pressure. Petroleum Science. Vol. 7. Iss. 4.

СТАТЬЯ

УДК 616.23/.24-002.2. 612.112. 94-577.23. 577.121

КЛИНИКО-ИММУНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ФЕРМЕНТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБМЕНА КЛЕТОК ПРИ ХОБЛ С ЧАСТЫМИ ОБОСТРЕНИЯМИ

¹Косякова Н.И., ^{1,2}Акуленко М.В., ^{1,3}Прохоренко И.Р.

¹Больница Пущинского научного центра РАН, Пущино, e-mail: nelia_kosiakova@mail.ru; ²Институт теоретической и экспериментальной биофизики клетки РАН, Пущино; ³Институт фундаментальных проблем биологии РАН, Пущино

Проведен сравнительный анализ особенностей продукции провоспалительных цитокинов и ферментов энергетического обмена клеток у пациентов с хронической обструктивной болезнью легких (ХОБЛ) с частыми и редкими обострениями в стадии ремиссии. Изучались маркеры системного воспаления: фибриноген, СРБ, IL-6, IL-1β, IL-8, TNF-а и ферменты энергетического обмена клеток: сукцинатдегидрогеназа (СДГ), как показатель активности митохондриального дыхания, и лактатдегидрогеназа (ЛДГ), как показатель одного из восстановительных путей биосинтеза гликолиза и его динамического фонда взаимопревращений молочной и пировиноградной кислот. Показано, что пациенты как с частыми, так и с редкими обострениями в период ремиссии имели повышенные значения маркеров воспаления и дисбаланс ферментов энергетического обмена клеток. В группе пациентов с частыми обострениями, у которых определялись повышенные значения TNF-а и ІІ-6 в период ремиссии, активность ЛДГ и СДГ оставалась повышенной на 30% и 20% соответственно по сравнению с контрольной группой, что указывало на более выраженную активность воспалительного процесса и угрозу очередного обострения. Принципиальные отличия имелись в группе пациентов с редкими обострениями, у которых были выявлены более значимые изменения уровня ферментов СДГ и ЛДГ по сравнению с маркерами воспаления. Если маркеры воспаления в период ремиссии незначительно превышали их значения в контрольной группе, то активность СДГ и ЛДГ была ниже показателей контрольной группы. Активность СДГ при этом оставалась значительно сниженной по сравнению с группой контроля, что указывало на сохраняющуюся гипоксию тканей в период ремиссии. Выявленные особенности маркеров воспаления и ферментов энергетического обмена клеток позволяют расширить представления о патогенезе ХОБЛ и могут стать основанием для выявления новых потенциальных биомаркеров (соотношение СДГ и ЛДГ), которые могут быть использованы для уточнения прогноза и подбора индивидуальной терапии.

Ключевые слова: хроническая обструктивная болезнь легких, провоспалительные цитокины, ферменты энергетического обмена клеток

CLINICAL AND IMMUNOLOGICAL CHARACTERISTICS AND CELL ENERGY METABOLISM ENZYMES DURING CHRONIC OBSTRUCTIVE PULMONARY DISEASE WITH FREQUENT EXACERBATIONS

¹Kosyakova N.I., ^{1,2}Akulenko M.V., ^{1,3}Prokhorenko I.R.

¹Hospital of Puschino Scientific Center RAS, Puschino, e-mail: nelia_kosiakova@mail.ru; ²Institute of Theoretical and Experimental Biophysics RAS, Puschino; ³Institute of Basic Biological Problems RAS, Puschino

Comparative analysis of the peculiarities of secretion of pro-inflammatory cytokines and production of cell energy metabolism enzymes in patients with chronic obstructive pulmonary disease with frequent and rare exacerbations was carried out during remission stage. The following markers of systemic inflammations were studied: fibrinogen, CRP, IL-6, IL-1β, IL-8, TNF-alpha; activity of energy metabolism enzymes, succinate dehydrogenase (SDH) as a marker of mitochondrial respiration, and lactate dehydrogenase (LDH) as an indicator of one of reductive glycolysis biosynthetic pathway and of the dynamic pool of interconversions of lactic and pyruvic acid, was also measured. The patients with both frequent and rare exacerbations were shown to possess elevated values of inflammation markers and imbalance of cell energy metabolism enzymes during remission period. The group of patients with frequent exacerbations, where increased values of TNF-alpha and IL-6 concentration during remission period were shown, had LDH and SDH activities elevated by 30% and 20% compared to control, respectively, which showed more drastic activity of inflammation process and threat of close exacerbation. Principal differences were shown in the group of subjects with rare exacerbations, where more significant changes in SDH and LDH activities were shown compared to inflammation markers. While the levels of inflammation markers did not dramatically exceed the control values during remission periods, SDH and LDH activities were below control, and SDH was especially significantly decreased compared to control group, which demonstrated persisting tissue hypoxia in remission period. The revealed characteristics of inflammation markers and cell energy metabolism enzymes will expand the knowledge of COPD pathogenesis and establish a basis for revelation of novel potential biomarkers (SDH to LDH ratio), which could be used in clarification of prognosis and personalized treatment selection.

Keywords: chronic obstructive pulmonary disease, pro-inflammatory cytokines, cell energy metabolism enzymes

Хроническая обструктивная болезнь легких (ХОБЛ) остается одним из наиболее распространенных хронических неинфекционных заболеваний и характеризуется

значительной неоднородностью клинических проявлений. Традиционно выделяются бронхитический, эмфизематозный и смешанный фенотипы течения ХОБЛ [1, 2].

Рассматриваются особенности ХОБЛ у женщин, у лиц пожилого возраста, при ожирении, при сочетании бронхиальной астмы с ХОБЛ [2, 3]. В последние годы выделен особый фенотип ХОБЛ – ХОБЛ с частыми обострениями [4, 5]. В Испанских национальных рекомендациях по лечению ХОБЛ от 2012 г. выделяются четыре основных фенотипа: эмфизематозный и бронхитический с редкими обострениями; эмфизематозный с частыми обострениями; бронхитический с частыми обострениями; перекрест ХОБЛ и БА [6]. Важным критерием для выявления фенотипа с частыми обострениями, помимо регистрации более двух обострений в течение года, является то обстоятельство, что эти обострения развиваются через 4–6 недель от начала предыдущего обострения, если лечение не проводилось [7]. Как правило, обострения ХОБЛ развиваются при воздействии различных агентов и триггеров, но чаще всего является следствием контакта с инфекционными патогенами, что усиливает хроническое системное воспаление, которое лежит в основе патогенеза ХОБЛ [2, 8]. Системное воспаление при ХОБЛ сопровождается повышением уровня большинства про- и противовоспалительных цитокинов, прежде всего интерлейкинов (IL): IL-1 α , IL-1 β , IL-6, IL-8, IL-18, IL-22 и фактора некроза опухоли — альфа (TNF- α), которые имеют тесную корреляцию с тяжестью заболевания и достигают максимальных значений в период обострения [9]. Нейтрофилы, Т-лимфоциты и макрофаги поддерживают воспаление в бронхах. Под действием триггерных факторов нейтрофилы мигрируют в легкие и являются источником свободных радикалов, а также выделяют нейтрофильную эластазу, миелопероксидазу, металлопротеазу, которые вместе с TNF-α и интерлейкинами являются основными медиаторами воспаления при развитии обструкции легких [10]. Ряд исследователей, изучая значение окислительного стресса в патогенезе ХОБЛ, определили в качестве эффекторов свободные радикалы и активные формы кислорода [11, 12]. Результатом окислительного стресса является непосредственное повреждающее действие на структуры легких, а также активация молекулярных механизмов, запускающих воспалительный и продукцию провоспалительных цитокинов в легочной ткани. В связи с этим считается, что нарушение баланса между оксидантами и антиоксидантами играет значимую роль в патогенезе хронической обструктивной болезни легких [12]. Определить единственную причину формирования хро-

нического воспалительного процесса достаточно сложно, но одной из наиболее частых причин нарушения энергетического баланса является гипоксия. Она характеризуется нарушением клеточного дыхания, недостаточностью биологического окисления и дефицитом энергии в клетках, что может служить важным патогенетическим аспектом расшифровки молекулярных механизмов реализации локального и системного воспаления при ХОБЛ [13]. В условиях гипоксии происходит изменение работы дыхательной цепи, возрастает уровень сукцината в крови и тканях и значение вклада сукцинатоксидазного окисления в общее дыхание [14]. На клеточно-молекулярном уровне индукция перечисленных выше патологических процессов приводит к нарушениям ультраструктуры и функции важной клеточной органеллы – митохондрии, к дисбалансу ферментов энергетического обмена клеток, представленных сукцинатдегидрогеназой и лактатдегидрогеназой [15]. Показателем активности митохондриального дыхания считается сукцинатдегидрогеназа (СДГ), а показателем одного из восстановительных путей биосинтеза гликолиза – лактатдегидрогеназа (ЛДГ), которая отражает взаимопревращение молочной и пировиноградной кислот. В условиях гипоксии тканей восстановительные процессы начинают отставать от восполнения затрат, и это формирует дополнительный порочный метаболический круг развития патологии на уровне клеточного дыхания [15]. При повреждениях митохондрий отмечена также активация моноцитов и нейтрофилов, участвующих в воспалительных процессах [16]. В работах S.E Weinberg с соавт. [17] было показано, что митохондриальный аэробный гликолиз необходим для активации Т-клеток посредством генерации митохондриальных АФК, необходимых для оптимальной активности ядерного фактора активированных Т-клеток. Также было отмечено, что белок митохондриальной противовирусной передачи сигнала играет одну из важных ролей в патогенезе ХОБЛ, поддерживая внутриальвеолярное воспаление, повышенные уровни протеаз и цитокинов, нарушение регуляции продукции активных форм кислорода АФК [18]. На сегодняшний день расширяется круг доказательств важной роли ферментов энергетического обмена клеток, обусловливающих митохондриальную дисфункцию, в патогенезе заболеваний различных органов и систем [19, 20]. Частые обострения ведут к прогрессированию клинических симптомов, ухудшению качества жизни, снижению эффективности проводимой терапии. Таким образом, становится актуальной задача по определению особенности клинико-иммунологических показателей и уровня ферментов энергетического обмена клеток у пациентов ХОБЛ с частыми обострениями в период ремиссии для разработки индивидуальных программ профилактики очередных обострений.

Цель исследования — оценить клиникоиммунологические показатели и показатели ферментов энергетического обмена клеток у пациентов ХОБЛ с частыми обострениями в сравнении с пациентами ХОБЛ, имеющими редкие обострения.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось с 2020 по 2022 г. на базе Больницы ПНЦ РАН, ИФПБ РАН и ИТЭБ РАН в рамках госзадания № 075-01406-20-01 по программе 0576-2020-0006, одобренной локальным этическим комитетом Б ПНЦ РАН, протокол № 16 от 20.11.2019 г.

Все пациенты, включенные в исследование, подписывали информированное согласие.

Критериями включения в исследование явились: стабильное состояние в течение предшествующих четырех недель у пациентов с ХОБЛ 2 стадии по спирометрическим показателям, отсутствие острых инфекционных заболеваний любой этиологии и локализации, острой и тяжелой хронической дыхательной и сердечно-сосудистой недостаточности, нарушения ритма, перенесенные сосудистые катастрофы (острый инфаркт миокарда и острое нарушение мозгового кровообращения), пневмония, туберкулез легких, бронхиальная астма, злокачественные заболевания любой локализации, беременность, оперативные вмешательства, отказ от исследования.

Под динамическим наблюдением находились 162 пациента с верифицированным диагнозом ХОБЛ, который был установлен согласно Международной программе «Глобальной инициативы по ХОБЛ (GOLD-2019)», Клиническим рекомендациям Российского респираторного общества, 2019 г., под ред. А.Г. Чучалина [1, 2].

Возраст пациентов от 40 до 75 лет. Согласно критериям включения в первую группу наблюдения вошли 48 пациентов с ХОБЛ 2 ст., которые имели документально подтвержденные частые обострения. Вторую группу (n = 62) составили пациенты с ХОБЛ 2 ст., имеющие редкие обострения. В группу контроля (n = 28) были включены условно здоровые пациенты, не курящие и не имеющие клинико-лабораторного и инструментального подтверждения пато-

логии со стороны верхних и нижних отделов органов дыхания. Всем пациентам проводилось в динамике, в течение двух лет, общеклиническое, лабораторное обследование, КТ органов дыхания, оценка показателей функции внешнего дыхания, проба с сальбутамолом 400 мкг на спирографе «SpiroLab III» (MIR, Италия) и на аппарате «Валента» (Санкт-Петербург, Россия) путем анализа кривой «поток-объем» и оценки показателей ОФВ1 и ОФВ1/ ФЖЕЛ, проба с 6-минутной дозированной ходьбой (6MWD), м, определялась сатурация кислорода (SaO₂). Для оценки степени обратимости обструкции использовалась проба с β2-агонистом короткого действия (сальбутамолом – 400 мкг). ОФВ1 измеряли до и через 15 мин после ингаляции препарата. Увеличение ОФВ1 через 15 мин больше 15% от исходного свидетельствовало об обратимости обструкции [1]. Степень выраженности одышки оценивалась по шкале mMRC, симптомы заболевания – по вопроснику САТ (COPD Assessment Test – оценочный тест по ХОБЛ) [1, 2].

Маркеры воспаления: СРБ определяли количественным иммунотурбодиметрическим методом с использованием набора реагентов «ДДС» (Россия) на биохимическом автоматическом анализаторе BS-400 Mindray (КНР); фибриноген – методом Клаусса; провоспалительные цитокины (IL-1β, IL-6, IL-8, $TNF-\alpha$) – с помощью иммуноферментного анализатора MULTISKAN FC (Thermo Scientific Microplate Reader, США) по методике, прилагаемой к тестовым системам ЗАО «Вектор Бест», г. Новосибирск. Показатели ферментов энергетического обмена клеток (СДГ и ЛДГ) изучали цитобиохимическим методом в лимфоцитах периферической крови [3].

Статистическая обработка проводилась с использованием компьютерной программы Statistika 6.0. Рассчитывалось среднеарифметическое (±) стандартное отклонение (М±SD). Дальнейшую обработку результатов проводили с применением анализа t-теста Стьюдента. Для оценки степени корреляции использовали критерий корреляции Пирсона (г). Различия считались статистически значимыми при р < 0,05.

Результаты исследования и их обсуждение

Пациенты всех групп наблюдения были сравнимы по полу, возрасту, длительности заболевания. Средний возраст составил в 1 гр. $-54,4\pm3,11$ года, во 2 гр. $-55,8\pm1.81$ и в группе контроля $-54,6\pm1,26$. Длительность заболевания ХОБЛ - соот-

ветственно $12,08\pm3,83$ и $11,06\pm2,69$ лет. Среднее число обострений ХОБЛ по данным медицинской документации у пациентов 1 гр. было равно $2,6\pm0,14$ случаев в год и для пациентов 2 группы наблюдения -0,8±0,16. Активно курили 36 пациентов 1 гр. $-22,4\pm1,8$ пачко/лет и 47 пациентов 2 гр. – 14,7±1,6 пачко/лет. Медикаментозную терапию все пациенты с ХОБЛ 2 ст. до момента включения в исследование получали нерегулярно, в основном комбинированные бронходилататоры короткого действия, антихолинергические препараты короткого действия. При обострении заболевания назначались по показаниям антибиотики по стандартным схемам лечения, предусмотренные GOLD (пересмотр 2018 г.), муколитики и глюкокортикостероиды через небулайзер и/или внутривенно [1].

С 2020 г. пациентам была назначена терапия комбинированными препаратами длительного действия ДДАХ/ ДДБА (ДДАХ – длительно действующие антихолинергики и ДДБА – длительно действующие β2-агонисты). В период ремиссии существенной разницы в показателях функ-

ции внешнего дыхания у пациентов групп наблюдения выявлено не было, соответственно 63,4±4,9 и 66,7±3,8 %D. Пациенты 1 гр. наблюдения в 67% случаев предъявляли жалобы на кашель с мокротой, и у них диагностировался преимущественно бронхитический фенотип ХОБЛ, в то время как у 78% пациентов 2 гр. наблюдения чаще беспокоила одышка и диагностировался преимущественно эмфизематозный фенотип. Примечательно, что сатурация кислорода у пациентов 2 гр. в период ремиссии и тест с 6-минутной дозированной ходьбой оставалась низкой и практически не отличалась от показателей пациентов 1 гр., что указывало на сохранение гипоксии у них даже в период ремиссии (табл. 1).

В анализах крови по общепринятым маркерам воспаления (количество лейкоцитов, СРБ, уровень фибриногена) отличий установлено не было. В то же время в периферическом анализе крови у пациентов 1 гр. в 58% случаев выявлялась лимфопения и умеренно выраженная эозинофилия как в период обострения, так и в период ремиссии (табл. 2).

 Таблица 1

 Показатели степени выраженности одышки, симптомов заболевания, сатурации кислорода, функциональных резервов организма при ХОБЛ

Поморожому	ХОБЛ с обострениями	частыми и 1 гр. (n = 48)	ХОБЛ с обострениями		Контроль
Показатель	Период обострения	Период ремиссии	Период обострения	Период ремиссии	(n = 28)
Одышка по шкале mMRC	3,02±0,22	1,92±0,09	2,13±0,71	1,04±0,06	0
SaO2	94,44±1,87	96,07±1,56	94,22±0,54	96,81±0,12	98,01±0,12
САТ-тест, баллы	26±7	21±2	23±+3	17±+1	0–10 баллов
Тест 6MWT	304,6±9,2 м	344,9±6,7	334,6±9,2 м	349,9±6,7	576,2±6,8

P < 0.005.

 Таблица 2

 Показатели крови у пациентов с ХОБЛ

Показатели	Хобл с ч обострения	настыми ями, n = 48		редкими ми в стадии и, n = 62	Группа контроля, n = 28
	В стадии обострения	В стадии ремиссии	В стадии обострения	В стадии ремиссии	
Лимфоциты, абс. количество	1,1±0,32	1,6±0,91	2,,4±1,02	2,7±0,85	2,8±1,45
Эозинофилы, кл/мкл	119,6±12,41	102,2±23,12	73,2±14,21	68,04±12,84	45,83±23,12
СРБ (реф. зн. 0–5 мг/дл)	6,85±+5,05	4,88±+1,91	5.89±+0.97	2,79±+0,14	0.22±+0,07
Фибриноген г/л	4,88±+0,16	3,12±+0,92	4,07±+0,87	3,72 ±+ 0,19	3,43±+0,24

P < 0.005.

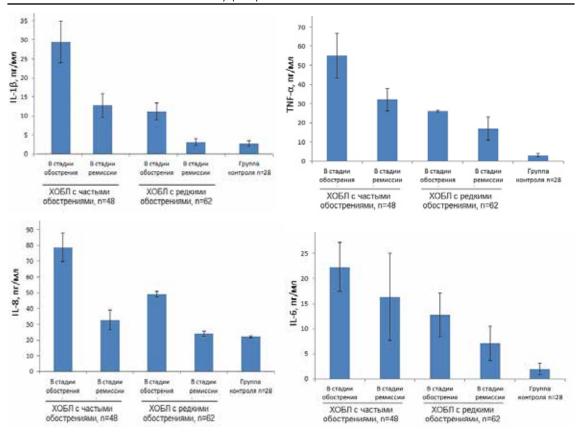


Рис. 1. Уровень провоспалительных цитокинов у больных ХОБЛ с частыми обострениями и больных ХОБЛ с редкими обострениями в период ремиссии и обострения

Среди признанных биомаркеров воспаления по данным литературы считается повышение уровней IL-6, TNF-а, IL-8, IL1β, CPБ, фибриногена в период обострения воспалительного процесса [21, 22]. Данные исследования продукции провоспалительных цитокинов в сыворотке крови пациентов с ХОБЛ двух групп наблюдения в период обострения и в период ремиссии представлены на рис. 1.

Из представленных данных видно, что в период обострения уровень всех провоспалительных цитокинов: TNF-α, IL-6, IL-8, IL1- β – был выше по сравнению с периодом ремиссии и с контролем, как в группе пациентов с частыми обострениями, так и в группе пациентов с редкими обострениями, что указывало на выраженность воспалительного процесса. Примечательно, что такая же закономерность оставалась и у пациентов группы ХОБЛ с редкими обострениями не только в период обострения, но и в период ремиссии. Так, в период ремиссии показатели TNF-а в группе пациентов с редкими обострениями превышали контрольные значения в 5,4 раза, IL-6 в 3,5 раза, IL-8 в 1, 09 раза и IL-1-β в 1,14 раза соответственно, при р < 0,05. Известно, что повышенные количества TNF- α , IL-6, IL-8 поддерживают системное воспаление, а IL-1 β повышает хемотаксис, проницаемость сосудистой стенки, запускает реакции воспалительно-регуляторного каскада, стимулируя синтез коллагена, что способствует более раннему снижению функции внешнего дыхания и формированию фиброза [21, 22].

В группе пациентов с частыми обострениями, у которых определялись повышенные значения TNF-а и IL-6 в период ремиссии, активность ЛДГ и СДГ оставалась повышенной на 30% и 20% по сравнению с контрольной группой, что указывало на более выраженную активность воспалительного процесса и угрозу очередного обострения. Принципиальные отличия наблюдались в группе пациентов с редкими обострениями, у которых были выявлены более значимые изменения уровня ферментов СДГ и ЛДГ по сравнению с маркерами воспаления. Если маркеры воспаления в период ремиссии незначительно превышали показатели значений в контрольной группе, то активность СДГ и ЛДГ была ниже показателей контрольной группы. Активность СДГ при этом оставалась значительно сниженной по сравнению с группой контроля, что указывало на сохраняющуюся гипоксию тканей у больных ХОБЛ с редкими обострениями в период ремиссии. Корреляционный анализ между показателями сатурации кислорода, провоспалительным цитокином IL-6 и ферментами энергетического обмена клеток у пациентов ХОБЛ с редкими обострениями показал, что чем ниже была сатурация кислорода и выше активность IL-6, тем ниже были показатели ферментов энергетического обмена клеток. На рис. 2 и 3 представлена корреляционная зависимость между SaO, СДГ и ЛДГ.

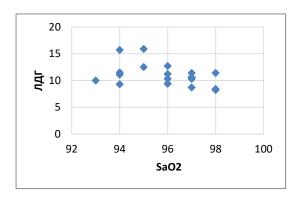


Рис. 2. График корреляционной связи между SaO₂ и ЛДГ у пациентов 2 гр. наблюдения Коэффициент корреляции – -0,40455

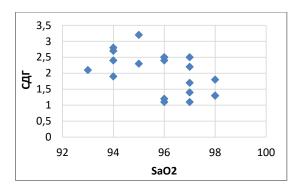


Рис. 3. График корреляционной связи между SaO₂ и СДГ у пациентов 2 гр. наблюдения Коэффициент корреляции – -0,53255

Из представленных результатов видно, что наиболее выраженная корреляционная зависимость была установлена между показателями SaO₂ и СДГ ($\mathbf{r}=$ -0,53255 при $\mathbf{p}<$ 0,05) и между SaO₂ и ЛДГ($\mathbf{r}=$ -0,40455 при $\mathbf{p}<$ 0,05) у пациентов с редкими обострениями.

Такая же закономерность прослеживалась и у пациентов с ХОБЛ с частыми обострениями, что подтверждает значение гипоксии в патогенезе ХОБЛ. Таким образом, ХОБЛ с частыми обострениями чаще встречается у пациентов с бронхитическим фенотипом и характеризуется более выраженными изменениями функциональных, иммунологических и метаболических показателей по сравнению с пациентами ХОБЛ с редкими обострениями. В период ремиссии пациенты ХОБЛ с редкими обострениями сохраняли активность маркеров воспаления и сниженные показатели ферментов энергетического обмена, что указывало на угрозу очередного обострения. Чем ниже были значения СДГ, тем чаще возникали обострения ХОБЛ.

В патогенезе ХОБЛ ведущая роль принадлежит системным эффектам воспаления и окислительному стрессу. На клеточно-молекулярном уровне индукция перечисленных выше патологических процессов и хроническая гипоксия тканей могут нарушать ультраструктуру и функционирование важной клеточной органеллы — митохондрии.

При снижении доставки кислорода к митохондриям в клетках происходит нарушение активности ферментов энергетического обмена. Выявленные особенности маркеров воспаления и ферментов энергетического обмена клеток позволят расширить представления о патогенезе ХОБЛ и могут стать основанием для выявления новых потенциальных биомаркеров (СДГ и ЛДГ), которые смогут быть использованы для уточнения прогноза и подбора индивидуальной терапии.

Список литературы

- 1. Global Inititative for Chronic Obstructive Lung Disease (GOLD). Global Strategy for the Diagnosis, Management and Prevention of COPD // Gold Reports 2018. [Электронный ресурс]. URL: http://goldcopd.org/wp-content/uploads/2017/11/GOLD-2018.Vol. 6.0-FINAL-revised-20-Nov_WMS.pdf (дата обращения: 24.08.2022).
- 2. Чучалин А.Г., Авдеев С.Н., Айсанов З.Р., Белевский А.С., Лещенко И.В., Овчаренко С.И., Шмелев Е.И. Российское респираторное общество. Федеральные клинические рекомендации. Хроническая обструктивная болезнь легких. 2019. 76 с. URL: https://diseases.medelement.com/disease-2018/16551 (дата обращения: 24.08.2022).
- 3. Косякова Н.И., Захарченко М.В., Шварцбурд П.М., Кондрашова М.Н. Исследование ферментов лимфоцитов крови с целью разработки чувствительного метода диагностики и коррекции патологии катаболизма и анаболизма при хронической обструктивной болезни легких у пожилых больных // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 11. С. 277–282. DOI: 10.17513/mjpfi.12490.
- 4. Hurst J.R., Vestbo J., Antonio A., Locantore N., Müllerova H., Tal-Singer R., Miller B., David A. Lomas, Alvar Agusti, M.D., William MacNee, Ch.B., Peter Calverley, Stephen Rennard, Emiel F.M. Wouters, Wedzicha J.A. Susceptibility to exacerbation in chronic obstructive pulmonary disease. N Engl J Med. 2010 Sep. Vol. 16.363. No. 12. P. 1128–1138. DOI: 10.1056/NEJMoa0909883Vol.16;363.
- 5. Авдеев С.Н. Определение клинических фенотипов хронической обструктивной болезни легких: новый под-

- ход к терапии заболевания // Терапевтический архив. 2011. № 3. С. 66–74.
- 6. Spanish COPD Guidelines (GesEPOC): pharmacological treatment of stable COPD. Spanish Society of Pulmonology and Thoracic Surgery //Arch Bronconeumol. 2012. Vol. 48. No. 7. P. 247–57. DOI: 10.1016/j.arbres.2012.04.001. E, pub 2012 May 3.
- 7. Soler-Cataluna J.J., Rodriguez-Roisin R. Frequent chronic obstructive pulmonary disease exacerbators: how much real, how much fictitious? COPD 2010. No 7. P. 276–284.
- 8. Miravitlles M., Anzueto A. Role of infection in exacerbathions of chronic obstructive pulmonary disease. Curr Opin Pulm Med. 2015. Vol. 21. No. 3 P. 278–283.
- 9. Овсянников Е.С., Авдеев С.Н., Будневский А.В. Системное воспаление у больных хронической обструктивной болезнью легких и ожирением // Терапевтический архив. 2020. Т. 92. № 3. С. 13–18. DOI: 10.26442/00403660.2020.03.000265.
- 10. Никонова А.А., Хаитов М.Р., Хаитов Р.М. Характеристика и роль различных популяций макрофагов в патогенезе острых и хронических заболеваний легких // Медицинская иммунология. 2017. Т. 19. № 6. С. 657–672. DOI: 10.15789/1563-0625-2017-6-657-672.
- 11. Fischer B.M., Pavlisko E., Voynow J.A. Pathogenic triad in COPD: oxidative stress, protease-antiprotease imbalance, and inflammation. Int J Chron Obstruct Pulmon Dis. 2011. Vol. 6. P. 413–421.
- 12. Кубышева Н.И., Соодаева С.К., Постникова Л.Б., Кузьмина Е.И., Конторщикова К.Н., Климанов И.А. Исследование показателей оксидативного стресса у больных с обострением хронической обструктивной болезни легких // Пульмонология. 2019. Т. 29. № 6. С. 708–715. DOI: 10.18093/0869-0189-2019-29-6-708-715.
- 13. Сухоруков В.С., Клейменова Н.В., Тозлиян Е.В., Шабельникова Е.И., Белов В.А., Крапивкин А.И. Энерго-

- дефицитный диатез // Клинико-лабораторный консилиум. 2011. № 4. Т. 40. С. 44–49.
- 14. Ariza A.C., Deen P.M.T., Robben J.H. The succinate reporter as a novel therapeutic target for oxidative and metabolic stress-related conditions. Frontiers in Endocrinology. Molecular and Structural Endocrinology. 2012. Vol. 3. P. 1–8.
- 15. Aravamudan B., Thompson M.A., Pabelick C.M., Prakash Y.S. Mitochondria in Lung Diseases. Expert Rev. Respir. Med. 2013. Vol. 7. No. 6. P. 631–646.
- 16. Walker M.A., Volpi S., Sims K.B., Walter J.E., Traggiai E. Powering the immune system: mitochondria in immune function and deficiency. J Immunol Res. 2014. Vol. 16. P. 4309. DOI: 10.1155/2014/16 4309.
- 17. Weinberg S.E., Sena L.E., Chandel N.S. Immunity Disease. 2015. No. 3. P. 406–417. DOI: 10.1016/j. immuni.2015.02.002.
- 18. Kang M.J., Shadel G.S. A mitochondrial perspective of chronic obstructive pulmonalis pathogenesis. Tuberc. Respir. Diseases. 2016. Vol. 79. P. 207–213. DOI: 0.4046/trd.2016.79.4.207-213.
- 19. Lukyanova L.D., Dudchenko A.V., Tzybina T.A., Germanova E.L. Mitochondrial signaling in adaptation to hypoxia. Hypoxia Medical J. M., 2006. No. 1. P. 2–22.
- 20. Анаев Э.Х. Биологические маркеры при хронической обструктивной болезни легких. Текст научной статьи по специальности «Клиническая медицина» // Практическая пульмонология. 2018. № 1. С. 26–31.
- 21. Симбирцев А.С. Цитокины в патогенезе и лечении заболеваний человека. СПб.: «Фолиант», 2018. 512 с.
- 22. Masters S.L., Simon A., Aksentijevich I., Kastner D.L. Horror autoinflammaticus: the molecular pathophysiology of autoinflammatory disease. Annu Rev Immunol. 2009. Vol. 27. P. 621–668. DOI: 10.1146/annurev.immunol.25.022106.141627.

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 616-001.1:612.438

ОСОБЕННОСТИ РЕАБИЛИТАЦИИ СПОРТСМЕНОВ НА ФОНЕ ПОСТКОВИДНОГО СИНДРОМА

Галимов Ф.Х., Тонкачев А.С., Каскинова И.И., Каскинова Р.И., Халиков А.А.

ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Уфа, e-mail: kirillkuznetsov@aol.com

SARS-CoV-2 был идентифицирован в 2019 г. как респираторный коронавирус, вызывающий коронавирусную болезнь (COVID-19). COVID-19 стал глобальной пандемией, которая затронула спортсменов всех уровней. У многих спортсменов, инфицированных COVID, заболевание протекает легко или бессимптомно, и большинство спортсменов могут вернуться к занятиям спортом в течение нескольких недель. Тем не менее от 10 до 15 % людей, инфицированных COVID-19, имеют продолжительные симптомы заболевания, которые длятся от нескольких недель до нескольких месяцев и влияют на их способность функционировать и тренироваться. Не так много известно о том, почему некоторые люди имеют затяжное течение заболевания, на сегодняшний день отсутствуют какие-либо методики для прогнозирования такого течения заболевания. Тем не менее многие спортсмены страдают от длительного течения COVID-19, что существенно замедляет процесс возвращения к тренировкам и соревнованиям. Цель исследования – проанализировать зарубежную литературу, посвященную диагностике, лечению, а также реабилитации постковидного синдрома (ПКС) у спортеменов, и разработать алгоритм ведения таких пациентов для практикующих врачей. Хотя большинство спортсменов моложе и здоровее, чем общая популяция, они по-прежнему восприимчивы к вирусу SARS CoV-2, а у 10% может развиться ПКС. Важно использовать категориальный органоспецифичный подход в диагностике, чтобы определить целенаправленный подход к пониманию патогенеза и потенциальные методы лечения. Усталость и сердечно-легочные проявления ПКС являются основными ограничителями для возвращения к физическим упражнениям. Упражнения могут быть возобновлены после того, как симптомы уменьшились в градуированном процессе. Необходимы дополнительные исследования, чтобы разработать основанную на фактических данных модель по возвращению в спорт на фоне ПКС.

Ключевые слова: спорт, реабилитация, постковидный синдром, восстановление, тренировки

FEATURES OF REHABILITATION OF ATHLETES ON THE BACKGROUND OF POST-COVID SYNDROME

Galimov F.Kh., Tonkachev A.S., Kaskinova I.I., Kaskinova R.I., Khalikov A.A.

Bashkir State Medical University, Ufa, e-mail: kirillkuznetsov@aol.com

SARS-CoV-2 was identified in 2019 as the respiratory coronavirus that causes coronavirus disease (COVID-19). COVID-19 has become a global pandemic that has affected athletes of all levels. Many athletes infected with COVID have mild or asymptomatic illness, and most athletes can return to sports within a few weeks. However, 10% to 15% of people infected with COVID-19 have long-term symptoms of the disease that last weeks to months and affect their ability to function and exercise. Not much is known about why some people have a protracted course of the disease, and there are currently no methods to predict such a course of the disease. However, many athletes are suffering from a prolonged course of COVID-19, which significantly slows down the process of returning to training and competition. The purpose of the study is to analyze foreign literature on the diagnosis, treatment, and rehabilitation of post-COVID syndrome (PCS) in athletes and to develop an algorithm for managing such patients for practicing physicians. Although most athletes are younger and healthier than the general population, they are still susceptible to the SARS CoV-2 virus, and 10% may develop PCS. It is important to use a categorical organ-specific approach in diagnosis in order to determine a targeted approach to understanding pathogenesis and potential treatments. Fatigue and cardiopulmonary manifestations of PCS are major limiters to return to exercise. Exercise can be resumed after symptoms have subsided in a graduated process. More research is needed to develop an evidence-based model for return to sport in the setting of PCS.

Keywords: sports, rehabilitation, post-COVID syndrome, recovery, training

SARS-CoV-2 был идентифицирован в 2019 г. как респираторный коронавирус, вызывающий коронавирусную болезнь (COVID-19). COVID-19 стал глобальной пандемией, которая затронула спортсменов всех уровней [1–4]. У многих спортсменов, инфицированных COVID, заболевание протекает легко или бессимптомно, и большинство спортсменов могут вернуться в спорт через несколько недель. Тем не менее, от 10% до 15% людей, инфицированных COVID-19, имеют продолжительные симптомы заболевания, которые длятся от нескольких недель

до нескольких месяцев и влияют на их способность функционировать и тренироваться. Не так много известно о том, почему некоторые люди имеют затяжное течение заболевания, на сегодняшний день отсутствуют какие-либо методики для прогнозирования такого течения заболевания [5]. И даже при, казалось бы, выздоровлении у людей на протяжении еще длительного времени остаются симптомы COVID-19. Достаточно часто постковидный синдром встречается у спортсменов. Соответственно, болезнь затягивается на неопределенное время, что существенно замедляет возвращение к тренировкам и соревнованиям.

Цель исследования – проанализировать зарубежную литературу, посвященную диагностике, лечению, а также реабилитации постковидного синдрома у спортсменов, и разработать алгоритм ведения таких пациентов для практикующих врачей.

Постковидный синдром

Центры по контролю и профилактике заболеваний (ЦКЗ) используют термин «постострый COVID-19» или «постковидный синдром» (ПКС) для описания проблем со здоровьем, которые сохраняются более четырех недель после того, как человек был впервые инфицирован SARS-CoV-2 [6]. Другие описали его как «отсутствие выздоровления в течение нескольких недель или месяцев после начала симптомов, которые наводили на мысль о COVID-19, независимо от того, был ли проведен ПЦР-тест или нет [7]. A.V. Raveendran и соавт. предложили диагностический критерий, включающий положительный тест на SARS-CoV-2 (или положительную серологию), историю кластера симптомов COVID-19 и соответствующую продолжительность симптомов (> 4 недели) [8]. Какое бы определение ни использовалось, симптомы, которые задерживаются или длятся дольше четырех недель, согласуются с ПКС. Наиболее распространенным симптомом у людей, страдающих ПКС, является глубокая усталость, однако может наблюдаться и ряд других симптомов, включая соматические боли, чувство сдавления в груди, одышку, кашель, тахикардию, спутанность сознания и/или другие неврологические симптомы. Особенностью затяжных симптомов является их рецидивирующий характер [7].

Неясно, у каких именно пациентов будет развиваться ПКС, однако несколько исследований показали, что женщины более склонны к его развитию, чем мужчины [1, 4]. Пациенты с более чем пятью симптомами в острой фазе COVID-инфекции также более склонны к развитию ПКС [9]. Другие факторы риска развития ПКС включают возраст от 45 до 60 лет, нормальный индекс массы тела (ИМТ) и белую расу [1, 2]. Следует отметить, что 52% молодых людей в возрасте от 16 до 30 лет, у которых были легкие и умеренные симптомы COVID-19, лечившиеся дома, в конечном итоге имели ПКС [10].

Точный механизм развития ПКС неясен. Однако существует несколько теорий. Воспалительная и иммунологическая являются наиболее распространенными [11, 12]. Воспалительные или иммунные реакции могут возникать в различных органах, включая

мозг, легкие, сердце, эндотелий сосудов, мышцы, кишечник и нервную систему, что приводит к формированию характерных симптомов. Одним из предложенных механизмов ПКС у некоторых пациентов, возможно, является иммунологическая реактивация латентного вируса Эпштейна — Барр, проявления которого очень похожи на миалгический энцефаломиелит (синдром хронической усталости) [13].

Индивидуальный подход к спортсменам с ПКС

Первым шагом в подходе к спортсмену с возможным ПКС является получение подробного анамнеза и выполнение клинического обследования, ориентированного на сроки возникновения, продолжительность и тяжесть симптомов, а также степень функциональных ограничений. У пациентов с предположительными симптомами без установленного диагноза COVID-19 положительный тест на антитела может помочь подтвердить диагноз. Тем не менее уровни антител могут снижаться с течением времени, поэтому отрицательный тест на антитела определенно не исключает ПКС.

Несмотря на важность оценки влияния симптомов на всего пациента, диагностика пациента с ПКС в первую очередь определяется симптомами и конкретной системой органов (таблица). Симптомы ПКС можно разделить на различные категории для лучшей диагностики. Макровзгляд на категории — стойкая усталость, кардиореспираторная и нейропсихиатрическая [8]. Подкатегоризация по системам органов может еще больше помочь в процессе диагностики ПКС.

Что касается диагностики, большинство стандартных исследований у пациентов с ПКС, таких как рентгенограммы грудной клетки, спирометрия, эхокардиограмма и вегетативное рефлекторное тестирование, оказываются в пределах нормы или недиагностическими [14]. Однако использование более селективного и целенаправленного шаблона исследований может повысить диагностический результат. Предлагаемые лабораторные тесты включают полный общий и биохимический анализ крови: определение уровня ТТГ, D-димера, КФК (КФК-МВ), АЛТ, АСТ, ГГТ, ЩФ, сывороточного альбумина, 25(ОН)-витамина D, креатинкиназы, С-реактивного белка, мозгового натрийуретического пептида и ферритина. Также важен уровень артериального давления (среди 120 пациентов, перенесших COVID-19 в легкой или умеренной форме, у 55,6% мужчин через 3 месяца после болезни систолическое артериальное давление было значительно повышено) [15].

Целевой подход к диагностике и лечению ПКС

Реабилитация	Физическая: ЛФК, массаж, электросон	Медицинская: реабилитация в отделениях для пациентов с соматическими заболева- ниями	Медицинская: в отделениях медицинской реабилитации дневного стационара, амбулаторных отделениях медицинской реабилитации для пациентов с соматическими заболеваниями	Физическая: ЛФК, массаж, электросон
Лечение	Психологическое: когнитивно-поведенческая пси- хотерапия, контроль стресса. Физическое: дифференцирован- ные физические упражнения. Медикаментозное: селек- тивные ингибиторы обрат- ного захвата серотонина (ТС-антидепрессанты – флувок- самин), соблюдение режима пи-	Медикаментозное: тромбопрофилактика (низкомо- лекулярные гепарины)	Медикаментозное: бета-агонисты (беродуал), мо- медицинской инторинг сатурации кислорода ции дневного амбулаторных медицинской для пациентов скими заболев	Физическое: аэробные упражнения Медицинское: соблюдение гигиены питания и сна, добавки рыбьего жира
Диагностика	Лабораторная диагностика: определение уровня ТТГ в крови, ОАК, контроль уровня РО ₂ крови, определение уровня СРБ в венозной крови. Инструментальная диагностика: ЭКГ, эхокардиограмма, ренггенография органов грудной клетки	Лабораторная диагностика: определение уровня СРБ в венозной крови. Инструментальная диагностика: рентгенография органов грудной клетки, ЭКІ, эхокардиография, МРГ сердца	лневмонит, Лабораторная диагностика: определение уровня D-димера и СРБ в венозной крови. Инструментальная диагностика: рентгенография органов грудной клетки, КТ грудной клетки, КТ легочной ангиограммы	Лабораторная диагностика: люмбальная пункция. Инструментальная диагностика: МРТ или КТ головного мозга, ЭЭГ, нейропсихологическое тестирование
Возможные причины	Анемия, гипотиреоз, по- ствирусные эффекты, относительная гипоксия, поствирусная кардиоми- опатия, воспалительный синдром	Миокардит, кардиомио- патия, перикардит, эндо- кардит	Пневмония, легочная эмб	Энцефалит, ишемиче- ский инсульт, судороги, нейропатия черепных нервов
Симптомы	Глубокая усталость	Боль в груди, сердцебиение, одышка при нагрузке	Кашель, одышка, боль в груди	Головная боль, головокружение, спутанность сознания
Категория	Общее состояние	Сердечно- сосудистая система	Дыхательная система	Неврологи- ческие про- явления

Категория	Симптомы	Возможные причины	Диагностика	Лечение	Реабилитация
Психиче- ские проявления	Плохое настроение, безнадежность, беспокойство, бессонница	Депрессия, тревога, посттравматическая ре- акция на стресс	тревога, Диагностика методом опроса: кая ре- оценка шкал РНQ9, GAD7	Психологическое: Когнитивно-поведенческая пси- хотерапия. Медикаментозное: еелективные ингибиторы обрат- ного захвата серотонина – флу- воксамин, мелатонин (при бес- дневного стационара Психологическая: консуль- тации с психотера- неврологами и психотера- медицинская: в отделениях дневного стационара	Психологическая: консультации со специалистами – неврологами и психотерапевтами. Медицинская: в отделениях медицинской реабилитации дневного стационара
Желудочно- кишечный тракт	Желудочно- кишечный диарея, запор, тракт рвота	Лекарственная ятрогения на фоне терапии СО- VID-19	Лекарственная ятроге- Лабораторная диагностика: ОАК, Медикаментозное: ния на фоне терапии СО- исследование стула. VID-19 Pентгенография брюшной поло- сти	Медицинская ондансетрон, лоперамид, перо- иедицинской ральная гидратация амбулаторных медицинской медицинской медицинской для пациентс скими заболе:	Медицинская: в отделениях медицинской реабилита- ции дневного стационара, амбулаторных отделениях медицинской реабилитации для пациентов с соматиче- скими заболеваниями
Опорно- двигательный слабость, аппарат артралгия	Миалгии, слабость, артралгия	Миопатия, электролит- Лаборат ный дисбаланс, воспали- БХ, СРБ тельная артралгия, дли- тельное бездействие	Миопатия, электролит- Лабораторная диагностика: КФК, Медикаментозное лечение: ный дисбаланс, воспали- БХ, СРБ гельная артралгия, дли- гельное бездействие	Медикаментозное лечение: НПВС, стероидная терапия	Физическая: выполнение физической нагрузки с по- степенным увеличением величины нагрузки.

Примечание. ТТГ – тиреотропный гормон; ОАК – общий анализ крови; рО, – парциальное давление кислорода в крови; ЭКГ – электрокардиография; СРБ – уровень С-реактивного белка в крови; МРТ – магнитно-резонансная томография; КТ – компьютерная томография; ЭЭГ – электроэнцефалография; РНQ9 – шкала оценки здоровья пациента для диагностики наличия и тяжести депрессии; GAD7 – опросник генерализованного тревожного расстройства; КФК – уровень креатинфосфокиназы крови; БХ – биохимический анализ крови; ЛФК – лечебная физическая культура.

Эти показатели позволяют оценить потенциальные причины усталости, одышки или других заболеваний, таких как анемия, миокардит, миозит или дефицит железа. Дополнительные стандартные исследования могут включать пульсоксиметрию с измерением ${\rm SpO}_2$ для выявления дыхательной недостаточности и оценки выраженности гипоксемии, оценку шкал депрессии и эмоционального состояния, рентгенограмму грудной клетки и электрокардиограмму для оценки сердечной или легочной патологии [16].

Реабилитация спортсменов с ПКС

Усталость, наблюдаемая у пациентов с ПКС, похожа на синдром хронической усталости, наблюдаемый при SARS, MERS и внебольничной пневмонии. Были споры об использовании дифференцированных упражнений при хронической усталости, а именно низкоинтенсивных аэробных физических упражнений, которые включают упражнения лежа, сидя или в воде, а также ходьбу и прогулки на велосипеде. Исходя из возможных рисков, эти упражнения у пациентов следует вводить постепенно, пока человек может их выполнять, не вызывая постнагрузочного недомогания, и прекращать в случае возникновения лихорадки, одышки или мышечных болей [7]. Кроме того, у некоторых спортсменов развивается постнагрузочное недомогание, подобное тому, что наблюдается при синдроме хронической усталости или фибромиалгии, оно может иметь довольно тяжелое течение. Это особенно важно, поскольку внимание уделяется спортсменам, возвращающимся к конкретным видам спорта. Когнитивно-поведенческая терапия (КПТ) может играть определенную роль в лечении усталости на фоне ПКС. КПТ оказывает положительное влияние на уровень усталости, работоспособность, социальную адаптацию, депрессию, беспокойство и постнагрузочное недомогание [17]. Хотя не существует конкретных фармакологических методов лечения, специально предназначенных для терапии усталости на фоне ПКС, сосредоточение внимания на симптоматическом лечении общих симптомов (физическая боль, периодические головные боли, недомогание, когнитивные нарушения, плохой сон, рецидивирующая боль в горле и лимфаденопатия) может быть эффективным [18]. Лекарства для лечения вышеупомянутых симптомов включают селективные ингибиторы обратного захвата серотонина (СИОЗС), ингибиторы обратного захвата серотонина и норадреналина (ИОЗСН), а также мелатонин.

Кроме того, следует уделять большое внимание питанию, гигиене сна и контролю над стрессом. Спортсмены с нарушением сна и питания находятся в стрессовом состоянии, которое может ухудшить симптомы и замедлять выздоровление.

Основные *сердечно-легочные симпто-мы*, наблюдаемые при COVID-19 и при ПКС, включают кашель, боль в грудной клетке и одышку при физической нагрузке.

Боль в грудной клетке должна диагностироваться с помощью сбора анамнеза, оценки факторов риска и физикального обследования. Миокардит, перикардит, инфаркт миокарда, дисритмии и легочная эмболия могут проявляться у молодых здоровых пациентов через несколько недель после перенесенной коронавирусной инфекции. Поэтому на них необходимо обращать особое внимание при проведении диагностического поиска. Дальнейшее исследование может включать эхокардиограмму, МРТ сердца и КТ грудной клетки для исключения кардиомиопатии, миокардита, а также другой сердечной или легочной патологии. Пациенты с миокардитом или перикардитом должны ограничить активные физические упражнения в течение трех месяцев, в то время как спортсменам придется подождать от трех до шести месяцев под наблюдением специалиста, прежде чем вернуться к полноценной спортивной деятельности. Неизвестно, как долго у пациентов сохраняется гиперкоагуляция после перенесенного COVID-19, пациентам с высоким риском должна проводиться продленная тромбопрофилактика [7].

Легочные симптомы. Кашель и одышка, наблюдаемые при ПКС, могут быть скорректированы с помощью дыхательных упражнений, направленных на нормализацию дыхания и повышение эффективности дыхательных мышц, а также с помощью лекарств, когда это необходимо, таких как ингибиторы протонной помпы для устранения симптомов рефлюкса и бета-агонисты короткого действия для лечения хрипов или постоянного кашля. Легочная реабилитация предлагается тем пациентам, кто имел значительные респираторные расстройства и нуждался в оксигенотерапии [7]. Задачей легочной реабилитации у людей, перенесших COVID-19, является снижение и устранение симптомов одышки, снятие тревоги, уменьшение осложнений, улучшение адаптационных возможностей к физическим нагрузкам, сохранение функции и улучшение качества жизни. Главным компонентом легочной реабилитации являются физические упражнения. К ним относится комплекс мероприятий, включающий: маневры форсированного выдоха (кашель), для продвижения секреции; выдувание воздуха через сжатые губы; внешняя вибрация; языкоглоточное дыхание; диафрагмальное дыхание, а также позы для улучшения мукоцилиарного клиренса [19].

Одышка: следует оценить одышки. Легкая одышка диагностируется при частоте дыхания < 24, сатурации > 95 % и отсутствии потребности в оксигенотерапии. Умеренная одышка при частоте дыхания > 24, сатурации от 92% до 95%, с потребностью в оксигенотерапии или без нее. Тяжелая одышка проявляется неспособностью поддерживать сатурацию > 92%. Легкая одышка не требует специфической терапии и можно ограничиться динамическим наблюдением в течение 48 ч. При умеренной одышке необходимо провести оценку общего анализа крови, натрийуретического пептида В, рентгенограммы грудной клетки, а также электрокардиограммы. При наличии у пациента тяжелой одышки необходимо прибегать к экстренной госпитализации [7]. Важно отметить, что одышка после COVID-19 может сохраняться в течение некоторого времени, поэтому разумно отложить лечение одышки в тех случаях, если она не длится более трех месяцев или не имеет прогрессирующий характер [20].

Нейропсихические расстройства. Неспецифические неврологические симптомы, включая головную боль, головокружение и когнитивные нарушения, следует устранять с помощью поддерживающей терапии, которая включает мероприятия по улучшению вентиляции легких, газообмена, дренажной функции бронхов, улучшению крово- и лимфообращения, повышению общей выносливости пациентов, коррекции мышечной слабости, преодолению стресса, беспокойства, депрессии, нормализацию сна. При выраженных нарушениях применяются также когнитивные тренинги [21]. Вышеуказанные мероприятия необходимо сочетать с постоянным динамическим мониторингом симптоматики. Более редкие, но серьезные осложнения ПКС включают инсульт, судороги, энцефалит и нейропатии черепных нервов. Такие пациенты должны быть направлены к неврологу, с последующим проведением нейровизуализации (КТ или МРТ), при этом имеет смысл опираться на данные и опыт, полученные ранее по эпидемиям SARS-CoV и MERS-CoV. Для диагностики большего количества когнитивных расстройств может потребоваться дальнейшее нейропсихологическое тестирование [7].

Психическое здоровье. У 20–50% пациентов могут развиться симптомы депрессии, тревоги и бессонницы после перенесенного COVID-19 [22]. Таким пациентам рекомендуются психологическая поддержка, когнитивные тренинги, проведение психотерапии или КПТ [7]. Лекарства, которые необходимо применять у пациентов с постоянными расстройствами психического здоровья после COVID-19, включают селективные ингибиторы обратного захвата серотонина (для лечения тревоги и депрессии), а также снотворные средства, такие как мелатонин, в случае наличия бессонницы.

От 30% до 40% вакцинированных спортсменов имели более быстрый регресс симптомов ПКС. Хотя механизм такого действия неясен, считается, что вакцина помогает организму бороться с персистирующими вирусными частицами, тем самым предотвращая аутоиммунные процессы [23].

Возвращение в спорт. Рекомендации по возвращению к занятиям спортом при ПКС были опубликованы и приняты многими различными спортивными организациями [7, 24, 25]. Были предложены рекомендации по возвращению к спорту, которые учитывают риски передачи инфекции, потенциал для ухудшения симптомов и возможный миокардит, ассоциированный с COVID-19 [26-29]. На протяжении всей пандемии люди возвращались к физическим упражнениям после выздоровления от COVID-19, и постепенное возвращение к спорту происходило у спортсменов различного уровня [30, 31]. Большинство рекомендаций по возвращению в спорт основаны на экспертном мнении, разработаны для командных видов спорта и ориентированы на детей, учащихся средней школы, студентов, а также на профессиональных спортсменов.

Консенсус Stanford Hall по реабилитации пациентов может послужить хорошей моделью для возвращения к спорту на фоне ПКС [20]. Спортсменам, у которых наблюдалась сердечно-легочная симптоматика, а также непереносимость упражнений при возвращении к тренировкам, потребуется кардиологическое обследование (электрокардиограмма, тропонин, эхокардиограмма) перед возобновлением упражнений. Рекомендуется ограничить активность до 60% от максимальной частоты сердечных сокращений в течение двух-трех недель после исчезновения симптомов. После завершения 2-3-недельного субмаксимального аэробного периода можно начинать постепенное возвращение к привычной активности [32].

Заключение

Несмотря на положительное воздействие физических упражнений на здоровье, новая коронавирусная инфекция у 10% спортсменов осложняется ПКС с вариативным течением. В связи с этим приоритетным направлением является разработка единого алгоритма по диагностике и реабилитации спортсменов на фоне данной патологии. В ряде исследований у большой когорты пациентов выявлено отсутствие диагностической значимости большинства стандартных исследований, в связи с чем необходимым является внедрение специфических лабораторных тестов, позволяющих дифференцировать потенциальные симптомы ПКС от иной патологии. Основу алгоритмического подхода составляют симптомокомплексы, описанные A.V. Raveendran и соавт.: стойкая усталость, кардиореспираторный, нейропсихиатрический, гастроинтестинальный и др. (таблица), позволяющие проводить специфические реабилитационные мероприятия, наиболее эффективные в случае конкретной формы нозологии [8]. Критерием, позволяющим возобновить физические упражнения, является регрессия имеющихся симптомов, при этом нагрузке должна предшествовать функциональная оценка поражённой системы органов. Разработанный на основе зарубежных данных алгоритм по диагностике и реабилитации спортсменов с ПКС представляет интерес для врача спортивного профиля как метод разработки системы мультидисциплинарной медицинской реабилитации при патологии.

Список литературы

- 1. Vanichkachorn G., Newcomb R., Cowl CT., Murad M.H., Breeher L., Miller S., Trenary M., Neveau D., Higgins S. Post-COVID-19 Syndrome (Long Haul Syndrome): Description of a Multidisciplinary Clinic at Mayo Clinic and Characteristics of the Initial Patient Cohort. Mayo Clinic Proceedings. 2021. Vol. 96. No 7. P. 1782–1791.
- 2. Huang C., Huang L., Wang Y., Li X., Ren L., Gu X., Kang L., Guo L., Liu M., Zhou X., Luo J., Huang Z., Tu S., Zhao Y., Chen L., Xu D., Li Y., Li C., Peng L., Li Y., Xie W., Cui D., Shang L., Fan G., Xu J., Wang G., Wang Y., Zhong J., Wang C., Wang J., Zhang D., Cao B. 6-month consequences of COVID-19 in patients discharged from hospital: a cohort study. Lancet. 2021. Vol. 397. No. 10270. P. 220–232.
- 3. Greenhalgh T., Knight M., A'Court C., Buxton M., Husain L. Management of post-acute covid-19 in primary care. BMJ. 2020. Vol. 370. P. 3026.
- 4. Huang Y., Pinto M.D., Borelli J.L., Mehrabadi M.A., Abrihim H., Dutt N., Lambert N., Nurmi E.L., Chakraborty R., Rahmani A.M., Downs C.A. COVID symptoms, symptom clusters, and predictors for becoming a long-hauler: looking for clarity in the haze of the pandemic. MedRxiv. 2021.
- 5. Thompson E.J., Williams D.M., Walker A.J., Mitchell R.E., Niedzwiedz C.L., Yang T.C., Huggins C., Kwong A.S., Silverwood R., Di Gessa G., Bowyer R.C. Risk factors for long COVID: analyses of 10 longitudinal studies and electronic health records in the UK. MedRxiv. 2021.

- 6. CDC Web site [Internet]. Washington, D.C.: The Long Haul: Forging a Path through the Lingering Effects of COVID. (cited 2022 April 29). URL: https://www.cdc.gov/washington/testimony/2021/t20210428.htm (date of access: 22.08.2022).
- 7. Nabavi N. Long covid: How to define it and how to manage it. BMJ. 2020. Vol. 370. P. 3489.
- 8. Raveendran A.V., Jayadevan R., Sashidharan S. Long COVID: an overview. Diabetes Metab Syndr. 2021. Vol. 15. P. 869–875.
- 9. Sudre C., Murray B., Varsavsky T., Graham M., Penfold R., Bowyer R., Pujol J.C., Klaser K., Antonelli M., Canas L., Molteni E. Attributes and predictors of Long-COVID: analysis of COVID cases and their symptoms collected by the Covid Symptoms Study App. MedRxiv. Vol. 27. No. 6. P. 1116.
- 10. Blomberg B., Mohn K.G., Brokstad K.A., Zhou F., Linchausen D.W., Hansen B.A., Lartey S., Onyango T.B., Kuwelker K., Sævik M., Bartsch H., Tøndel C., Kittang B.R. Bergen COVID-19 Research Group, Cox R.J., Langeland N. Long COVID in a prospective cohort of home-isolated patients. Nat Med. 2021. Vol. 27. No. 9. P. 1607–1613.
- 11. Colafrancesco S., Alessandri C., Conti F., Priori R. COVID-19 gone bad: A new character in the spectrum of the hyperferritinemic syndrome? Autoimmun Rev. 2020. Vol. 19. No. 7. P. 102573.
- 12. Tay M.Z., Poh C.M., Rénia L., MacAry P.A., Ng L.F.P. The trinity of COVID-19: immunity, inflammation and intervention. Nat Rev Immunol. 2020. Vol. 20. No. 6. P. 363–374.
- 13. Rubin R. As their numbers grow, COVID-19 "long haulers" stump experts. JAMA. 2020. Vol. 324. P. 1381–1383.
- 14. DiFiori J.P., Green G., Meeuwisse W., Putukian M., Solomon G.S., Sills A. Return to sport for North American professional sport leagues in the context of COVID-19. Br J Sports Med. 2021. Vol. 55. No. 8. P. 417–421.
- 15. Gameil M.A., Marzouk R.E., Elsebaie A.H., Rozaik S.E. Long-term clinical and biochemical residue after CO-VID-19 recovery. Egypt Liver J. 2021. № 11 (1). P. 74. DOI: 10.1186/s43066-021-00144-1.
- 16. Grazioli R., Loturco I., Baroni B.M., Oliveira G.S., Saciura V., Vanoni E., Dias R., Veeck F., Pinto R.S., Cadore E.L. Coronavirus Disease-19 Quarantine Is More Detrimental Than Traditional Off-Season on Physical Conditioning of Professional Soccer Players. J Strength Cond Res. 2020. Vol. 34. No. 12. P. 3316–3320.
- 17. Yancey J.R., Thomas S.M. Chronic fatigue syndrome: diagnosis and treatment. Am. Fam. Physician. 2012. Vol. 86. P. 741–746.
- 18. Gaber T. Assessment and management of post COVID fatigue. Prog Neurol Psychiatry. 2021. Vol. 25. P. 36–39.
- 19. Wang Tina J., M.D. Chau, Brian M.D., Lui Mickey D.O., Lam Giang-Tuyet M.D., Lin Nancy M.D., Humbert Sarah M.D. Physical Medicine and Rehabilitation and Pulmonary Rehabilitation for COVID-19. American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation: September 2020. Vol. 99. Issue 9. P. 769–774. DOI: 10.1097/PHM.0000000000001505.
- 20. Barker-Davies R.M., O'Sullivan O., Senaratne K.P.P., Baker P., Cranley M., Dharm-Datta S., Ellis H., Goodall D., Gough M., Lewis S., Norman J., Papadopoulou T., Roscoe D., Sherwood D., Turner P., Walker T., Mistlin A., Phillip R., Nicol A.M., Bennett A.N., Bahadur S. The Stanford Hall consensus statement for post-COVID-19 rehabilitation. Br J Sports Med. 2020. Vol. 54. No. 16. P. 949–959.
- 21. Иванова Г.Е., Баландина И.Н., Бахтина И.С., Белкин А.А., Беляев А.Ф., Бодрова Р.А., Буйлова Т.В., Гречко А.В., Дидур М.Д., Калинина С.А., Кирьянова В.В., Лайшева О.А., Мальцева М.Н., Мельникова Е.В., Мишина И.Е., Петрова М.В., Пряников И.В., Постникова Л.Б., Суворов А.Ю., Соловьёва Л.Н., Цыкунов М.Б., Шмонин А.А. Медицинская реабилитация при новой коронавирусной инфекции (Covid-19)* // Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация. 2020. № 2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/meditsinskaya-reabilitatsiya-pri-novoy-koronavirus-noy-infektsii-covid-19 (дата обращения: 22.08.2022).

- 22. Mazza M.G., De Lorenzo R., Conte C., Poletti S., Vai B., Bollettini I., Melloni E.M.T., Furlan R., Ciceri F., Rovere-Querini P. COVID-19 BioB Outpatient Clinic Study group, Benedetti F. Anxiety and depression in COVID-19 survivors: Role of inflammatory and clinical predictors. Brain Behav Immun. 2020. Vol. 89. P. 594–600.
- 23. Arnold D.T., Milne A., Samms E., Stadon L., Maskell N.A., Hamilton F.W. Are vaccines safe in patients with Long COVID? A prospective observational study. Medrxiv. Vol. 11. No. 3. P 253
- 24. Rabascall C.X., Lou B.X., Navetta-Modrov B., Hahn S.S. Effective use of monoclonal antibodies for treatment of persistent COVID-19 infection in a patient on rituximab. BMJ Case Rep. 2021. Vol. 14. No. 8. P. 243.
- 25. Drezner J.A., Heinz W.M., Asif I.M., Batten C.G., Fields K.B., Raukar N.P., Valentine V.D., Walter K.D. Cardiopulmonary Considerations for High School Student-Athletes During the COVID-19 Pandemic: NFHS-AMSSM Guidance Statement. Sports Health. 2020. Vol. 12. No. 5. P 459–461
- 26. Wilson M.G., Hull J.H., Rogers J., Pollock N., Dodd M., Haines J., Harris S., Loosemore M., Malhotra A., Pieles G., Shah A., Taylor L., Vyas A., Haddad F.S., Sharma S. Cardiorespiratory considerations for return-to-play in elite athletes after COVID-19 infection: a practical guide for sport and exercise medicine physicians. Br J Sports Med. 2020. Vol. 54. No. 19. P. 1157–1161.
- 27. Kim J.H., Levine B.D., Phelan D., Emery M.S., Martinez M.W., Chung E.H., Thompson P.D., Baggish A.L.

- Coronavirus Disease 2019 and the Athletic Heart: Emerging Perspectives on Pathology, Risks, and Return to Play. JAMA Cardiol. 2021. Vol. 6. No. 2. P. 219–227.
- 28. Gervasi S.F., Pengue L., Damato L., Monti R., Pradella S., Pirronti T., Bartoloni A., Epifani F., Saggese A., Cuccaro F., Bianco M., Zeppilli P., Palmieri V. Is extensive cardiopulmonary screening useful in athletes with previous asymptomatic or mild SARS-CoV-2 infection? Br J Sports Med. 2021. Vol. 55. No. 1. P. 54–61.
- 29. Milovancev A., Avakumovic J., Lakicevic N., Stajer V., Korovljev D., Todorovic N., Bianco A., Maksimovic N., Ostojic S., Drid P. Cardiorespiratory Fitness in Volleyball Athletes Following a COVID-19 Infection: A Cross-Sectional Study. Int J Environ Res Public Health. 2021. Vol. 18. No. 8. P 4059
- 30. Pedersen L., Lindberg J., Lind RR., Rasmusen H. Reopening elite sport during the COVID-19 pandemic: Experiences from a controlled return to elite football in Denmark. Scand J Med Sci Sports. 2021. Vol. 31. No. 4. P. 936–939.
- 31. Puntmann V.O., Carerj M.L., Wieters I., Fahim M., Arendt C., Hoffmann J., Shchendrygina A., Escher F., Vasa-Nicotera M., Zeiher A.M., Vehreschild M., Nagel E. Outcomes of Cardiovascular Magnetic Resonance Imaging in Patients Recently Recovered From Coronavirus Disease 2019 (COVID-19). JAMA Cardiol. 2020. Vol. 5. No. 11. P. 1265–1273.
- 32. Elliott N., Martin R., Heron N., Elliott J., Grimstead D., Biswas A. Infographic. Graduated return to play guidance following COVID-19 infection. Br J Sports Med. 2020. Vol. 54. No. 19, P. 1174–1175.

СТАТЬИ

УДК 678

ПОЛИМЕРНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Акимова А.С., Филиппова Л.С.

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, e-mail: fil.gasdertyu5@gmail.com

В работе представлены результаты получения полимерного композиционного материала теплоизоляционного назначения на основе тетраэтоксисилана, частично гидролизованного в среде водного раствора этилового спирта в присутствии азотной кислоты в качестве кислотного катализатора. Наполнение полимерного связующего проводилось полыми алюмосиликатными микросферами и белым электрокорундом. По результатам исследований выявлено влияние количества компонентов полимерной композиции на свойства получаемого материала и интервалы введения компонентов, позволяющие получить высокие показатели основных эксплуатационных свойств: теплопроводности, кажущейся плотности, прочности на сжатие до и после выдержки при 700 °С в воздушной атмосфере. Проведено сравнение полученного материала с известным и сходным с ним по составу и назначению. По результатам сравнения полученный материал незначительно уступает известному по теплоизоляционным показателям, но превосходит по прочности и теплостойкости. Полученный материал может применяться для технической теплоизоляции поверхностей, температура которых при эксплуатации нагревается до 700 °С. В качестве областей применения можно рекомендовать теплоизоляцию оборудования и сооружений в теплоэнергетике и на производственных предприятиях различных отраслей промышленности, тепловую защиту конструктивных элементов летательных аппаратов от воздействия газодинамического и теплового потоков.

Ключевые слова: теплоизоляционный пеноматериал, частично гидролизованный тетраэтоксисилан, полые алюмосиликатные микросферы, электрокорунд, теплостойкость

POLYMER COMPOSITE MATERIAL FOR THERMAL INSULATION AT ELEVATED TEMPERATURES

Akimova A.S., Filippova L.S.

Vladimir State University named after Alexander Grigorevich and Nikolay Grigorevich Stoletovs, Vladimir, e-mail: fil.gasdertyu5@gmail.com

The paper presents the results of obtaining a polymer composite material for thermal insulation purposes based on tetraethoxysilane partially hydrolyzed in an aqueous solution of ethyl alcohol in the presence of nitric acid as an acid catalyst. The filling of the polymer binder was carried out with hollow aluminosilicate microspheres and a white electrocorundum. According to the results of the research, the influence of the number of components of the polymer composition on the properties of the resulting material and the intervals of introduction of the components, allowing to obtain high indicators of the main operational properties: thermal conductivity, apparent density, compressive strength before and after exposure at 700 °C in an air atmosphere, was revealed. The comparison of the obtained material with the known and similar to it in composition and purpose is carried out. According to the results of the comparison, the obtained material is slightly inferior to the known one in terms of thermal insulation indicators, but superior in strength and heat resistance. The resulting material can be used to be used for technical thermal insulation of surfaces whose temperature heats up to 700 °C during operation. As areas of application, it is possible to recommend thermal insulation of equipment and structures in the heat power industry and at manufacturing enterprises of various industries, thermal protection of structural elements of aircraft from the effects of gas-dynamic and heat flows.

Keywords: thermal insulation foam, partially hydrolyzed tetraethoxysilane, hollow aluminosilicate microspheres, electrocorundum, heat resistance

К теплоизоляционным относятся материалы, которые характеризуются низким коэффициентом теплопроводности и предназначены для снижения теплообмена между теплоизолируемым объемом и окружающей средой. Различают два основных вида теплоизоляции: строительную, которая сохраняет комфортный температурный режим внутри помещения вне зависимости от времени года и погодных условий, и техническую, которая обеспечивает заданный технологическим режимом температурный режим внутри оборудования или внутри инженерных коммуникаций, таких как водо-

проводы, газопроводы, нефтепроводы и т.д. В условиях роста цен на тепловые и энергетические ресурсы и тенденции по развитию энерго- и ресурсосберегающих технологий производство и применение теплоизоляционных и энергоэффективных материалов становится всё более актуальным и востребованным [1–3].

При этом чем больше разница температур между теплоизолируемым объемом и окружающей средой, тем более жесткие требования предъявляются к качеству теплоизоляционных материалов и тем большая экономия тепла и электроэнергии достига-

ется при правильной и эффективной теплоизоляции. В то же время надо учитывать и другие факторы, оказывающие влияние на теплоизоляционные материалы в процессе эксплуатации: наличие агрессивных сред и негативных факторов окружающей среды, влажность, вероятность и величина температурных колебаний в окружающей среде, возможность механических, электрических и других воздействий. Совокупность этих факторов создает перечень требований, предъявляемых к теплоизоляционному материалу для конкретных задач при эксплуатации в определенных условиях, и является основой для принятия решения о выборе материала для теплоизоляции.

Наиболее распространенной и разнообразной группой теплоизоляционных материалов являются полимерные пеноматериалы, называемые также газонаполненными пластмассами [4-6], и полимерные композиционные материалы, наполненные материалами с низким коэффициентом теплопроводности: древесные и травянистые отходы, микропористые минералы (перлит, вермикулит и др.), золошлаковые отходы и т.д. [7-9]. Отдельной разновидностью полимерной теплоизоляции являются сферопластики, в которых связующими в большинстве случаев являются термореактивные полимеры, а в качестве отдельных или основных наполнителей применяют полые микросферы из различных материалов, которые позволяют уменьшить плотность и теплопроводность материала и получаемых из него изделий. Основными преимуществами сферопластиков перед большинством теплоизоляционных материалов являются высокие прочностные характеристики и низкое водопоглощение. В то же время, как и для большинства материалов на полимерной основе [10, 11], для них характерны водостойкость, химическая стойкость, легкость, диэлектрические характеристики и стойкость к большинству факторов окружающей среды [4,12].

Однако, как и большинство материалов на полимерной основе, сферопластики теряют свои свойства при повышении температуры из-за низкой термостойкости и термодеструкции полимерных связующих и микросфер на полимерной основе. Это ограничивает сферу их применения, особенно в качестве технической теплоизоляции. В связи с этим повышение температур эксплуатации сферопластиков является актуальной задачей. В настоящее время такая задача наиболее часто решается за счет применения термостойких полимерных связующих, например кремнийорганиче-

ских соединений, и использования наполнителей, способных выдерживать высокие температуры, например применения микросфер на силикатной основе и дополнительного введения волокон на основе тугоплавких минералов [13, 14].

Цель данной работы заключалась в получении высокотемпературного полимерного композиционного материала, наполненного полыми микросферами, для технической теплоизоляции в условиях продолжительного температурного воздействия до 700 °C.

Материалы и методы исследования

Полимерным связующим для получения композиционного материала являлся тетраэтоксисилан, частично гидролизованный в среде водного раствора этилового спирта в присутствии азотной кислоты в качестве кислотного катализатора. Данное соединение относится к группе кремнийорганических связующих и представляет собой эфир ортокремниевой кислоты и этилового спирта общей химической формулы $(C_2H_5O)_4Si$.

Наполнение полимерного связующего проводили при помощи полых алюмосили-катных микросфер, полученных в результате флотации из золошлаковых отходов теплоэлектростанций. Используемые в данной работе микросферы имели следующий состав (в мас. %): 55,8 SiO₂, 35,5 Al₂O₃, 1,79 Fe₂O₃, 1,19 CaO, 1,5 Na₂O+K₂O, 1,17 TiO₂, 0,55 другие компоненты. Среди свойств данных микросфер можно отметить инертность, механическую прочность 18–27 МПа и сохранение свойств до температуры 1300 °C.

Дополнительным наполнителем для получаемого материала являлся белый электрокорунд марки 25A по ГОСТ 28818-90 с содержанием алюминия не менее 99,5 мас. %. Содержание примесей в электрокорунде данной марки ограничено следующими значениями (в мас. %, не более): 0,03 Fe₂O₃, 0,1 SiO₃, 0,2 Na₂O.

Для получения образцов изучаемого материала к полимерному связующему в соответствии с исследуемыми рецептурами полимерных композиций последовательно при перемешивании добавляли электрокорунд и полые алюмосиликатные микросферы. Компоненты перемешивали при температуре 20–25 °C в течение 30 мин, а затем полученную смесь заливали в формы и нагревали со скоростью 100 °С/ч до 1000 °С.

У полученных образцов по ГОСТ 23630-79 определяли теплопроводность через тепловое сопротивление при монотонном режиме нагрева до 250 °C при помощи прибора ИТ-λ-400, по ГОСТ 409-2017 определяли кажущуюся плотность через отношение

массы образца к его объему и по ГОСТ 4651-2014 определяли прочность на сжатие в условиях приложения нагрузки вдоль главной оси образцов с постоянной скоростью до разрушения. Испытания по прочности на сжатие дополнительно проводили у образцов, которые в течение 10 ч выдерживались при 700 °С в воздушной атмосфере.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате предварительного этапа исследований в данной работе проводились эксперименты по получению образцов при разном количестве полимерного связующего с последующей визуальной оценкой. В ходе исследований было установлено, что из композиций, содержащих меньше 4 мас. % полимерного связующего, затруднительно получить композицию с хорошими реологическими показателями, а при использовании гидролизованного тетраэтоксисилана в количестве от 4 до 14 мас. % у образцов после термической обработки наблюдаются деформации, связанные с недостатком связующего. В то же время использование связующего в количестве свыше 76 мас. % приводит к появлению у образцов деформаций, связанных с низкой термостойкостью композиции.

Количество микросфер было ограничено 13–66 мас. %, так как при меньшем их количестве эффект от их введения незначителен, а при большем количестве наблюдается излишнее падение прочности материала. Добавка менее 3 мас. % электрокорунда также практически не дает эффекта, при более 42 мас. % электрокорунда наблюдается существенное повышение теплопроводности, что является ограничением для теплоизоляционного материала.

В связи с полученными результатами было принято решение провести определение свойств у образцов, полученных с использованием составов полимерных композиций, представленных в табл. 1.

Результаты определения теплопроводности и прочности на сжатие образцов представлены в табл. 2.

Как следует из данных таблицы, образцы полученного материала характеризуются средними для сферопластиков теплоизоляционными показателями, высокой прочностью и хорошей термостойкостью, которая проявляется в сохранении прочности после длительного воздействия повышенной до 700 °C температуры.

 Таблица 1

 Исследуемые составы полимерных композиций

No	Содержание компонента, мас. %						
состава	Тетраэтоксисилан	Полые алюмосиликатные микросферы	Электрокорунд белый				
1	14,0	66,0	20,0				
2	30,0	40,0	30,0				
3	45,0	13,0	42,0				
4	60,0	16,0	24,0				
5	76,0	21,0	3,0				

 Таблица 2

 Свойства образцов получаемого композиционного материала

№ состава	Кажущаяся плотность, кг/м ³	Теплопроводность при 250 °C, Вт/м·°С	Прочность на сжатие, МПа	Прочность на сжатие после 10 ч при 700 °C на воздухе, МПа
1	305	0,20	6,4	6,0
2	314	0,23	6,9	6,6
3	372	0,26	9,3	9,1
4	359	0,24	9,7	8,7
5	322	0,19	10,5	8,7

 Таблица 3

 Технические показатели известного и разработанного теплоизоляционного материалов

Показатель	Известный материал	Разработанный материал
Теплопроводность при 250 °C, Вт/ м·°С	0,11-0,25	0,19–0,26
Кажущаяся плотность, кг/м ³	290–346	305–359
Предел прочности при сжатии, МПа	5,4–7,2	6,4–10,5
Предел прочности при сжатии после 10 ч при 700 °C на воздухе, МПа	4,7–6,8	6,0–9,1

Хорошая термостойкость данного материала связана с высокими показателями тепло- и термостойкости компонентов полимерной композиции. Частично гидролизованный тетраэтоксисилан относится к кремнийорганическим соединениям, относящимся к теплостойким соединениям. Частичный гидролиз данного соединения, который сопровождается процессами поликонденсации с образованием связей ≡Si-O-Si≡ [15], приводит к повышению показателей адгезии к стеклу, атмосферои теплостойкости. Основным веществом электрокорунда является оксид алюминия Al₂O₃, который является термостойким и тугоплавким. Кроме того, данная добавка выполняет роль термостойкой армирующей добавки, способствуя сохранению прочности при повышении температуры. Материал алюмосиликатных микросфер также является термостойким. Таким образом, каждый из компонентов способствует повышению стойкости материала к воздействию температур, а его низкая теплопроводность за счет наличия микросфер также препятствует распространению теплового потока и повышает теплостойкость в направлении от источника теплоты.

При этом следует учитывать, что более термостойким компонентом является электрокорунд, поэтому образцы, в составе которых его больше, отличаются более высокой теплостойкостью и лучше сохраняют свою прочность после воздействия повышенной температуры. Образцы по составам с высоким содержанием микросфер отличаются чуть меньшей теплостойкостью, но при этом их теплоизоляционные свойства выше, что связано с высокой теплопроводностью электрокорунда и низкой теплопроводностью алюмосиликатных микросфер. Образцы по составам с высоким содержанием полимерного связующего отличаются более высокой начальной прочностью, но у них выше теплопроводность при низком содержании микросфер и ниже теплостойкость при низком содержании электрокорунда.

В то же время повышение количества микросфер снижает кажущуюся плотность материала, а повышение количества электрокорунда увеличивает данное свойство, что связано с высокой плотностью электрокорунда.

Для дополнительной оценки свойств полученного материала было проведено его сравнение с известным материалом для термостойкой технической теплоизоляции [14] на основе 20–70 мас. % раствора поликарбосилана в ксилоле, 15–65 мас. % полых алюмосиликатных микросфер и 10–45 мас. % кварцевых волокон (табл. 3).

Как видно из данных таблицы, разработанный материал несколько уступает известному по теплоизоляционным характеристикам, сравним с ним по кажущейся плотности, но превосходит его по прочности и теплостойкости. Следовательно, полученный материал может быть использован для технической теплоизоляции, работающей при температурах изолируемых поверхностей до 700 °C, наравне с известным материалом.

Заключение

В результате выполнения работы установлено, что на основе 14—76 мас. % тетраэтоксисилан, частично гидролизованный в среде водного раствора этилового спирта в присутствии азотной кислоты в качестве кислотного катализатора, 13—66 мас. % полых алюмосиликатных микросфер и 3—42 мас. % белого электрокорунда может быть получен теплостойкий композиционный материал теплоизоляционного назначения.

Все применяемые компоненты способствуют повышению термостойкости получаемого материала. При этом связующее дополнительно придает теплостойкость и атмосферостойкость, микросферы понижают теплопроводность, а электрокорунд позволяет повысить прочность и теплостойкость.

При сравнении полученного материала с известным и сходным с ним по составу и назначению установлено, что полученный материал незначительно уступает извест-

ному по теплоизоляционным показателям, но превосходит по прочности и теплостой-кости, сохраняя свою прочность в течение длительного времени при $700\,^{\circ}\mathrm{C}$.

Таким образом, полученный материал может применяться для технической теплоизоляции поверхностей, температура которых при эксплуатации нагревается до 700 °С. В качестве областей применения можно рекомендовать теплоизоляцию оборудования и сооружений в теплоэнергетике и на производственных предприятиях различных отраслей промышленности, тепловую защиту конструктивных элементов летательных аппаратов от воздействия газодинамического и теплового потоков.

Список литературы

- 1. Крашениникова А.Р., Масленников Д.Н. Применение высокоэффективных теплоизоляционных материалов как основа энерго- и ресурсосбережения на всех стадиях жизненного цикла объекта недвижимости: тенденции, анализ, расчеты // Российское предпринимательство. 2018. № 23. С. 3863—3876.
- 2. Абрамян С.Г., Михайлова Н.А., Котляревский А.А., Семочкин В.О. Теплоизоляционные материалы, обеспечивающие энергоэффективность фасадных систем // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4. С. 221.
- 3. Павлычева Е.А., Пикалов Е.С. Современные энергоэффективные конструкционные и облицовочные материалы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 7. С. 76–87.
- 4. Колосова А.С., Пикалов Е.С. Современные газонаполненные полимерные материалы и изделия // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 10. С. 54–67.
- 5. Тихонов В.Б., Колесниченко М.П. Особенности использования современных теплоизоляционных материалов на полимерной основе // Энергобезопасность и энергосбережение. 2011. № 1. С. 24–27.

- Zhao J.R., Zheng R., Tang J., Sun H.J., Wang J. A minireview on building insulation materials from perspective of plastic pollution: Current issues and natural fibres as a possible solution. Journal of Hazardous Materials. 2022. Vol. 438. Article 129449.
- 7. Колосова А.С., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г. Теплоизоляционный композиционный материал на основе древесных и полимерных отходов // Экология и промышленность России. 2020. № 2. С. 28–33.
- 8. Бурдонов А.Е., Барахтенко В.В., Зелинская Е.В., Толмачева Н.А. Теплоизоляционный материал на основе термореактивных смол и отходов теплоэнергетики // Строительные материалы. 2015. № 1. С. 48–52.
- 9. Колосова А.С., Пикалов Е.С. Современные эффективные теплоизоляционные материалы на органической основе // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 4. С. 74—85.
- 10. Чухланов В.Ю., Селиванов О.Г. Модификация полиорганосилоксаном связующего на основе полиуретана // Пластические массы. 2013. № 9. С. 8–10.
- 11. Чухланов В.Ю., Усачева Ю.В., Селиванов О.Г., Ширкин Л.А. Новые лакокрасочные материалы на основе модифицированных пипериленстирольных связующих с использованием гальваношлама в качестве наполнителя // Лакокрасочные материалы и их применение. 2012. № 12. С. 52–55.
- 12. Anirudh S., Jayalakshmi C.G., Anand A., Kandasubramanian B., Ismail S.O. Epoxy/hollow glass microsphere syntactic foams for structural and functional application-A review. European Polymer Journal. 2022. Vol. 171. Article 111163.
- 13. Логинова Н.А., Григорьев С.В., Лапин Е.Е., Погорелов С.И., Рыженков А.В. Выбор и оптимизация соотношения компонентов для разработки быстромонтируемых термостойких теплоизоляционных конструкций // Теплоэнергетика. 2016. № 5. С. 51–55.
- 14. Павлычева Е.А. Разработка термостойкого полимерного композиционного материала для технической теплоизоляции // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 7. С. 51–55.
- 15. Антошкина Е.Г., Ракова О.В., Ефремов А.Н. Получение композитных гелей на основе тетраэтоксисилана, модифицированных неорганическими веществами // Исследования в области естественных наук. 2014. № 8. С. 28–31.

УДК 662.62

ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛУКОКСА ИЗ КОСТРЫ ЛЬНА МЕТОДОМ МЕДЛЕННОГО ПИРОЛИЗА

¹Асильбеков А.К., ^{1,2}Горшков А.С., ^{1,2}Ларионов К.Б.

¹ΦΓΑΟУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, e-mail: aka2@tpu.ru;

²ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», Кемерово

Исследован процесс медленного пиролиза костры льна с получением полукокса. Исходный образец характеризовался высоким содержанием летучих веществ (78,3%) и типичной теплотой сгорания для биомассы (19,7 МДж/кг). Температура пиролиза, которая составила 450 °С, предварительно была определена методом термического анализа, проводимого в инертной среде аргона при скорости нагрева 10 °С/мин. Для организации процесса пиролиза был использован цилиндрический реактор, к которому осуществлялся подвод тепла (нагретого до заданной температуры воздуха) для обеспечения косвенного нагрева образца. В качестве обдуваемой среды (агента) использовался поток азота. Было установлено, что процесс пиролиза сопровождался выделением CO_2 (3,5 об.%), CO (2,2 об.%) и CH_4 (1,5 об.%), содержащихся в неконденсируемых газофазных продуктах. Массовый остаток образующегося полукокса составлял $32,0\pm0,6\%$ со значением теплоты сгорания $Q_1^{\ r} = 30,4$ МДж/кг и выходом летучих соединений $V^{\ daf} = 13,7$ мас.%. По данным растровой электронной микроскопии было установлено, что частицы полукокса имели неоднородную поверхность с наличием большого количества открытых пор, трещин и каналов. Полученный продукт может найти применение в качестве топлива, прекурсора активированного угля, сорбента, наполнителя, удобрения и катализатора.

Ключевые слова: костра льна, пиролиз, полукокс, неконденсируемые газофазные продукты, технические характеристики

SLOW PYROLYSIS OF FLAX STRAW WITH OBTAINING SEMI-COKE

¹Asilbekov A.K., ^{1,2}Gorshkov A.S., ^{1,2}Larionov K.B.

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: aka2@tpu.ru; ²T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo

The slow pyrolysis of flax straw for the production of semi-coke has been studied. The initial sample was characterized by a high volatile matter content (78.3%) and a typical combustion heat for biomass (19.7 MJ/kg). The pyrolysis temperature – 450 °C – was preliminarily determined by thermal analysis carried out in an inert atmosphere of argon at 10 °C/min heating rate. To organize the process, a cylindrical reactor with indirect heating by air was used. The temperature of hot air was set by heater. A nitrogen was used as an inert agent. It was continiously blown through the reactor space. It was found that the pyrolysis was accompanied by releasing of CO₂ (3.5 vol.%), CO (2.2 vol.%) and CH₄ (1.5 vol.%). They were contained in non-condensable gas-phase products. The residual mass of formed semi-coke was 32.0±0.6%, its calorific value Q_i^r was 30.4 MJ/kg and a yield of volatile compounds V^{daf} – 13.7 wt. %. According to scanning electron microscopy, it was found that semi-coke particles had an inhomogeneous surface with a large number of open pores, cracks and channels. The obtained product can be used as a fuel, activated carbon precursor, sorbent, filler, fertilizer, and catalyst.

Keywords: flax straw, pyrolysis, semi-coke, non-condensable gas-phase products, technical characteristics

Предприятия по переработке льна занимаются выпуском ткани, нетканых полотен, веревок, шпагата, медицинских расходных материалов, производством масла и семени. В качестве образующихся отходов (вторичного сырья) данного вида промышленности являются треста, костра, солома и жмых [1]. Костра представляет собой одревесневшие частицы мелкой соломы стебля льна (70% массы стебля) и состоит из стойких соединений, таких как целлюлоза, лигнин, высокополимерные пентозаны с наличием жиров, воска, смолы и гемицеллюлозы [2].

Пылевидная фракция (отделенная от волокна) применима при производстве плиты и фанеры, а также комбинированных ДСП, её преимуществом перед древесными отхо-

дами является более низкая влажность [2, 3]. Также костра используется в качестве твердого топлива в виде брикетов, гранул и пеллет, которые применимы для твердотопливных котельных агрегатов со слоевым сжиганием. При этом теплота сгорания такого топлива находится в диапазоне 17—18,6 МДж/кг [4], что соответствует древесным опилкам и другим типам биомассы [5].

Одним из путей увеличения энергетической ценности данного вида топлива является пиролиз костры с получением полукокса. Также это обусловлено высоким потенциалом технологии в части экологичности и вариативности получаемых продуктов (полукокс, жидкие углеводороды и неконденсируемый газ) [6]. Большин-

ством исследователей [7] в предметной области установлено, что основными факторами, влияющими на качество продуктов и их материальный баланс, являются температура и скорость нагрева сырья. Регулирование процесса данными параметрами позволяет обеспечивать более высокую степень карбонизации получаемых продуктов, в частности полукокса.

Настоящее исследование направлено на проведение эксперимента по определению и апробации технологических условий производства полукокса из костры льна методом медленного пиролиза.

Материалы и методы исследования

В качестве исходного сырья использован вторичный продукт переработки льна, полученный с предприятия по выращиванию и переработке данного сырья, выпускающего изделия технического назначения (г. Асино, Томская область, Россия). Предварительно образец (с размером фракции до 30 мм) подвергался измельчению в режущей мельнице с последующим фракционированием на ситах с размером ячеек менее 0,5 мм.

Для определения оптимальной температуры пиролиза исследуемого образца был выполнен термический анализ с помощью дифференциального термического анализатора Netzsch STA 449 F3 Jupiter (Netzsch, Германия). Анализ проводился в инертной среде аргона (в условиях атмосферного давления) при скорости нагрева 10 °С/мин до температуры 800 °С. Скорость газового потока (аргон) составляла 150 мл/мин. Масса образца — 10 мг.

Характеристики процесса термического разложения (начальная и конечная темпера-

тура интенсивного разложения T_d и T_f соответственно, максимальная скорость процесса w_{\max} при характерной температуре T_{\max}) были определены графическим методом [8] с использованием данных $T\Gamma$ и $ДT\Gamma$.

Получение полукокса осуществлялось с помощью экспериментальной установки медленного пиролиза, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

В цилиндрический реактор с неподвижным слоем, работающий в периодическом режиме, загружался измельченный образец вторичного продукта переработки льна (масса образца 4 г). Далее к нижней части реактора подводилась теплота (косвенным способом) путем предварительного нагрева воздуха терморегулируемым теплонагревателем LHS 61L PREMIUM (LEISTER, Швейцария) мощностью 16 кВт (максимальная температура нагрева 650 °C). Воздух к термонагревателю подводился с помощью вентилятора высокого давления AIRPACK (LEISTER, Швейцария). Температура греющей среды составляла 450 °C (определена из данных термического анализа). Контроль температуры внутри реактора осуществлялся непрерывно с помощью установленной термопары Т, подключенной к регистратору Термодат-25Е6 (Термодат, Россия) с функцией электронного самописца. Камера реактора в процессе пиролиза образца непрерывно продувалась азотом, расход которого составлял 2 л/мин.

Образующиеся в процессе пиролиза парогазовые продукты подвергались охлаждению посредством их барботирования в воде. Неконденсируемые газофазные продукты пиролиза исследовались с помощью поточного газоанализатора Тест-1 (БОНЭР, Россия).



Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки пиролиза биомассы

Первая стадия проведения экспериментального исследования связана с нагревом реактора и образца (косвенным способом) до заданной температуры ($T_{\rm g} = 450~{\rm °C}$). Скорость нагрева составляла $20~{\rm °C/muh}$, что характерно для процесса медленного пиролиза. Данная стадия сопровождается испарением внешней и связанной влаги и последующим началом возгонки летучих соединений (целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин) [9]. При достижении заданной Т в реакторе поддерживалась постоянная температура до окончания процесса пиролиза (II стадия). Процесс пиролиза считался завершенным в случае отсутствия газофазных соединений в виде СО, СО, СН, и Н, которые количественно фиксировались с помощью поточного газоанализатора. Далее следовало охлаждение реактора (III стадия) для исключения самовозгорания полукокса, образующегося в процессе пиролиза. Скорость нагрева и охлаждения реактора изменялась посредством регулирования частоты переменного тока воздушного нагнетателя.

Технические характеристики исходного образца и полученного полукокса

(влажность, выход летучих соединений, зольность и теплота сгорания) были определены в соответствии со стандартными методиками: ГОСТ Р 52911-2013, ГОСТ Р 55660-2013, ГОСТ 11022-95 и ГОСТ 147-2013 соответственно. Для определения теплоты сгорания был использован бомбовый калориметр АБК-1 (Русские энергетические технологии, Россия).

Исследование изменения морфологии частиц было выполнено с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6000C (JEOL, Япония).

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 1 представлены результаты технического анализа исходного образца (вторичный продукт переработки льна). Образец характеризуется высоким значением содержания летучих соединений, низкой зольностью и сопоставимым значением теплоты сгорания относительно других твердых топлив, что в целом характерно для биомассы [10].

 Таблица 1

 Технические характеристики исходного образца

Технические характеристики								
Влажность W ^r	Влажность W ^r Выход летучих V ^{daf} Зольность А ^d Теплота сгорания ^r							
	мас. %							
9,4	78,3	3,6	19,7					

 Π р и м е ч а н и е . r – рабочее состояние, d – сухое состояние daf – сухое беззольное состояние.

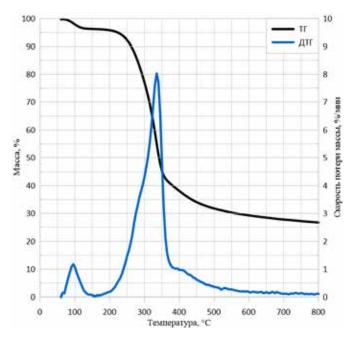


Рис. 2. ТГ- и ДТГ-профили, характеризующие процесс термического разложения образца

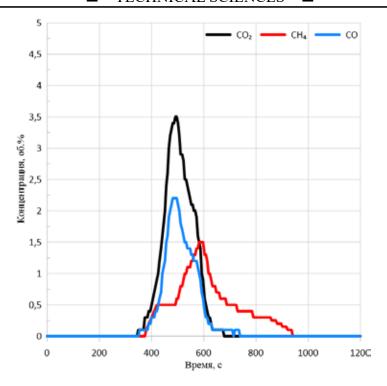


Рис. 3. Изменение содержания концентрации соединений CO₂, CO, CH₄, идентифицируемых в неконденсируемых газофазных продуктах пиролиза

Результаты термического анализа образца костры льна в виде ТГ- и ДТГ-профилей представлены на рис. 2.

Первая стадия процесса термического разложения связана с удалением абсорбированной влаги ($\Delta m = 3,4\%$) до $130\,^{\circ}$ С. Последующая потеря массы в количестве 61% в температурном интервале $220-450\,^{\circ}$ С связана с разложением гемицеллюлозы ($220-300\,^{\circ}$ С), целлюлозы ($300-400\,^{\circ}$ С) и лигнина ($250-500\,^{\circ}$ С) [11]. Профиль ДТГ, характеризующий процесс термического разложения (температурный интервал $220-450\,^{\circ}$ С) имеет мономодальный вид. Максимальная скорость реакции термического разложения w_{max} составляет 8%/мин при соответствующей температуре $T_{max} = 337\,^{\circ}$ С. По данным ТГ (рис. 2) температуры на-

По данным ТГ (рис. 2) температуры начала T_d и окончания T_f интенсивного разложения в инертной среде составляют 235 °C и 450 °C соответственно. Остаточная масса образца (полукокса) при температуре 450 °C составляет около 34%. Данная температура была выбрана для проведения последующего пиролиза в экспериментальной установке (рис. 1).

По результатам проведения процесса пиролиза исследуемого образца костры льна, масса образующегося углеродного остатка (полукокса) составила около 32±0,6 мас.%,

что коррелирует с данными термического анализа (рис. 2).

На рис. 3 приведены зависимости изменения концентраций, образующихся в процессе пиролиза неконденсируемых газофазных соединений.

Зависимость изменения выхода идентифицированных соединений характеризуется мономодальными профилями со значением максимальных концентраций для $CO_2 = 3,5$ об. %, CO = 2,2 об. % и $CH_4 = 1,5$ об. %. Более высокое значение концентрационного максимума образующегося диоксида углерода относительно других соединений может быть связано с высоким содержанием кислорода в составе исходного образца, что свойственно подобному типу материалов (биомассе [12]).

В табл. 2 представлены результаты технического анализа полученного углеродного остатка (полукокса). В результате карбонизации костры льна методом пиролиза наблюдается значительное снижение содержания летучих соединений и, как следствие, увеличение теплоты сгорания (до значения, сопоставимого с металлургическим коксом [13]) и зольного остатка. Последний после сжигания может быть использован в качестве удобрения в сельскохозяйственной отрасли.

Ta	бп	TTT 1	па	2
1 1	UD.II	ш	пи	_

Технические характеристики полученного полукокса

	Технические характеристики					
Образец	Влажность W ^r	Выход летучих V ^{daf}	Зольность A^d	Теплота сгорания Q _i		
		МДж/кг				
Полукокс из льна	2,4	13,7	11,5	30,4		

 Π р и м е ч а н и е . r – рабочее состояние, d – сухое состояние daf – сухое беззольное состояние.

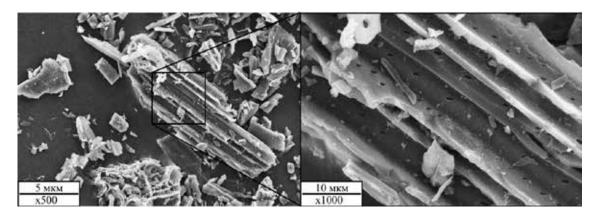


Рис. 4. Снимки РЭМ частиц полученного образца полукокса

На рис. 4 представлены микрофотографии частиц полученного полукокса.

Образец полукокса состоит из огранённых частиц неправильной формы с неоднородной поверхностью, на которой содержится множество более мелких фрагментов. Также на поверхности частиц можно наблюдать наличие образовавшихся в результате выхода летучих соединений большого количества пор, трещин и каналов.

Заключение

В данной работе представлено исследование, описывающее медленный пиролиз костры льна, являющейся отходом производства. Данный тип биомассы подвергался термическому разложению в реакторе с неподвижным слоем с воздушным нагревом при температуре 450 °C. Процесс протекал при скорости нагрева 20 °С/мин в присутствии инертного агента. Максимальные концентрации СО₂, СО и СН₄ в течение процесса составили 3,5 об. %, 2,2 об. % и 1,5 об. % соответственно. Углеродный остаток, полученный в количестве 32,0±0,6%, характеризуется увеличением по сравнению с исходным образцом зольности и теплоты сгорания в 3,2 и 1,5 раз соответственно.

Полученный продукт может найти применение в качестве топлива, прекурсора

активированного угля, сорбента, наполнителя, удобрения и катализатора [2]. Полукокс, полученный при низких температурах пиролиза и применяемый в качестве твердого топлива, за счет остаточного содержания летучих веществ отличает хорошая реакционная способность, но из-за этого же повышается количество мелкодисперсной золы уноса [14]. Также данный продукт может найти применение при совместном сжигании с классическими топливами с целью снижения эмиссии СО и NO_х и улучшения кинетики горения [15].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проекты № FZES-2021-0008 и № FSWW-2020-0022).

Список литературы

- 1. Угрюмов С.А., Боровков Е.А., Щербаков А.Е. Разработка технологической последовательности производства композиционной фанеры с применением костры льна // Лесной вестник. 2007. № 6. С. 120–122.
- 2. Mukhambet Y., Shah D., Tatkeeva G., Sarbasov Y. Slow pyrolysis of flax straw biomass produced in Kazakhstan: Characterization of enhanced tar and high-quality biochar. Fuel. 2022. Vol. 324. P. 1–10.
- 3. Aqsha A., Tijani M.M., Moghtaderi B., Mahinpey N. Catalytic pyrolysis of straw biomasses (wheat, flax, oat and barley) and the comparison of their product yields. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2017. Vol. 125. P. 201–208.

- 4. Rabbat C., Awad S., Villot A., Rollet D., Andrès Y. Sustainability of biomass-based insulation materials in buildings: Current status in France, end-of-life projections and energy recovery potentials. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 156. P. 1–23.
- 5. Demirbaş A. Calculation of higher heating values of biomass fuels. Fuel. 1997. Vol. 76. № 5. P. 431–434.
- 6. Panwar N.L., Pawar A., Salvi B.L. Comprehensive review on production and utilization of biochar. SN Applied Sciences. 2019. Vol. 1. No. 2. P. 1–19.
- 7. Ma B., Zhu J., Sun B., Chen C., Sun D. Influence of pyrolysis temperature on characteristics and Cr (VI) adsorption performance of carbonaceous nanofibers derived from bacterial cellulose. Chemosphere. 2021. P. 1–8.
- 8. Larionov K.B., Gromov A.A. Non-isothermal oxidation of coal with Ce (NO3)3 and Cu (NO3)2 additives. International Journal of Coal Science & Technology. 2019. Vol. 6. No. 1. P. 37–50.
- 9. Vamvuka D., Kakaras E., Kastanaki E., Grammelis P. Pyrolysis characteristics and kinetics of biomass residuals mixtures with lignite. Fuel. 2003. Vol. 82. No. 15–17. P. 1949–1960.
- 10. López-García M., Lodeiro P., Herrero R., Barriada J.L., Rey-Castro C., David C., Sastre de Vicente M.E. Experimental evidences for a new model in the description of the adsorption-

- coupled reduction of Cr (VI) by protonated banana skin. Bioresource technology. 2013. Vol. 139. P. 181–189.
- 11. Waters C.L., Janupala R.R., Mallinson R.G., Lobban L.L. Staged thermal fractionation for segregation of lignin and cellulose pyrolysis products: An experimental study of residence time and temperature effects. Journal of analytical and applied pyrolysis. 2017. Vol. 126. P. 380–389.
- 12. Wang S., Zou C., Yang H., Lou C., Cheng S., Peng C., Wang C., Zou H. Effects of cellulose, hemicellulose, and lignin on the combustion behaviours of biomass under various oxygen concentrations. Bioresource Technology. 2021. Vol. 320. P. 1–9.
- 13. Mitianiec W. Study of increasing thermodynamic efficiency and hydrogen amount in the process of solid fuels and biomass gasification. International Journal of Hydrogen Energy. 2022. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.191.
- 14. Itoh T., Fujiwara N., Iwabuchi K., Narita T., Mendbayar D., Kamide M., Niwa S., Matsumi Y. Effects of pyrolysis temperature and feedstock type on particulate matter emission characteristics during biochar combustion. Fuel Processing Technology. 2020. Vol. 204. P. 1–8.
- 15. Lim X.Y., Yek P.N.Y., Liew R.K., Chiong M.C., Mahari W., A.W., Peng W., Chong C.T., Lih C.Y., Aghbashlo M., Tabatabaei M., Lam S.S. Engineered biochar produced through microwave pyrolysis as a fuel additive in biodiesel combustion. Fuel. 2022. Vol. 312. P. 1–12.

УДК 621.6.058

СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРНОГО НАГРЕВАТЕЛЯ

Вадова Л.Ю.

Дзержинский политехнический институт (филиал)
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева», Дзержинск, e-mail: lvadova@mail.ru

В предлагаемой статье проанализированы недостатки трубчатых электрических нагревателей, такие как низкий коэффициент полезного действия, который определяется малой площадью излучающей поверхности нихромовой нити или спирали, размещенной по центру трубки, а также наличием теплопроводящего слоя электроизоляции на пути теплового потока от спирали к теплоотдающей трубке, что снижает плотность и мощность теплового потока, дошедшего до металлической трубки, с внешней поверхности которой происходит теплоотдача во внешнюю среду. Другим серьезным недостатком работы трубчатого электрического нагревателя является его недолговечность, которая происходит из-за перегорания нихромовой проволоки, чему способствует высокая температура нагрева спирали и слой теплопроводящего периклаза между трубкой и спиралью, теплопроводность которого уменьшается с повышением температуры, а также газовая коррозия нихромовой проволоки, резко ускоряющаяся при высокой температуре. Для повышения эффективности работы трансформаторного нагревателя необходимо увеличивать площадь теплообменной поверхности короткозамкнутого витка, контактирующей с теплоносителем (который необходимо греть), и температуру этой поверхности. В статье рассмотрены практические вопросы надежного электронагрева различных сред путем пропускания тока с одновитковой вторичной обмотки трансформатора через распределенную низкоомную нагрузку, которая, имея большую площадь поверхности теплоотдачи и высокую температуру этой поверхности, является высоконадежным, эффективным и электробезопасным нагревательным устройством. Рассмотрены вопросы расчета трансформаторного электрического нагревателя, повышения эффективности его работы, как за счет увеличения площади поверхности теплоотдачи, так и температуры этой поверхности, а также вопросы повышения надежности его работы. Надежность работы трансформаторного нагревателя не вызывает сомнений, так как ориентировочные тепловые расчеты показывают, что температура обмотки за счет теплового излучения с ее поверхности по направлению к охлаждаемой стенке кольцеобразной камеры не превысит 90-100 °C.

Ключевые слова: трансформаторный нагреватель, теплопроводность, нихромовая спираль, магнитопровод, температура

METHODS AND MEANS OF INCREASING THE EFFICIENCY OF THE TRANSFORMER HEATER

Vadova L.Yu.

Dzerzhinsk Polytechnic Institute (branch) of Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Dzerzhinsk, e-mail: lvadova@mail.ru

In the proposed article, the disadvantages of tubular electric heaters are analyzed, such as a low efficiency, which is determined by the small area of the radiating surface of a nichrome thread or spiral located in the center of the tube, as well as the presence of a heat-conducting layer of electrical insulation on the path of the heat flow from the spiral to the heat-emitting tube, which reduces the density and power of the heat flow that has reached the metal tubes, from the outer surface of which heat is transferred to the external environment. Another serious disadvantage of the tubular electric heater is its fragility, which occurs due to the burning out of the nichrome wire, which is facilitated by the high heating temperature of the spiral and a layer of heat-conducting periclase between the tube and the spiral, the thermal conductivity of which decreases with increasing temperature, as well as gas corrosion of the nichrome wire, which accelerates sharply at high temperature. To increase the efficiency of the transformer heater, it is necessary to increase the area of the heat exchange surface of the closed loop in contact with the coolant (which needs to be heated) and the temperature of this surface. Practical issues of reliable electric heating of various media by passing current from the single-turn secondary winding of the transformer through a distributed low-resistance load, which, having a large heat transfer surface area and a high temperature of this surface, is a highly reliable, efficient and electrically safe heating device, are considered. The issues of calculating a transformer electric heater, increasing the efficiency of its operation, both by increasing the surface area of heat transfer and the temperature of this surface, as well as issues of increasing the reliability of its operation are considered. The reliability of the transformer heater is not in doubt, since approximate thermal calculations show that the temperature of the winding due to thermal radiation from its surface towards the cooled wall of the annular chamber will not exceed 90–100 ° C.

Keywords: transformer heater, thermal conductivity, nichrome spiral, magnetic circuit, temperature

Во всех областях деятельности человека, связанной с теплообменом, используется такой вид теплоносителя, как электронагрев. Нагревание электрическим током обеспечивает равномерный и быстрый нагрев, а также легкое регулирование степени нагрева. Преобразование электрической энергии в тепловую производится путем нагрева электрическим током или самого нагреваемого тела, или специальных нагревательных элементов, например всевозможных нитей или спиралей

из высокоомной проволоки, которые разогреваются до высокой температуры и передают тепло нагреваемому телу. Наиболее распространен среди нагревательных элементов трубчатый электрический нагреватель (ТЭН). ТЭН изобретен и запатентован в 1859 г. американским инженером Джорджем Б. Симпсоном. С тех пор сам ТЭН по существу изменился мало. Он остается одним из основных преобразователей электрической энергии в тепловую.

Трубчатый электрический нагреватель — это электронагревательный прибор в виде металлической трубки, заполненной теплопроводящим электроизолятором (периклаз).

В настоящее время ТЭНы выпускаются различной конфигурации и на различные мощности. Основной их недостаток — это низкие КПД (коэффициент полезного действия) и надежность работы.

Низкий КПД определяется малой площадью излучающей поверхности нихромовой нити или спирали, размещенных по центру трубки, а также наличием теплопроводящего слоя электроизоляции на пути теплового потока от спирали к теплоотдающей трубке, что снижает плотность и мощность теплового потока, дошедшего до металлической трубки, с внешней поверхности которой происходит теплоотдача во внешнюю среду.

Наработка на отказ ТЭНа составляет от одного месяца до одного года. Выход ТЭНа из строя происходит из-за перегорания нихромовой проволоки, чему способствуют:

- высокая температура нагрева спирали из-за стремления снять с нее большую мощность теплового потока и большой концентрации тепла внутри спирали, которое при отсутствии конвекции остается внутри спирали (съем тепла происходит только через теплопроводность периклаза;
- слой теплопроводящего периклаза между трубкой и спиралью, теплопроводность которого уменьшается с повышением температуры;
- газовая коррозия нихромовой проволоки, резко ускоряющаяся при высокой температуре;
- разнотолщинность нихромовой проволоки;
- неравномерность намотки и расположения витков нихромовой спирали в трубке;
- неизбежно присутствующие в нихромовой проволоке микродефекты (микротрещины, микропоры, раковинки и др.);
- неравномерное при высокой температуре коррозионное окисление по глубине нихромовой проволоки, приводящее к неоднородности электросопротивления и локальным перегревам;

- коррозионные нарушения целостности трубчатой оболочки;
- чрезмерные усилия на контактные стержни при подключении проводов;
- образование слоя окалины на внутренней стенке и слоя накипи на наружной поверхности стенки трубчатой оболочки, что снижает теплопередачу через нее и теплоотдачу с ее поверхности во внешнюю среду;
- нарушение герметизации выводных контактных стержней и гермовводов.

Материалы и методы исследования

Во всех способах распространения тепла в формулах теплового потока обязательно присутствуют поверхность теплообмена и разность температур теплоносителей [1].

Величина теплового потока определяется только этими двумя составляющими. Применительно к трансформаторному нагревателю это значит, что для повышения эффективности его работы необходимо увеличивать площадь теплообменной поверхности короткозамкнутого витка, контактирующей с теплоносителем (который необходимо греть), и температуру этой поверхности. Ниже представлены способы и средства повышения эффективности работы трансформаторного нагревателя за счет увеличения площади поверхности теплоотдачи и температуры поверхности теплоотдачи. Но это достигается не просто увеличением геометрических размеров кольцеобразной камеры и снижением при этом температуры ее стенок, а, наоборот, одновременно увеличением поверхности теплоотдачи и температуры этой поверхности. Это стало возможно при условии помещения провода первичной обмотки в теплостойкую изоляцию, так как любое повышение мощности нагрева связано с повышением потребляемого тока от источника питания и дополнительным нагревом первичной обмотки. А максимальная теплостойкость даже стеклотканевой изоляции не превышает 240 °C.

Рассмотрим способ повышения эффективности работы трансформаторного нагревателя за счет повышения площади теплоизлучающей поверхности короткозамкнутого витка.

Количество теплоты, переданное от стенок кольцеобразной камеры окружающей среде, определяется законом теплоотдачи [2]:

$$Q = \alpha \cdot S (t_{cr} - t_1) \cdot \tau,$$

где α – коэффициент теплоотдачи, является сложной функцией многих переменных;

S – площадь теплообменной поверхности;

- $t_{_{\rm CT}}$ температура поверхности стенки кольцеобразной камеры, обращенной к нагреваемой среде;
- t_1 температура среды, соприкасающейся с поверхностью стенки камеры;

 τ – время.

На рис. 1 представлено электронагревательное устройство, первая кольцеобразная камера 3 которого помещена внутри второй перфорированной кольцеобразной камеры 6, так что теплосъем происходит не только с наружной поверхности первой камеры 3, но также с внешней и внутренней поверхностей второй камеры 6. Суммарная поверхность теплоотдачи камер 3 и 6 увеличивается многократно [3].

На рис. 2 представлен вариант выполнения трансформаторного нагревателя на двух магнитопроводах, последовательно включенных первичными обмотками, которые помещены в свои короткозамкнутые кольцеобразные камеры 5 и 6. Суммарная поверхность теплоотдачи увеличится многократно, если каждую из камер поместить в свои дополнительные перфорированные камеры.

Рассмотрим теперь способ повышения эффективности работы трансформаторного нагревателя за счет повышения температуры теплоизлучающей поверхности короткозамкнутого витка.

Во всех способах передачи тепла через теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение одним из основных факторов повышения величины теплового потока является разность температур между теплоносителями. Для трансформаторного нагревателя это разность между температурой стенки и температурой среды, кон-

тактирующей с этой стенкой [4]. Любое повышение температуры стенки коротко-замкнутого витка сопряжено с увеличением тока через первичную обмотку и с увеличением ее температуры. Увеличение же температуры обмотки ограничивалось изоляцией провода.

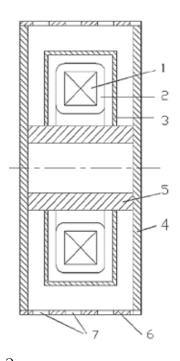


Рис. 1. Электронагревательное устройство 1 — замкнутый магнитопровод, 2 — индукционная первичная обмотка, 3 — вторичная обмотка в виде кольцеобразной замкнутой камеры, 4 — вторая кольцеобразная камера, 5 — внутренние цилиндрические части, 6 — внешняя цилиндрическая часть, 7 — перфорация

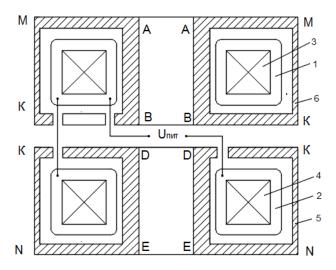


Рис. 2. Трансформаторный нагреватель на двух магнитопроводах 1, 2 – индукционная первичная обмотка, 3, 4 – замкнутый магнитопровод, 5, 6 – короткозамкнутые кольцеобразные камеры

С помещением провода первичной обмотки в теплостойкую изоляцию исчезает вероятность появления короткозамкнутых витков в самой первичной обмотке из-за ее перегрева и появляется возможность увеличить не только площадь теплообменной поверхности стенок кольцеобразных камер, но и температуру стенок камер:

 во-первых, за счет увеличения толщины их стенок, так как в формуле определения омического сопротивления проводника площадь сечения проводника стоит в знаменателе:

$$R = \rho \cdot l / S$$
,

а в формуле мощности, выделяющейся на короткозамкнутом витке, в знаменателе стоит омическое сопротивление короткозамкнутого витка:

$$P = U_2^2 / R$$
,

значит, при той же длине l короткозамкнутого витка при увеличении толщины сечения (S) короткозамкнутого витка увеличится ток через него и выделяющаяся на нем мощность:

$$P = U_2^2 / R^1$$
,

где R^1 — сопротивление меньше сопротивления R;

– во-вторых, за счет уменьшения удельного электрического сопротивления (ρ) материала короткозамкнутого витка. С точки зрения выбора материала для короткозамкнутого витка с максимальной электропроводностью таковыми являются медь и медьсодержащие сплавы. Также медь хорошо сопротивляется коррозии в обычных атмосферных условиях, в пресной и морской воде, а также других агрессивных средах.

Интересный эффект в отношении повышения температуры теплоотдающей по-

верхности короткозамкнутого витка приобретает трансформаторный нагреватель, составленный из двух трансформаторных нагревателей, у которых одни торцевые стенки, обращенные друг к другу, являются общими, а их первичные обмотки подключены к источнику питания последовательно или параллельно таким образом, что их магнитные потоки в пространстве или в магнитопроводах направлены в одну сторону (рис. 3).

ЭДС E_{AB} и E_{BD} , создаваемые магнитными потоками в магнитопроводах 3 и 4 на вторичных витках AB и BD, имеют одно направление. А это значит, что одновременно контур AMND находится под воздействием суммарной ЭДС ($E_{AB} + E_{BD}$), а контуры AMKB и BKND находятся под воздействием своих ЭДС (E_{AB} и E_{BD}). Это значит, что одновременно в указанных контурах развиваются электрические мощности:

$$\begin{split} &P_{1}=E_{AD}{}^{2} / R_{MA} + R_{MN} + R_{ND} + R_{AD};\\ &P_{2}=E_{AB}{}^{2} / R_{AM} + R_{MK} + R_{KB} + R_{AB};\\ &P_{3}=E_{BD}{}^{2} / R_{BK} + R_{KN} + R_{ND} + R_{DB}. \end{split}$$

Если раньше в контуре AMND (перегородки KB не было) был бы один магнитопровод с первичной обмоткой W_1 , подключенной на напряжение U_1 , на вторичном витке AD была бы наведена ЭДС = E_{AD} , положим, равная 1B, и в контуре AMND выделилась бы мощность P_1 , а элементы контура нагрелись бы до температуры t_1 . Если в конструкции без перегородки KB обмотки 1 и 2 на своих магнитопроводах 3 и 4 включить последовательно на напряжение U_1 , то все равно на вторичном витке AD наведется ЭДС = E_{AD} = 1B, в контуре выделится мощность P_1 , а элементы контура нагреются до той же температуры t_1 .

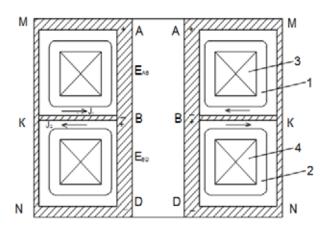


Рис. 3. Двухконтурный трансформаторный нагреватель 1, 2 – индукционная первичная обмотка, 3, 4 – замкнутый магнитопровод

Теперь, предположим, вмонтировали перегородку КВ и гальванически ее соединили с MN и AD. Получилось дополнительно к контуру AMND еще два контура – AMKB и BKND. В последние два контура поместили по магнитопроводу 3 и 4 с первичными обмотками 1 и 2 с количеством витков каждая W₁/2. Обмотки включили последовательно и подключили к тому же напряжению $\mathbf{U}_{_{1}}.$ Теперь на вторичных витках каждого контура наведутся ЭДС = $E_{AB} = E_{BD} = 0.5 B$. В каждом малом контуре выделятся мощности P_2 и P_3 , и элементы контуров нагреются до температуры t₁. Но на вторичном витке AD суммарная ЭДС, так же как и раньше, будет равна 1B, и в большом контуре AMND выделится еще мощность P_1 , и элементы контуров (кроме перегородки КВ) нагреются до новой температуры t2, в два раза выше температуры t₁. В перегородке КВ токи J₁ и J₂ малых контуров протекают во встречных направлениях; ее можно выполнять небольшой толщины, так как в ней может протекать только уравнительный ток небольшой величины.

Результаты исследования и их обсуждение

Принимая во внимание рассмотренные процессы, можно организовать малых контуров не два, а больше и получить увеличение температуры стенок кольцеобразной камеры не в два, а в большее число раз.

Ĥо увеличение температуры стенок кольцеобразных камер происходит за счет увеличения полезной мощности, выделяющейся на этих стенках за счет увеличения мощности, получаемой с вторичных витков, а в итоге - от сети переменного тока U, через первичные обмотки W/2. Так что повышение теплостойкости первичной обмотки путем применения полого кремнеземного шнура, оказалось кстати, так как ток через первичные обмотки при такой конструкции нагревателя будет увеличиваться. И чем больше ток, потребляемый нагревателями от источника переменного тока U₁, тем больше будет нагрев их первичных обмоток [5]. С существующими изоляциями медных проводов ни о каких эффективных, высоконадежных и высокотемпературных трансформаторных нагревателях речи быть не может.

Показанные на рис. 1-3 базовые варианты конструкций трансформаторных нагревателей могут быть приняты за основу для разработки нескольких вариантов высоконадежных погружных трансформаторных нагревателей для нагрева жидкостей. В каждой уже конкретной разработке на конкретную полезную мощность для конкретных условий эксплуатации необходимо выбрать материал кольцеобразной камеры и все другие элементы и параметры. Например, при небольшой величине вторичного напряжения снимаемую с поверхности камеры полезную мощность можно изменять в больших пределах изменением только сечения, толщины или материала стенки короткозамкнутого витка, при этом длина пути токопрохождения l остается неизменной.

Заключение

Свою нишу трансформаторный нагреватель займет при создании высоконадежных нагревательных устройств, которые не требуется часто переносить (то есть они устанавливаются стационарно), и для решения некоторых других задач (например, прямого нагрева). Кроме высокой надежности работы трансформаторные нагреватели имеют значительно большую поверхность теплоотдачи, чем широко известные ТЭНы, и поэтому эффективность их работы очень высока.

Список литературы

- 1. Кузнецов С.И., Рогозин К.И. Краткий курс физики: учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 215 с.
- 2. Ксенофонтов А.Г. Расчет и конструирование нагревательных устройств: учебник для вузов. 2-е изд., испр. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 503 с.
- 3. Вадова Л.Ю., Юрченко А.И. Электронагревательное устройство // Патент на полезную модель РФ № 181306. Патентообладатель ФГБОУ «НГТУ им. Р.Е. Алексеева». 2018.
- 4. Сериков А.В., Кузьмин В.М. Электронагревательные элементы и устройства трансформаторного типа для систем энергообеспечения: монография. Владивосток: Дальнаука, 2012. 247 с.
- 5. Справочник по основам теоретической электротехники: учебное пособие / Под ред. Ю.А. Бычкова, В.М. Золотницкого, Е.Б. Соловьевой, Э.П. Чернышева. СПб.: Лань, 2012. 368 с.

УДК 669

О НИКЕЛЕ И ХРОМЕ И ИХ СПЛАВАХ

Тягунов Г.В., Тягунов А.Г., Барышев Е.Е., Вандышева И.В., Зайцева Н.А., Шмакова К.Ю., Вандышев Д.Н.

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», Екатеринбург, e-mail: g.v.tyagunov@urfu.ru

Рассмотрены современные представления о структурировании металлических жидкостей, в частности расплавов никеля с различным содержанием хрома. Основной акцент сделан на кластерной модели. Построены концентрационные зависимости ряда термодинамических параметров никель-хромовых расплавов, изменения энергии Гиббса и энергии межатомного взаимодействия. Рассчитаны параметры кластерной структуры расплавов, такие как радиус кластера, количество атомов в кластере, площади межкластерных разрывов, среднее количество атомов в кластере и т.д., в зависимости от концентрации хрома и температуры. Получены результаты в интервале от температуры плавления до 2700 °С и содержании хрома в расплаве до 45 мас. %. Отмечены особенности политерм параметров структуры при температурах 1900 °С и выше, что соответствует радиусу кластера 7–10 Å или менее. В этом же температурном диапазоне ранее проведенные экспериментальные исследования физических свойств расплавов на основе никеля, бинарных и многокомпонентных, обнаруживают наличие критических температур. Это позволяет считать данную температуру 1900 °С (или выше, в зависимости от состава) температурой перехода расплава в наноструктурное состояние, температурой фазового перехода «жидкость – жидкость» (LLT).

Ключевые слова: расплав, структура металлической жидкости, кластер, межкластерный разрыв

ABOUT NICKEL AND CHROME AND THEIR ALLOYS

Tyagunov G.V., Tyagunov A.G., Baryshev E.E., Vandysheva I.V., Zaytseva N.A., Shmakova K.Yu., Vandyshev D.N.

Ural Federal University, Yekaterinburg, , e-mail: g.v.tyagunov@urfu.ru

Modern ideas about the structuring of metallic liquids, in particular nickel melts with different chromium content, are considered. The main emphasis is on the cluster model. The concentration dependences of a number of thermodynamic parameters of nickel-chromium melts, changes in the Gibbs energy and the energy of interatomic interaction are constructed. The parameters of the cluster structure of melts, such as the cluster radius, the number of atoms in a cluster, the areas of intercluster discontinuities, the average number of atoms in a cluster, etc., are calculated depending on the chromium concentration and temperature. The results are obtained in the range from the melting temperature to 2700 °C, and the chromium content in the melt is up to 45 wt.%. Peculiarities of polytherm structure parameters at temperatures of 1900 °C and higher are noted, which corresponds to a cluster radius of 7 – 10 Å or less. In the same temperature range, earlier experimental studies of the physical properties of nickel-based melts, binary and multicomponent, reveal the presence of critical temperatures. This allows us to consider this temperature of 1900 °C (or higher, depending on the composition) as the transition temperature of the melt into the nanostructured state, the liquid-liquid phase transition temperature (LLT).

Keywords: melt, structure of metallic liquid, cluster, intercluster discontinuity

Среди многочисленных известных композиций сплавы на основе никеля имеют ряд преимуществ. Кроме хорошей технологичности они обладают высокой жаропрочностью и коррозионной стойкостью в различных агрессивных средах, а также структурной устойчивостью в условиях радиационного воздействия. Отмеченное позволяет применять сплавы на основе никеля в существующих и перспективных конструкциях химического, авиакосмического и электронного машиностроения, а также для изготовления компонентов активной зоны термоядерных реакторов, использующих в качестве теплоносителей щелочные металлы в жидком состоянии [1, 2]. Обязательным легирующим элементом в таких сплавах является хром, обеспечивающий высокое сопротивление материалов окислению. Некоторые данные об этих элементах приведены в таблице.

Эволюционное развитие кластерной теории расплавов позволяет объяснять некоторые особенности изменения физических свойств металлических жидкостей, в частности расплавов никеля, хрома, их двойных и многокомпонентных композиций. Важно не просто определить параметры кластерной структуры жидкого металла в определенных условиях, необходимо учесть влияние температуры нагрева на них, рассмотреть взаимосвязь параметров и их изменения с поведением физических свойств сплавов. Именно эту задачу, установление взаимосвязи параметров кластерной структуры сплавов никеля с хромом в жидком состоянии и особенностей поведения физических свойств этих систем, ставят авторы работы, предпринимая попытку количественно описать наблюдаемые эффекты влияние состояния расплава на свойства готового твердого металла.

Материалы и методы исследования

В периодической системе Д.И. Менделеева никель и хром относятся к группе переходных элементов, отличительной чертой которых является частичное заполнение электронных d-орбиталей. Между собой они отличаются количеством валентных электронов, необходимых для обеспечения межатомного взаимодействия.

Кроме того, вследствие неизоморфности решёток ($Cr-O\/\/\/\/$ ($Ni-\Gamma\/\/\/\/\/$ при их сплавлении образуют ограниченные твёрдые растворы: γ -твёрдый раствор на основе никеля и α -твёрдый раствор на основе хрома. Диаграмма состояния сплавов на основе системы Ni-Cr относится к эвтектическому типу с температурой эвтектического равновесия 1345 °C.

Фазовый состав эвтектических композиций определяется условиями равновесия: Ж (расплав) = γ -фаза + α -фаза, т.е. из расплава кристаллизуются две обособленные фазы. Достоинство таких композиций в том, что фазовые составляющие материала близки к термодинамическому равновесию и на поверхностях раздела образуются прочные связи. Недостаток заключается в отсутствии возможностей регулирования объёмного соотношения фаз в формируемом сплаве [3].

Исключительно интересной и важной особенностью переходных металлов является их склонность к образованию интерметаллических соединений между собой и с другими металлами. Формирующиеся при этом фазы характеризуются упорядоченным расположением атомов и наличием областей гомогенности [4, 5].

Растворимость хрома в никеле при комнатной температуре близка к 20–22 мас. % Сг. Дальнейший рост концентрации хрома до 37 мас. % сопровождается выделением фазы $\mathrm{Ni_2Cr}$ и связанным с этим изменением электронной плотности на границе атомных ячеек, что оказывает влияние на уровень физических и специальных свойств. Поэтому при разработке никель-хромовых композиций, обладающих структурой γ -твёрдого раствора при температурах эксплуатации изделий, возникает необходимость учета возможной гетерофазности.

Хром обладает высшим валентным состоянием +6, но слабые связи с остовом атомов способствуют их переходу в коллективизированное состояние. Поэтому атомные остовы хрома имеют внешние P^6 -оболочки. Часть d-электронов никеля сохраняется на атомном остове, и у него нет внешней P^6 -конфигурации.

При плавлении никеля и хрома характер химических связей не меняется, ближний порядок остаётся постоянным, а дальний исчезает из-за ослабления связей и возрастания роли тепловых колебательных движений. В атомном ряду Ст... Ni температура плавления, характеризующая сопротивление кристаллической решётки тепловым колебаниям, и теплота плавления снижается в соответствии с уменьшением химической валентности элементов, а следовательно, и количества коллективизированных электронов. Кроме того, при нагреве расплава до температур значительно превышающих температуру плавления t_{nn} (~1850 ÷ 1900 °C) внешние *s*-электроны под влиянием теплового воздействия могут перейти в возбужденное состояние и изменить форму орбиталей, что способствует переходу расплава в устойчивое метастабильное состояние.

Известно, что полная энергия межатомного взаимодействия межатомных связей в металлах характеризуется, в частности, температурой кипения и теплотой испарения [6, 7]. По данным, приведённым в таблице, энергия межатомного взаимодействия выше у никеля, т.е. возможная атомизация элементов при кипении в отличие от процесса плавления определяется не их валентностью, а уровнем межатомного взаимодействия. Исчезновение дальнего атомного упорядочения при плавлении никеля и хрома происходит в результате сравнительно небольшого энергетического вклада в систему ($\Delta H \approx 4-5$ ккал/г·ат·град). Однако процесс испарения этих элементов осуществляется при увеличении энтальпии примерно в 20 раз. Последнее свидетельствует о высокой устойчивости ближнего упорядочения в широком интервале температур существования никеля и хрома в конденсированном состоянии, т.е. в виде расплава. Поэтому информация о том, что при нагреве металлических жидкостей до температур, превышающих t_{m} на 300– 400 °C, происходит атомизация, и ионизация их структуры противоречит термодинамическим характеристикам, а также опубликованным данным масс-спектрометрического анализа различных веществ.

Эволюционное развитие представлений о структурировании металлических жидкостей изложено в различных обзорах (например [6, 8]). Важным аналитическим следствием является признание иерархической структуры расплавов, состоящей из взаимодействующих элементов: электронов, атомов и кластеров. Однако корпускулярно-волновая природа атомов и электронов, а именно принцип неопределённости

не позволяет одновременно точно определить их координаты и импульс. В квантовой механике существует правило о неразличимости квантовых объектов, в соответствии с которыми атом не является твёрдой, жидкой и газообразной частицей, не несёт признаков агрегатного состояния, но обладает химическими признаками любого вещества [9]. Поэтому структурной единицей металлических расплавов является кластер, но его структура и свойства в значительной степени зависят от физико-химических особенностей атомной и электронной составляющих [8].

Кроме того, состояние систем частиц, при котором их относительное движение осуществляется в ограниченном пространстве, является объектом внимания учёных и специалистов в различных разделах макро- и микрофизики. По мнению академика В.Я. Файнберга и других, образование таких связанных систем осуществляется благодаря наличию сил притяжения на некоторых расстояниях между частицами. Известно, что в стабильных связанных состояниях масса образованной системы меньше суммы масс составляющих ее частиц. Разность Δ m между ними определяет энергию связи системы $\epsilon_{\text{св}} = \Delta \text{m} \cdot \text{c}^2$.

Таким образом, кластер как система частиц обязан своим существованием не только физико-химической природе ее элементов (атомов, электронов), но и энергетически выгодным условиям существования систем в связанном состоянии. Структурной единицей твёрдого вещества принято считать кристаллическую решётку или элементарную ячейку (Е.С. Фёдоров). В жидком состоянии, начиная с работ Г. Стюарта, в качестве структурных единиц рассматриваются микрогруппировки атомов, отличающиеся названием, но близкие по физическому смыслу. В 1940-х гг. появился часто цитируемый в настоящее время термин «кластер». Не претендуя на оригинальность и продолжая развитие квазихимической модели макронеоднородного строения металлических жидкостей профессора Б.А. Баума [8, 10] под термином кластер понимаем следующее: кластер — это единый в природе элемент конденсированного состояния вещества, представляющий собой ассоциацию упорядоченных атомов, связанных межчастичным взаимодействием и совершающих согласованные тепловые колебания.

Термодинамическая оценка состояния веществ осуществляется путём анализа термодинамического потенциала Гиббса, связанного с энтальпией и энтропией уравнением $G = H - T \cdot S$. Однако практически изучается их изменение, например, в процессе плавления или испарения. Данные о потенциалах большинства металлов приводятся в различных изданиях, а о никеле и хроме и в нашей таблице.

Характер изменения энтальпии при плавлении и испарении рассмотрен выше. Что же касается энтропии, то ее изменение при плавлении Ni и Cr отличается незначительно, тогда как при испарении атомное разупорядочение никеля по сравнению с хромом оказалось существеннее.

Экспериментальные определения термодинамических параметров весьма трудоёмки, да и погрешности велики. Поэтому большое развитие получили методики анализа и расчета, а также методы машинного моделирования. В поисках источника информации, необходимой для изучения концентрационной зависимости термодинамических показателей сплавов системы Ni – Cr, выполнили глубокую проработку профильных изданий и остановились на методике, изложенной в [11, 12]. Необходимые компоненты для расчета: химический состав, координационное число и параметр взаимодействия или энергия взаимодействия пар атомов (W). Рассчитанные значения привели к уровню значений сплава Ni + 1 мас. % Ст. Такой приём в термодинамике известен и используется для ускоренного наглядного понимания тенденции протекающих процессов и позволяет избежать ряда процедурных ошибок.

Основные характеристики Ni и Cr

Эле-	тепл	нение оты, ат·град	T	T	Плот-	Атомный	Электро-	Шкала Луг	и Бенсона	Теплоем- кость при
мент	$\Delta H_{_{ m IIJ}}$	$\Delta H_{_{ m HCH}}$	°C	°С	D_{20} , $\kappa\Gamma/M^3$	радиус, Å	отрица- тельность	электро- отрица- тельность	кова- лентный радиус, Å	1600°C C_{p} , ккал/ моль·град
Ni	4,2	94	1455	2897	8963	1,27	1,8	1,92	1,04	9,2
Cr	4,6	83	1875	2680	7190	1,24	1,4–1,6	1,72	1,16	9,4

Результаты исследования и их обсуждение

Графически зависимость энтальпии и энтропии имеет экспоненциальный вид, возрастающей по абсолютным значениям функцией с увеличением концентрации в сплавах хрома до 45 мас.%. В этих же координатах функция ΔG увеличивается, а ΔW уменьшается линейно с изменением угла наклона к оси абсцисс в точке, соответствующей содержанию хрома в сплаве ~ 20 мас.% (рис. 1).

Таким образом, с увеличением доли атомов хрома в сплавах системы Ni — Cr заполняемость электронами *d*-оболочек уменьшается, снижается и энергетический потенциал межатомного взаимодействия, растёт энтропия системы, так как повышается хаотичность в размещении атомов по объёму. Особенность взаимодействия атомов никеля и хрома вблизи аномальных точек на рис. 1 соответствует рассмотренным выше концентрационным ситуациям, способствующим, в частности, уменьшению растворимости хрома в никеле и появлению фазы Ni, Cr.

Термодинамика консервативна, и ее постулат (Гиббса закон), что любая система должна состоять как минимум из двух фаз, во все времена остаётся непоколебимым. Возражающих нет, но есть два направления развития этого положения.

Во времена И. Ньютона роль пространства в строении вещества рассматривалась на уровне макромира. Затем появилось понятие свободного объема, но уже внутри вещества, и использовалось это понятие как вспомогательный структурный элемент. В частности, А. Эйнштейн считал, что пространство – это физический объект, составляющий неразрывное единство с веществом, и предполагал их взаимодействие и взаимовлияние в любых агрегатных состояниях. По мнению А.И. Вернадского, взаимосвязь вещества и пространства состоит в том, что каждому состоянию вещества неизбежно соответствуют определённые пространственные структуры [9].

Однако, несмотря на отсутствие конкретной информации, идея о взаимосвязи вещества и пространства оказалась фундаментальной для дальнейшего развития теории фазового перехода при плавлении и затвердевании, а также понимания естественных аспектов взаимосвязи элементов структуры металлов, находящихся в «твёрдом — жидком — твердом» состояниях.

Результаты экспериментальных исследований дефектов в кристаллах дали основание В. Шоттки, Я.Н. Френкелю, Б.Я. Пинесу и Я.Е. Гегузину рассматривать вакансии в кристаллической решетке как термодинамически равновесный пространственный компонент структуры. При нагреве вещества вакансии генерируют, и их объём при температурах плавления приближается к 1,5%.

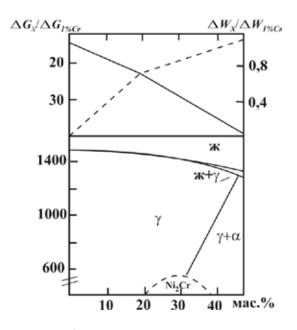


Рис. 1. Влияние концентрации хрома в Ni, Cr расплавах на относительные величины изменения энергии Гиббса ($\Delta G_x/\Delta G_{1\%C}$) и энергии межатомного взаимодействия ($\Delta W_x/\Delta W_{1\%C}$) при температуре 1600 °C

Другое научное направление моделирования структуры расплавов рассматривает межкластерное пространство как фазу, состоящую из таких же атомов, что и кластер, но невзаимодействующих между собой. Однако такой подход нарушает правило фаз, сформулированное Гиббсом: одни и те же атомы не могут образовывать две разные фазы в одном агрегатном состоянии.

Оригинальная модель структуры металлических жидкостей, предложенная профессором И.В. Гаврилиным, в которой второй структурной составляющей предполагается рассматривать межкластерные разрывы, образующиеся в результате тепловых колебаний кластеров [9]. Математический аппарат модели, позволяющий изучить влияние температуры и химического состава на параметры структуры, разработан на основе данных о геометрии ближнего порядка, сведений о теплоёмкости, изменений теплоты плавления и испарения веществ.

Параметрами кластерной структуры является его радиус – $r_{\rm kn}$, среднее количество

атомов в кластере — $n_{\rm arr}$, количество атомов в грамм-атоме или моле — $N_{\rm kn}$, единичные $S_{\rm e}$ и суммарные $\Sigma S_{\rm e}$ площади межкластерных разрывов, объём межкластерного пространства — $\Delta V_{\rm p}$ и количество активированных атомов — $C_{\rm a}$, имеющих как минимум одну степень свободы и входящих в состав кластеров на границе раздела «кластер — межкластерное пространство». Благодаря такому параметру осуществляется постоянная взаимосвязь между кластерами по всему объёму расплава.

Температурные зависимости рассчитанных структурных параметров жидкого никеля приведены на рис. 2. Аналогичный вид имеют политермы параметров сплавов никеля с хромом. Оказалось, что особенности электронной структуры никеля и хрома существенно влияют на формирование структуры их сплавов. Так, например, после плавления наибольшим радиусом обладают кластеры никеля ~14Å.

Такой результат хорошо согласуется с данными наших дифракционных исследований и расчётов, выполненных по методике Гурова — Боровского.

С повышением концентрации хрома в сплавах энергия межатомного взаимодействия и радиусы кластеров уменьшаются, снижается и интенсивность изменения параметров при нагреве (рис. 3). При этом в температурном интервале от $t_{\text{пл}}$ до($t_{\text{пл}}$ +250°C)величина $dr_{\text{кл}}/dt$ уменьшаетсявряду Ni+....+45 масс % Сг практически в два раза.

Особый интерес, по нашему мнению, представляют отклонения политерм параметров структуры, от линейных либо другого вида зависимостей, построенных в логарифмических координатах, к оси абсцисс выше 190 °C т.е. при величине радиусов кластеров $\leq 7 \mbox{Å}$. По данным авторов работ [13–16] нанокристаллические вещества с такой размерностью обладают иными свойствами.

Легирование никеля атомами хрома, сопровождающееся заполнением электронами 3d-оболочек, приводит к нестабильности взаимодействия S- и d-электронных уровней. В результате реально существует переход атомно-электронной системы в энергетически возбужденное, т.е. метастабильное состояние. Этому способствует повышение температуры и связанное с ним увеличение частоты и амплитуды колебаний элементов системы, а также возрастание роли трансляционных процессов. Последнее повышает вероятность равновесного распределения атомов в кластерах и кластеров по объёму расплава. Следствием отмеченного является выравнивание полей напряжений и уменьшение их влияния на структуру ближнего упорядочения [4–6, 13].

При температурах выше 1900 °С и минимизации радиуса кластеров ниже 7 – 10Å продолжительность существования системы в метастабильном или возбужденном состоянии увеличивается и возрастает температурный интервал при охлаждении.

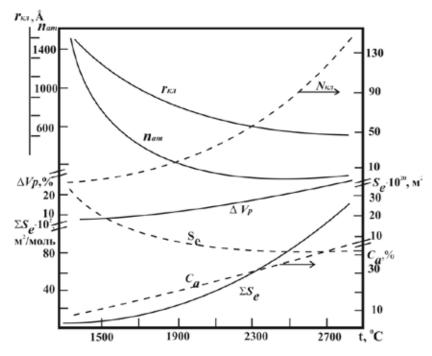


Рис. 2. Политермы кластерной структуры жидкого никеля

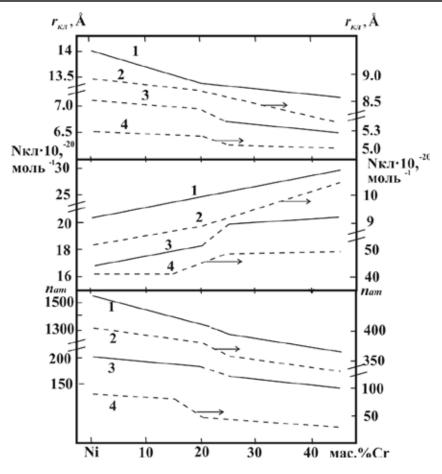


Рис. 3. Влияние концентрации хрома в сплавах системы Ni-Cr на величину кластеров $(r_{_{\rm к.r}})$, их количество в одном моле $(N_{_{\rm k.l}})$ и среднее количество атомов в кластере $(n_{_{\rm ant}})$ при температурах плавления (1), 1700 (2), 1900 (3) и 2200 $^{\circ}C$ (4)

Заключение

В научных публикациях такие изменения состояния системы нередко связывают с фазовым переходом второго рода «жидкость — жидкость» (LLT), и такое мнение не вызывает сомнений и возражений.

Аналогичные структурные особенности мы многократно наблюдали при исследовании промышленных сталей и сплавов, в том числе и сплавов на никель-хромовой основе [8, 17, 18]. Однако наше внимание в большей степени привлекали проблемы взаимосвязи твёрдого и жидкого металлических состояний. В результате выполненных исследований удалось установить исключительное влияние структурных изменений расплава на процесс затвердевания и формирование эксклюзивных свойств специальной металлопродукции. Таким образом, создавалась научно обоснованная технология плавки с элементами термовременной обработки жидкого металла, получившая признание в мировой практике.

Список литературы

- 1. Масанский О.А., Казаков В.С., Токмин А.М., Свечникова Л.А., Астафьева Е.А. Материаловедение и технологии конструкционных материалов. Красноярск: СФУ, 2015. 268 с.
- 2. Свидунович Н.А. Выбор и применение специальных сталей и сплавов. В 5 т. Т. 3. Минск: Белорусская наука, 2019. 529 с.
- 3. Савченко А.М., Юферов О.И., Ногин Н.И. Изменение температуры и энтальпии плавления эвтектических сплавов при изменении взаимной ориентировки фаз // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Серия «Материаловедение и новые материалы». 2012. Вып. 2 (73). С. 44–51.
- 4. Григорович В.К. Металлическая связь и структура металлов. М.: Наука, 1988. 296 с.
- 5. Сурков В.А. Анализ методов получения интерметаллидов р, d-металлов // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 10. С. 27–33.
- 6. Еланский Г.Н., Кудрин В.А. Свойства и строение расплавов на основе железа // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2015. Т. 15. № 3. С. 11–19.
- 7. Еланский Г.Н. Сталь и периодическая система элементов Д.И. Менделеева. М.: МГВМИ, 2011. 196 с.
- 8. Баум Б.А., Хасин Г.А., Тягунов Г.В., Клименков Е.А., Базин Ю.А., Коваленко Л.В., Михайлов В.Б., Распопова Г.А. Жидкая сталь. М.: Металлургия, 1984. 208 с.

- 9. Гаврилин И.В. Плавление и кристаллизация металлов и сплавов. Владимир: Владимирский государственный университет, 2000. 206 с.
- 10. Тягунов Г.В., Барышев Е.Е., Цепелев В.С., Костина Т.К., Третьякова Е.Е., Колотухин Э.В., Тягунов А.Г., Акшенцев Ю.Н., Павлинич С.П., Попель П.С., Конашков В.В., Вьюхин В.В., Савин О.В., Вандышева И.В., Зайцева Н.А., Шмакова К.Ю. Металлические жидкости. Стали и сплавы. Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2016. 268 с.
- 11. Могутный Б.А., Томилин И.А., Шварцман Л.А. Термодинамика сплавов железа. М.: Металлургия, 1984. 207 с.
- 12. Бердников В.И., Гудим Ю.А. Прогнозирование термодинамических свойств жидких интерметаллидных растворов // Известия вузов. Черная металлургия. 2014. Т. 57. № 7. С. 34–38.
- 13. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2009. 416 с.
- 14. Курбанова Э.Д., Полухин В.А. Структурно-динамические эффекты в металлических расплавах, стеклах

- и нанокристаллах в зависимости от температуры // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / Под общ. ред. В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. Тверь: Тверской государственный университет, 2018. Вып. 10. С. 414–419.
- 15. Андриевский Р.А. Основы наноструктурного материаловедения. Возможности и проблемы. М.: Лаборатория знаний, 2020. 255 с.
- 16. Цао Гочжун, Ин Ван. Наноструктуры и наноматериалы. Синтез, свойства и применение / Пер. с англ. А.И. Ефимова, С.И. Каргова, науч. ред. В.Б. Зайцев. М.: Научный мир, 2012. 520 с.
- 17. Тягунов А.Г., Костина Т.К., Барышев Е.Е., Тягунов Г.В. Влияние состояния расплава на структуру жаропрочных сплавов типа ЦНК // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2013. Т. 13. № 1. С. 79–83.
- 18. Попель П.С., Сидоров В.Е., Бродова И.Г., Кальво-Дальборг М., Дальборг У. Влияние термической обработки исходного расплава на структуру и свойства кристаллических слитков или отливок // Расплавы. 2020. № 1. С. 3–36.

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 620.93:662.769.21

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДА В КАЧЕСТВЕ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЯ

¹Шатманов О.Т., ¹Исманов Ю.Х., ²Маматкасымова А.Т., ³Бекболот К.Б.

¹Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова, Бишкек, e-mail: i_yusupjan@mail.ru;

²Ошский технологический университет им. М. Адышева, Ош;

³Институт химии и фитотехнологий НАН КР, Бишкек

Проведен анализ перспектив использования водорода в качестве носителя энергии, который показывает, что эффективность такого носителя несомненна. Технологии хранения и перевозки водорода хорошо отработаны. Водород достаточно просто преобразовать в другой вид носителя энергии - например, электричество в топливных элементах. С точки зрения экологической безопасности водород практически непревзойденный источник энергии. Водород чаще всего получают из воды, и его окисление также приводит к получению воды. То есть никаких вредных выбросов в атмосферу нет. Водород в качестве энергоносителя имеет свои преимущества и недостатки, которые определяются свойствами и характеристиками водорода. К преимуществам водорода в качестве энергоносителя относятся следующие факторы: 1. Производство. В качестве сырья для получения водорода можно использовать углеводороды и неуглеводородные источники, например воду. 2. Использование. Во многих отраслях промышленности водород можно использовать либо как химическое топливо, либо в качестве сырья. 3. Хранение. Преимуществом водорода в качестве энергоносителя является то, что водород можно хранить в произвольных объемах и формах, причем форма хранения определяется только возможным дальнейшим способом использования водорода. 4. Транспортабельность. Для транспортировки водорода можно использовать, по сути, любой вид современного транспорта – морской, автомобильный, железнодорожный. И самое важное, водород можно транспортировать по трубопроводам, причем для этого можно использовать существующие трубопроводные линии для природного газа. 5. Безопасность для окружающей среды. Использование водорода в качестве энергоносителя предполагает его окисление, а результатом этого процесса может быть в основном только вода. Обладая многими положительными свойствами, водород, тем не менее, имеет некоторые отрицательные характеристики, которые с развитием современных технологий могут быть преодолены, что позволит в перспективе широко использовать водород в качестве энергоносителя.

Ключевые слова: водород, энергетика, ископаемое топливо, энергоноситель, топливный элемент, экология

PROSPECTS FOR USING HYDROGEN AS AN ENERGY CARRIER

¹Shatmanov O.T., ¹Ismanov Yu.Kh., ²Mamatkasymova A.T., ³Bekbolot K.B.

¹Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov,

Bishkek, e-mail: i_yusupjan@mail.ru;

²Osh Technological University named after M. Adyshev, Osh; ³Institute of Chemistry and Phytotechnologies of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek

An analysis of the prospects for the use of hydrogen as an energy carrier has been carried out, which shows that the effectiveness of such a carrier is beyond doubt. Hydrogen storage and transportation technologies are well developed. Hydrogen is quite easy to convert into another type of energy carrier—electricity, for example, in fuel cells. From the point of view of environmental safety, hydrogen is an almost unsurpassed source of energy. Hydrogen is most often obtained from water, and its oxidation also results in water. That is, there are no harmful emissions into the atmosphere. Hydrogen as an energy carrier has its advantages and disadvantages, which are determined by the properties and characteristics of hydrogen. The advantages of hydrogen as an energy carrier include the following factors: 1. Production. Hydrocarbons and non-hydrocarbon sources, such as water, can be used as raw materials for hydrogen production. 2. Usage. In many industries, hydrogen can be used either as a chemical fuel or as a feedstock. 3. Storage. The advantage of hydrogen as an energy carrier is that hydrogen can be stored in arbitrary volumes and forms, and the form of storage is determined only by the possible further use of hydrogen. 4. Transportability. In fact, any type of modern transport can be used to transport hydrogen—sea, road, rail. And, most importantly, hydrogen can be transported through pipelines, and this can be done using existing pipeline lines for natural gas. 5. Safety for the environment. The use of hydrogen as energy carrier involves its oxidation, and the result of this process can be, basically, only water. Having many positive properties, hydrogen, however, has some negative characteristics that can be overcome with the development of modern technologies, which will allow hydrogen to be widely used as an energy carrier in the future.

Keywords: hydrogen, energy, fossil fuel, energy carrier, fuel cell, ecology

История человечества связана с использованием большого количества источников энергии, которые, в свою очередь, порождают невероятно большой диапазон используемых в современном мире энергоносителей.

Если говорить о природных энергоносителях, то такое совпадение — источник энергии и энергоноситель — возможно только в случае ископаемых источников энергии, таких как уголь, газ, нефть и др. Именно

для ископаемых источников энергии характерно то, что энергия переносится с источником без каких-либо преобразований, так как есть. В этом существенное отличие ископаемых источников энергии от источников, подобным падающей воде и ветру, в которых энергия требует предварительного преобразования, чаще всего в электрическую энергию, прежде чем она может быть использована для практических нужд.

На современном развитии человеческого общества именно ископаемое топливо является основным источником энергии и одновременно основным энергоносителем. И это фактор, который сильно влияет на окружающую среду, не говоря уже о том, что запасы ископаемого топлива ограничены.

Постепенное истощение объемов ископаемых источников энергии, рост обеспокоенности влияния этих источников на окружающую среду вынудит человечество обратить внимание на альтернативные источники энергии как способ преодоления возможного энергетического кризиса. Правда, факт заключается в том, что практически все известные на сегодняшний день источники энергии, такие как ветер, падающая вода, ядерное топливо, солнечное излучение и др., не являются носителями энергии в виде, который можно напрямую использоваться потребителями энергии.

И еще один очень важный момент — эти источники энергии способны, по крайней мере на современном уровне развития технологий, создавать только один вид носителя энергии — электричество.

Однако электричество не может являться универсальным носителем энергии. Во многих случаях в качестве носителя энергии необходимо использовать и химические источники энергии, и напрямую сырьевые ресурсы. В качестве примера можно рассмотреть воздушный транспорт, который при современных технологиях пока не может перейти на электричество. Да и наземный транспорт пока не способен полностью перейти на электричество [1–3]. Сокращение использования ископаемых видов энергии, замена их возобновляемыми или неископаемыми источниками энергии может вызвать сильное перенасыщение рынка электрической энергией и создать высокий дефицит химических носителей энергии [4-6].

Как показал анализ развития использования источников энергии в человеческом обществе, такие базовые в свое время источники энергии, как древесина, уголь, нефть и даже природный газ, будут постепенно сокращаться, будет сокращаться и их

доля в мировой энергетике. На смену этим источникам энергии придет использование энергии ядерного деления, ветра, солнечной энергии и, в перспективе, энергии термоядерного синтеза. Как ни странно, исследования показали, что появление таких источников энергии, как ядерное деление, может привести к достаточно сильному переизбытку электрической энергии. И, хотя электричество достаточно универсальный вид энергии, однако, как уже упоминалось, не везде технологии позволяют ее использовать. Такая ситуация, связанная с переизбытком электрической энергии и дефицитом химических источников энергии, уже наблюдалась в некоторых странах даже на современном уровне.

Данные исследования, показавшие, что с развитием человеческого общества использование ископаемых видов топлива будет постепенно сокращаться и при этом использование электрической энергии будет ограничено невозможностью ее использования в определенных областях человеческой деятельности, предполагают развитие технологий, позволяющих получать химические носители энергии либо непосредственно из неископаемых источников энергии, либо опосредованно, получив вначале электрическую энергию из неископаемых источников энергии, а затем преобразовав ее в химический источник энергии [7–9]. И, как показывает анализ работ многих исследователей в области энергетики [10–12], в качестве универсального, экологически чистого химического источника энергии, который будет использоваться в перспективе в человеческом обществе, может быть водород. Однако надо помнить, что водород, как и электричество, являются производными, т.е. вторичными носителями энергии, которые могут всегда дополнять друг друга [13–15]. При этом первичные носители, такие как уран, которые могут быть легко транспортируемы и хранятся без особых сложностей, несомненно, останутся, даже если электричество и водород займут весь спектр вторичных энергоносителей будущего человеческого общества.

Целью данной работы является обзор энергетики, использующей водород, оценка перспектив использования водорода в качестве энергоносителя. Дается описание аспектов использования водорода в качестве носителя энергии, а также системы и технологии энергетики на основе водорода, включая технологии, используемые для производства, утилизации, хранения и распределения водорода.

Потребление энергетических ресурсов и воздействие этого фактора на окружающую среду

Энергия является фундаментом достойного существования любого современного промышленно развитого общества. Непосредственное влияние энергетики на современное общество проявляется в уровне жизни, качестве и образе жизни. Потребности развития энергетики определяются численностью населения и тем, как распределяется энергия между городом и селом. Рост энергетики в первую очередь связан с ростом населения большинства регионов мира. Очень важным фактором, влияющим на потребление энергии, является постоянно растущий уровень жизни, причем это особенно проявляется в странах третьего мира. Как ни странно, нехватка энергетических ресурсов также влияет на рост потребления энергии, а значит, на воздействие энергетики на окружающую среду.

Ископаемые виды топлива к настоящему времени составляют около 95% используемых источников энергии. Замещать ископаемые виды источников энергии пытаются методами гидроэнергетики, ядерной, солнечной, ветровой и геотермальной энергетики [16–18].

Особенностью ядерной энергетики является то, что она используется в основном для производства электрической энергии. Однако есть нечастые примеры использования ядерных реакторов для обогрева воды и подачи ее в системы централизованного теплоснабжения, промышленного отопления. Наконец, ядерная энергия может быть использована в качестве первичного источника энергии для выработки химических носителей энергии, таких как водород (термохимическое производство водорода).

Для многих современных и даже технологически развитых характерно несоответствие спроса на энергию и ее предложения. И если речь идет об ископаемых источниках энергии, то при их достаточном количестве спрос всегда может быть удовлетворен. В отношении возобновляемых источников энергии этого не скажешь. В первую очередь это связано с тем, что возобновляемые источники энергии чаще всего доступны с перерывами. Атомные электростанции также не могут увеличивать производство энергии в моменты пиковых потребностей, так как их работа эффективна при условии постоянства уровня их мощности. Как следствие, реальная выработка энергии относительно заданной мощности возобновляемых источников энергии, если брать какой-то определенный период времени, сильно различаются для различных технологий возобновляемой энергетики.

Отсюда полярные представления о перспективах возобновляемых источников энергии. Часть экспертов считает, что уже в ближайшей перспективе возобновляемые источники энергии полностью покроют потребности человеческого общества в энергии. Другая часть экспертов считает, что возможности возобновляемых источников энергии ограничены, например оценки Международной энергетической ассоциации дают предельные значения для возобновляемых источников энергии при производстве электрической энергии приблизительно 10^{20} Дж в год, в то время как человеческое общество потребляет на сегодняшний день порядка 10^{21} Дж в год, и потребление будет только расти.

Важнейшие проблемы, с которыми человечество столкнется при использовании возобновляемых источников энергии:

- Обычно стоимость любых систем возобновляемых источников энергии значительно превосходит стоимость систем, использующих ископаемые источники энергии.
- Возобновляемые источники энергии обычно занимают достаточно большие площади, т.е. концентрация этих источников энергии очень мала, что приводит к сложностям при их проектировании.
- Возобновляемые источники энергии это чаще всего источники, которые не могут быть непрерывными, постоянными по мощности, вследствие чего возникает необходимость использовать накопители энергии, что значительно удорожает эти энергетические системы.

Так, например, ежедневные и сезонные колебания солнечного излучения приводят к коэффициенту использования солнечных устройств примерно на 19%, в то время как колебания этого коэффициента для обычных ветряных турбин составляют около 37% [19–21].

Любые энергетические установки оказывают сильное воздействие на окружающую среду, что вынуждает страны и даже регионы рассматривать ввод новых энергетических предприятий при обязательной их экологической оценке, и это касается также возможных их модернизаций. Энергетические предприятия воздействуют на окружающую среду посредством изменения климата, возникновения кислотных дождей, смога и уменьшения озонового слоя. Среди этих факторов важнейшим является изменение климата, которое как в ближайшей, так и в отдаленной перспективе пагубно воздействует на биосферу нашей планеты, что, несомненно, волнует общественность всех стран.

 Таблица 1

 Выработка энергии и связанных с ней выбросов двуокиси углерода в атмосферу

Ежегодный объем		Годы					
		1990	2000	2010	2020	2030	
Ежегодная выработка энергии (Гтнэ/год)							
Уголь	1,6	2	2	2,6	2,9		
Нефть	3	3,1	3,5	3,9	5,1		
Природный газ	1,4	1,8	2	3,3	6,1		
Атомная энергетика	0,1	0,2	0,5	1,3	1,7		
Гидроэнергетика	0,03	0,04	0,06	0,06	0,06		
Отходы и возобновляемые горючие источники	0,7	1	1,1	1,2	1,7		
Выброс двуокиси углерода (Гтн/год) по группам стран							
Страны, входящие в Организацию экономического сотрудничества и развития (ОЭСР)	10,9	11	11,8	12,6	14,5	14,4	
Развивающиеся страны	3,5	5	7,3	12	15,6	20,9	
Страны с переходной экономикой	3,6	3,5	2,4	2,6	2,7	2,8	
Выброс двуокиси углерода (Гтн/год) по виду топлива							
Уголь	5,7	7,2	6,5	10,7	14,1		
Нефть	7,8	8,1	10	11,1	12,2		
Природный газ	3,5	4,2	5	5,4	7,6		

Если говорить об основных факторах, вызывающих изменение климата, то это в первую очередь выбросы парниковых газов в результате деятельности человека. Именно поэтому человечество должно усиленно заняться проблемой уменьшения выбросов парниковых газов в окружающую среду или в конце концов адаптироваться к этим изменениям, что маловероятно. Преобладающая доля парниковых газов — это двуокись углерода, выделяющаяся в результате сжигания ископаемых видов топлива. И это надо учитывать, так как большая часть энергопотребления человечества опирается на ископаемые носители энергии.

Таблица подтверждает данный факт. В ней показаны общие объемы вырабатываемой человечеством энергии в прошлые годы и в перспективе. Также показаны выбросы двуокиси углерода в разбивке по группам стран и по видам топлива, также за прошлые годы и экстраполяция до 2030 г. Объемы вырабатываемой энергии даны в гигатоннах нефтяного эквивалента в год (Гтнэ/год), объемы выбросов двуокиси углерода – в гигатоннах в год (Гтн/год) [3].

Водород как эффективный носитель энергии

Если рассматривать водород в качестве носителя энергии, то эффективность такого носителя несомненна. Технологии хранения

и перевозки водорода хорошо отработаны. Водород достаточно просто преобразовать в другой вид носителя энергии — например, электричество в топливных элементах. С точки зрения экологической безопасности водород практически непревзойденный источник энергии. Водород чаще всего получают из воды, и его окисление также приводит к получению воды. То есть никаких вредных выбросов в атмосферу нет.

Эффективность водорода при использовании его в качестве химического топлива, подменяющего ископаемые виды топлива, определяется многими причинами. Но, несомненно, основной причиной является то, что водород является как бы дополнением самого распространенного носителя энергии — электричества [22–24]. Оба носителя энергии высокоэффективны, переносимы, и есть области, где один из них нельзя использовать, по крайней мере при современном развитии технологий, тогда используется другой носитель.

Естественно, что водород в качестве энергоносителя имеет свои преимущества и недостатки, которые определяются свойствами и характеристиками водорода. К преимуществам водорода в качестве энергоносителя относятся следующие факторы [25–27]:

1. Производство. В качестве сырья для получения водорода можно использо-

вать углеводороды. Однако, что особенно важно, для этих целей можно использовать и неуглеводородные источники энергии. И таким источником является одно из наиболее распространенных на нашей планете соединений – вода.

- 2. Использование. Во многих отраслях промышленности водород можно использовать либо как химическое топливо, либо в качестве сырья. Так, например, водород широко используется при очистке металлических руд, при обработке тяжелых масел и смолосодержащих веществ, на транспорте в топливных элементах [28] и др.
- 3. Хранение. Преимуществом водорода в качестве энергоносителя является то, что водород можно хранить в произвольных объемах и формах, причем форма хранения определяется только возможным дальнейшим способом использования водорода.
- 4. Транспортабельность. Для транспортировки водорода можно использовать, по сути, любой вид современного транспорта - морской, автомобильный, железнодорожный. И самое важное, водород можно транспортировать по трубопроводам, причем для этого можно использовать существующие трубопроводные для природного газа. При транспортировке водорода по трубопроводам потери энергии значительно меньше, чем при передаче электрической энергии по высоковольтным линиям. Таким образом, энергия неуглеводородных источников энергии. расположенных на больших расстояниях от потребителей энергии, может быть использована для получения водорода и затем легко транспортирована.
- 5. Безопасность для окружающей среды. Использование водорода в качестве энергоносителя предполагает его окисление, а результатом этого процесса может быть в основном только вода. Правда, при сгорании водорода в атмосфере происходит образование небольшого количества оксида азота, но выход данного продукта можно уменьшить практически до нуля, используя специальные конструкции двигателя [29].

Другие этапы водородного цикла, такие как этап получения, воздействуют на окружающую среду подобно похожим циклам любых других энергетических технологий и сильно зависят от методики получения водорода и от исходного сырья.

6. Возможность вторичной переработки конечного продукта. При использовании водорода в качестве энергоносителя конечным продуктом в основном является вода, которую можно повторно использовать для получения водорода.

Обладая многими положительными свойствами, водород, тем не менее, имеет некоторые отрицательные характеристики:

- 1. При хранении водорода плотность упаковки его в хранилищах значительно уступает плотности упаковки бензина, причем это касается как объемной плотности, так и массовой плотности, т.е. это в конце концов сказывается на количестве энергии, содержащейся в одном и том же объеме хранилища. Наибольшей массовой плотностью хранения обладает жидкий водород, для которого плотность упаковки достигает значений 85% от плотности упаковки бензина в хранилищах. С точки зрения объемной плотности упаковки водорода в хранилищах ситуация еще хуже – наибольшая плотность достигается при хранении водорода в виде гидридов металла. Здесь плотность упаковки достигает значений порядка 30-40% от плотности упаковки бензина. То есть и объемная, и массовая плотность упаковки водорода в хранилищах значительно ниже требуемых, что особенно важно при использовании водорода в качестве топлива в автомобилях.
- 2. Водород обладает высокой текучестью из-за малых размеров молекул, что приводит к проблемам при создании защитных оболочек.
- 3. Водород может активно взаимодействовать с некоторыми материалами, что приводит к изменению их свойств. Так, например, некоторые сплавы становятся более хрупкими при взаимодействии с водородом [30].
- 4. Фактор, который удерживает широкое распространение водорода в качестве энергоносителя высокая стоимость его производства, особенно по сравнению со стоимостью ископаемого топлива в настоящее время.

Тем не менее развитие современных технологий позволяет преодолеть многие негативные характеристики водорода.

Важнейшим моментом при использовании водорода в качестве энергоносителя является проблема безопасного использования водорода. Хорошо известны его высокая горючесть, взрывоопасность его смеси с кислородом. Страх перед этими свойствами водорода также является фактором, задерживающим развитие водородной энергетики. Водород, как и любое топливо, обладает опасными свойствами, но страхи людей перед водородом часто возникают в основном из страха перед неизвестным. Помимо опасных свойств у водорода есть и безопасные. Результаты многих исследований последствий использования водорода для безопасности показывают, что опасность водорода ничем не выше опасности бензина, природного газа или любого другого топлива, а просто у водорода есть свои особенности, которые всегда необходимо учитывать. Если принять во внимание температуру пламени, энергию взрыва и излучательную способность водорода, можно сделать вывод, что он безопаснее метана и бензина. Если же учесть нетоксичность водорода, его способность быстро рассеиваться в окружающей среде, то здесь преимущества водорода перед другими видами топлива несомненны. Водорода в атмосфере очень мало, поэтому водород быстро рассеивается в окружающей среде, что значительно снижает риски возгорания и взрыва. И, наконец, существует огромный опыт работы с водородом, который показывает, что с ним можно работать и что при соблюдении техники безопасности водород вполне безопасен.

Из сказанного выше следует, что за водородной энергетикой несомненное будущее, водород в качестве энергоносителя невероятно перспективен. Развитие энергетики в настоящем и в экстраполяции на будущее — это три основных этапа: первый этап — это современность, энергетика, опирающаяся на ископаемое топливо и электричество; второй этап — этап перехода от ископаемого топлива в качестве энергоносителя к водороду; третий этап предполагаемое использование только двух типов энергоносителей — водорода и электричества, полностью исключая ископаемое топливо.

На переходном этапе, скорее всего, будет происходить радикальное замещение химических энергоносителей, т.е. углеводороды – легкие, такие как нефть и природный газ, и тяжелые, такие как уголь, горючие сланцы, пески и битум, - будут, вероятно, замещены водородом. Важной особенностью переходного этапа развития энергетики [31] является всемерная интеграция как источников энергии, так и носителей энергии. Если посмотреть на период широкого использования ископаемого топлива, то, например, природный газ использовался в основном как источник тепловой энергии, в настоящий момент, который можно назвать переходным периодом, тот же природный газ используется, помимо получения тепловой энергии, для выработки водорода, метанола, электричества и др. С другой стороны, подобная интеграция просто приводит к задержке использования ископаемого топлива, что, тем не менее, должно рано или поздно отменить использование ископаемого топлива в качестве источника энергии, так как влияние этого вида топлива на окружающую среду становится все более значительным.

К интеграции можно без сомнений отнести использование водорода, полученного из веществ, не содержащих углеводороды, для целей нефтепереработки. Современные технологии позволяют обогащать тяжелые нефтепродукты водородом, с целью получения более легких, имеющих товарный спрос, жидких углеводородных носителей энергии. Это достигается за счет добавки в тяжелые углеводороды водорода, а не удаления из них углерода, как это происходит в обычных технологиях. Яркий пример интеграции - это использование электрической энергии, вырабатываемой на атомных электростанциях, для получения водорода, которым обогащают тяжелые фракции нефти до товарной смеси жидкого топлива.

Когда ископаемое топливо станет слишком дорогим под давлением как экономических факторов, так и факторов экологического характера, водород займет ведущее место среди энергоносителей в глобальной мировой энергетике. Очень возможно, что на это также повлияет появление новых революционных технологий получения водорода из возобновляемых источников энергии с использованием недорогих экологически чистых процессов. Скорее всего, мы сейчас находимся на этапе перехода, после которого наступит эра водородной энергетики. Водород будет использоваться в качестве энергоносителя таким образом, чтобы использовать его уникальные свойства, и будет создана инфраструктура, необходимая для поддержки эпохи водородной энергетики. В первую очередь это касается использования водорода в экологичных топливных элементах, которые найдут широкое применение, заменив экологически вредные двигатели на ископаемом топливе и химические элементы.

Технологии и энергетика на основе водорода

Водородная энергетика — это сложный комплекс, состоящий из технологий производства, использования, хранения и распределения водорода. Многое из этого комплекса до сих пор не отработано и потому требует дальнейших исследований.

Если рассматривать текущий период развития мировой энергетики, то можно заметить, что использование водорода в качестве энергоносителя пренебрежительно мало. Это связано с тем, что пока мировые запасы ископаемого топлива достаточно велики. Скорее, он в основном производится для удовлетворения промышленных неэнергетических потребностей во всем мире, особенно в развитых странах.

В настоящее время водород в основном используется в процессах переработки нефти (гидрокрекинг тяжелых остаточных фракций нефти с получением высококачественных бензинов, и др.), при производстве продуктов химической переработки нефти (альфа-спирты и др.) и производстве химикатов (аммиак и др.).

В небольших количествах водород используется при производстве лекарств, полупроводниковых материалов и др. В табл. 2 более подробно показано как используется водород в современных условиях в масштабах мирового производства. Таблица составлена в виде процентных долей по типам использования водорода в производстве [7].

Таблица 2 Использование водорода в мировом производстве

Вид использования водорода	Доля продукции в %
Производство аммиака	58
Переработка нефти	25
Производство метанола	10
Другое использование водорода	7

Если проследить историю использования водорода современным промышленным производством, то это использование ограничено несколькими последними десятилетиями, причем пропорции по виду использования практически совпадают с данными, представленными в табл. 2.

Однако в современном переходном периоде в использовании водорода важно то, что наряду с использованием водорода в виде химического сырья он все шире используется в качестве химического топлива, например, в топливных элементах и др. Все это приведет к тому, что водород найдет широкое применение на транспорте, коммерческом и жилом секторах, а также в промышленности

Эксперты предполагают [32], что даже сейчас, при широчайшем использовании ископаемого топлива, водород, тем не менее, найдет широкое использование следующим образом: ожидают, что помимо перечисленных применений водорода в эпоху ископаемого топлива водород также будет применяться:

1) в топливных элементах [33], где прямое соединение водорода с кислородом позволит получать электроэнергию, а выбросы будут представлять собой обычную воду;

- 2) в разбавлении природного газа, причем это можно осуществлять непосредственно в уже существующих газораспределительных сетях [34];
- 3) как базовое сырье для производства синтетического топлива, такого как метан и аммиак [35];
- 4) как топливо для транспортных средств любого вида, включая городской транспорт, использующих водородные топливные элементы либо их комбинацию с двигателями внутреннего сгорания [36].

Из сказанного видно, что, скорее всего, водород уже в ближайшие десятилетия получит широкое применение в качестве эффективного химического энергоносителя. Использование водорода в качестве химического энергоносителя найдет наиболее широкое применение в области транспорта. Все это требует создания специальной широкомасштабной инфраструктуры по использованию водорода. Кроме того, такое использование требует обширных исследований, направленных на разработку физико-химических методов хранения водорода высокой объемной и весовой плотностей для использования его в качестве автомобильного топлива.

Водород в автомобильном транспорте

Современный транспорт, использующий в качестве топлива ископаемые виды энергоносителя, является основным источником выбросов в атмосферу парниковых газов — до 69% всех выбросов. Поэтому использование водорода в качестве топлива на транспорте, несомненно, значительно снизит выбросы углекислого газа в атмосферу. В настоящий момент основным препятствием на пути широкого использования водорода на транспорте является проблема его хранения, так как объем и вес являются важнейшими факторами для использования водорода на транспорте.

На сегодняшний день существуют два наиболее приемлемых предложения по использованию водорода на транспорте — водородные топливные элементы и двигатели внутреннего сгорания на водороде.

Использование электрических автомобилей на базе водородных топливных элементов выглядит наиболее перспективным на ближайшее будущее, так как выбросы вредных веществ в окружающую среду в этом случае минимальны. Запас хода таких электромобилей достигает 450–550 км на одной заправке водородом при условии, что давление в баке с водородом не менее 750 атм [37]. Высокая эффективность водородных топливных элементов делает возможным их использование для легковых автомобилей [38]. На всем пути использования водорода можно довести выбросы углекислого газа в атмосферу практически до нуля, если использовать при производстве водорода либо сырье с низким или даже нулевым содержанием углекислого газа, либо поставить устройства, которые улавливают и хранят образующийся углекислый газ. Для увеличения срока службы подобных топливных батарей, а также для оптимизации работы батарей при торможении и ускорении используют гибридные схемы, в которых представлены аккумуляторные батареи или конденсаторы с топливным элементом [39].

На текущий момент фактором, сдерживающим широкое использование подобных схем на транспорте, является ограниченность поставок материалов, удовлетворяющих вышеуказанным условиям [40].

Водород также может использоваться в двигателях внутреннего сгорания, конструкция которых аналогична традиционным двигателям внутреннего сгорания. Развитая промышленность и обширная производственная инфраструктура, доступная для двигателей внутреннего сгорания, делают водородные двигатели внутреннего сгорания экономически привлекательными. Важной особенностью является то, что, в отличие от автомобилей на топливных элементах, эти транспортные средства не зависят от материалов, которые могут ограничить их крупномасштабное производство [41]. Единственным отличием этих двигателей от традиционных двигателей, использующих в качестве топлива бензин, является наличие электронного блока, регулирующего давление в системе впрыска и водородной камере сгорания. Однако данные двигатели выбрасывают в атмосферу вместо углекислого газа смеси азота, что также нежелательно [41].

Широкое использование водорода на различных видах транспорта потребует создания новой, специализированной инфраструктуры распределения и заправки водородом с достаточным территориальным охватом для пользователей, во многом отличающейся от структуры, использующей ископаемое топливо. Такая структура будет состоять из обширной сети станций заправки водородом, причем мощности и плотности хранения водорода на них должны соответствовать ЭТИМ характеристикам на транспортных средствах. Несомненно, что такая инфраструктура потребует больших финансовых затрат, что сопряжено с высокими инвестиционными рисками, так не вполне ясно, каков будет спрос на водород в ближайшем будущем.

В предлагаемой сети станций заправки водородом получать водород можно непосредственно на станциях, но можно и на специальных предприятиях, после чего подвозить его на станции и хранить его там до момента заправки транспортных устройств.

В ближайшие десятилетия, скорее всего, за ископаемыми видами топлива на основе нефти, которые используются на транспорте, останется ведущая роль, что связано с простотой обращения с этим видом топлива, несложностью его хранения, высокой объемной плотностью, что очень важно при использовании его на транспорте. Наконец, для этого вида топлива создана широко разветвленная сеть доставки, распределения и хранения [26]. Так как сеть заправочных станций для водорода пока не создана в достаточных масштабах, ближайшее будущее скорее всего за автомобилями с гибридными двигателями внутреннего сгорания, способными работать как на водороде, так и на ископаемом топливе. Такие автомобили обладают гибкостью, так как способны легко переходить на топливо на основе нефти в случае, если водородные заправочные станции недоступны [39].

Заключение

Использование водорода в качестве топлива на данном этапе является нерентабельным из-за больших финансовых затрат на его производство и хранение, но с развитием современных технологий в перспективе может заменить традиционное ископаемое топливо в качестве энергоносителя.

Список литературы

- 1. Dimitrakakis G.K., Tylianakis E., Froudakis G.E. Pillared graphene: a new 3-D network nanostructure for enhanced hydrogen storage. NanoLett. 2018. No. 8. P. 3166–3170.
- 2. Ball M., Wietschel M. The future of hydrogen opportunities and challenges. Int. J. Hydrogen Energy. 2013. Vol. 34. No. 2. P. 615e27.
- 3. Midilli A., Dincer I., Ay M. Green energy strategies for sustainable development. Energy Policy. 2016. Vol. 32. No.18. P. 3623e33.
- 4. Midilli A., Dincer I. Key strategies of hydrogen energy systems for sustainability. Int. J. Hydrogen Energy. 2017. Vol. 33. No. 5. P. 511e24.
- 5. Midilli A., Dincer I. Hydrogen as a renewable and sustainable solution in reducing global fossil fuel consumption. Int. J. Hydrogen Energy. 2018. Vol. 34. No. 16. P. 4209e22.
- 6. Sherif S., Barbir F., Veziroglu T. Towards a hydrogen economy. Electr. J. 2015. Vol. 18. No. 6. P. 62e76.
- 7. Sperling D., Cannon J.S. The hydrogen energy transition, moving toward the post petroleum age in transportation. Elsevier Academic Press. 2013. Vol. 33. No. 1. P. 302.
- 8. Simader G.R., Kordesch K.V. Fuel cells and their applications. Int. J. Hydrogen Energy 2012. Vol. 34. No. 10. P.1e375.
- 9. Thomas C.E., Reardon J.P., Lomax Jr. F.D., Pinyan J., Kuhn Jr. I.F. Distributed hydrogen fueling systems analysis.

- Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review NREL/CP-570-30535, Arlington, Virginia. 2012. P. 1e83.
- 10. Raissi A.T., Block D. Hydrogen: automotive fuel of the future. Power Energy Mag IEEE. 2014. Vol. 2. No. 6. P. 40e5.
- 11. Momirlan M., Veziroglu T. Current status of hydrogen energy. Renew Sustain. Energy Rev. 2012. Vol. 6. No.1e2. P.141e79.
- 12. Momirlan M., Veziroglu T. The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet. Int. J. Hydrogen Energy. 2015. Vol. 30. No. 7. P. 795e802.
- 13. Mulder G., Hetland J., Lenaers G. Towards a sustainable hydrogen economy: hydrogen pathways and infrastructure. Int. J. Hydrogen Energy. 2014. Vol. 32. No. 10e11. P. 1324e31.
- 14. Agnolucci P. Hydrogen infrastructure for the transport sector. Int. J. Hydrogen Energy. 2014. Vol. 32. No. 15. P. 3526e44.
- 15. Wietschel M., Hasenauer U., de Groot A. Development of European hydrogen infrastructure scenarios. CO2 reduction potential and infrastructure investment. Energy Policy. 2016. Vol. 34. No. 11. P. 1284e98.
- 16. Smit R., Weeda M., de Groot A. Hydrogen infrastructure development in The Netherlands. Int. J. Hydrogen Energy. 2015. Vol. 32. No. 10e11. P. 1387e95.
- 17. Ogden J.M. Developing an infrastructure for hydrogen vehicles: a Southern California case study. Int. J. Hydrogen Energy. 2012. Vol. 24. No. 8. P.709e30.
- 18. Turner J.A. Sustainable hydrogen production. Science. 2014. Vol. 305. No. 5686. P. 972e4.
- Исманов Ю.Х., Джаманкызов Н.К., Тынышова Т.Д., Алымкулов С.А. Восстановление бесщелевой радужной голограммы когерентной волной: материалы VII Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2018. С. 596–597.
- 20. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д., Алымкулов С.А. Использование приближения Френеля для расчета распределения светового поля, прошедшего сквозь решетку // Вестник КГУСТА. 2017. № 3 (57). С. 171–178.
- 21. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д., Абдулаев А.А. Моделирование оптической системы, работающей при некогерентном освещении // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 3. С. 98–102.
- 22. Исманов Ю.Х., Исмаилов Д.А., Жумалиев К.М., Алымкулов С.А. Эффект саморепродуцирования в голографии: материалы VI Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. С. 646–647.
- 23. Barbir F. PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. Sol. Energy. 2005. Vol. 78. No. 5. P. 661e9.
- 24. Ghenciu A.F. Review of fuel processing catalysts for hydrogen production in PEM fuel cell systems. Curr. Opin. Solid State Mater. Sci. 2002. Vol. 6. No. 5. P. 389e99.

- 25. Grigorev S., Porembsky V., Fateev V. Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy. Int. J. Hydrogen Energy. 2006. Vol. 1. No. 2. P. 171e5.
- 26. Marshall A., Borresen B., Hagen G., Tsypkin M., Tunold R. Hydrogen production by advanced proton exchange membrane (PEM) water electrolysers. Reduced energy consumption by improved electrocatalysis. Energy. 2007. Vol. 2. No. 4. P. 431e6.
- 27. Kalinci Y., Hepbasli A., Dincer I. Biomass-based hydrogen production: a review and analysis. Int. J. Hydrogen. Energy. 2009. Vol. 34. No. 21. P. 8799e817.
- 28. Lindstrom B., Pettersson L.J. Hydrogen generation by steam reforming of methanol over copper-based catalysts for fuel cell applications. Int. J. Hydrogen Energy. 2001. Vol. 26. No. 9. P. 923e33.
- 29. Lindstrom B., Agrell J., Pettersson L. Combined methanol reforming for hydrogen generation over monolithic catalysts. Chem. Eng. J. 2003. Vol. 93. No. 1. P. 91e101.
- 30. Czernik S., French R., Feik C., Chornet E. Hydrogen by catalytic steam reforming of liquid byproducts from biomass thermoconversion processes. Ind. Eng. Chem. Res. 2002. Vol. 41. No. 17. P. 4209e15.
- 31. Maripov A., Ismanov Y. Interferometer based on the Talbot effect in holography. J. Optics (Paris). 1995. Vol. 26. No. 1. P. 25–28.
- 32. Исманов Ю.Х. Голографический эффект Тальбота в интерферометрии // Вестник КРСУ. 2015. Т. 15. № 5. С. 104–106.
- 33. Исманов Ю.Х. Восстановление изображения волнами различной длины // Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики. 2015. № 4. С. 30–33.
- 34. Исманов Ю.Х., Жумалиев К.М., Алымкулов С.А. Особенности голограмм регулярных объектов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 4. С. 73–77.
- 35. Shoko E., McLellan B., Dicks A., da Costa J.D. Hydrogen from coal: production and utilisation technologies. Int. J. Coal Geol. 2016. Vol. 65. No. 3e 4. P. 213e22.
- 36. Stiegel G.J., Ramezan M. Hydrogen from coal gasification: an economical pathway to a sustainable energy future. Int. J. Coal Geol. 2016. Vol. 65. No. 3e4. P. 173e90.
- 37. Clemens T., Gong D, Pearce S. Study on the suitability of New Zealand coals for hydrogen production. Int. J. Coal Geol. 2016. Vol. 65. No. 3 e 4. P.235e42.
- 38. Neef H.J. International overview of hydrogen and fuel cell research. Energy. 2012. Vol. 34. No. 3. P. 327e33.
- 39. Balat M. Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems. Int. J. Hydrogen Energy. 2012. Vol. 33. No. 15. P. 4013e29.
- 40. Fatsikostas A.N., Kondarides D., Verykios X.E. Production of hydrogen for fuel cells by reformation of biomass-derived ethanol. Catal. Today. 2012. Vol. 75. No. 1e4. P.145e55.
- 41. Miceli R. Energy management and smart grids. Energies. 2013. Vol. 6. No. 4. P. 2262e90.

СТАТЬЯ

УДК 532.3:532.5:517.928.7

ДВИЖЕНИЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ НЕМОНОПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Сенницкий В.Л.

ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск; ФГАОУ ВО «Новосибирский государственный университет», Новосибирск, e-mail: sennitskii@yandex.ru

Выполненные ранее исследования динамики гидромеханических систем при периодических по времени (колебательных, вибрационных) воздействиях позволили получить ряд новых нетривиальных результатов. В частности, теоретически и экспериментально установлено существование явления преимущественно однонаправленного движения сжимаемых включений в колеблющейся жидкости (В.Л. Сенницкий, 1988, 1991, 1993, 2001). Найдено, что вибрационные воздействия могут приводить к гидромеханическому эффекту – аналогу «маятника Капицы» (П.Л. Капица, 1951), состоящему в том, что в присутствии поля силы тяжести находящееся в жидкости твердое тело совершает «перевернутые» колебания (В.Л. Сенницкий, 2009). Обнаружен эффект «левитации» жидкости (В.Л. Сенницкий, 2021, 2022). В рассматривавшихся до настоящего времени задачах все составляющие периодических воздействий на гидромеханическую систему имели один и тот же период, воздействия были монопериодическими. В данной работе поставлена и решена задача, в которой воздействия на систему характеризуются наличием более одного периода, воздействия являются немонопериодическими. В идеальной несжимаемой не ограниченной извне жидкости находится твердое включение (шар). Скорость жидкости на бесконечности и радиус включения периодически (с одним и тем же периодом или с различными периодами) изменяются со временем. Гидромеханическая система совершает движение, подлежащее определению. Принципиально важным является то, что оказываемые на систему воздействия, происходящие в системе заданные периодические изменения (колебания скорости жидкости вдали от включения, пульсации включения) не имеют выделенного направления в пространстве. Установлено, в частности, что при монопериодических воздействиях включение (центр включения) на фоне колебаний совершает однонаправленное движение; при немонопериодических воздействиях с близкими периодами включение (центр включения) на фоне «быстрых» колебаний совершает «медленные» колебания вдоль прямой линии с периодом, обратно пропорциональным разности периодов колебаний скорости жидкости на бесконечности и радиуса включения.

Ключевые слова: жидкость, включение, отсутствие выделенного направления в пространстве, монопериодические и немонопериодические воздействия, однонаправленное движение, медленные колебания

MOTION OF A HYDROMECHANICAL SYSTEM UNDER NON-MONO-PERIODIC INFLUENCES

Sennitskiy V.L.

Lavrentiev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk; Novosibursk State University, Novosibirsk, e-mail: sennitskii@yandex.ru

The fulfilled earlier investigations of the dynamics of hydro-mechanical systems under periodic in time (oscillatory, vibratory) influences allowed to obtain a series of new, non-trivial results. In particular it was revealed theoretically and experimentally the existence of the phenomenon of the predominantly unidirectional motion of compressible inclusions in an oscillating liquid (V.L. Sennitskiy, 1988, 1991, 1993, 2001). It was found out that oscillatory influences were able to generate the hydro-mechanical effect - an analog of "the pendulum of Kapitsa" (P.L. Kapitsa, 1951), which consists in that under the presence of a gravity field a solid body being in a liquid performs "turned upside-down" oscillations (V.L. Sennitskiy, 2009). The effect of "levitation" of a liquid was discovered (V.L. Sennitskiy, 2021, 2022). In the problems which were under consideration before the present time all components of periodic influences to a hydro-mechanical system had a same period, the influences were mono-periodic. The problem is formulated and solved in this work in which the influences to the system are characterized by the presence of more than one period, the influences are non-mono-periodic. There is a solid inclusion (a ball) in an ideal incompressible unbounded from outside liquid. The liquid velocity at infinity and the radius of the inclusion change in time periodically (with a same period or with different periods). The hydromechanical system fulfils a motion which has to be determined. It is of principle importance that the influences to the system, the prescribed periodic changes in the system (the oscillations of the liquid velocity far from the inclusion, the pulsations of the inclusion) have no predominant direction in space. It is found out in particular that for mono-periodic influences the inclusion (the inclusion center) under a background of oscillations fulfils a unidirectional motion; for non-mono-periodic influences with close periods the inclusion (the inclusion center) under a background of "fast" oscillations fulfils "slow" oscillations along a straight line with the period which is inversely proportional to the difference of the periods of the oscillations of the liquid velocity at infinity and the

Keywords: liquid, inclusion, absence of a predominant direction in space, mono-periodic and non-mono-periodic influences, unidirectional motion, slow oscillations

Состояние современной гидромеханики в значительной мере характеризуется работами, нашедшими отражение в изданиях [1-3]. Часть данной научной области составлена исследованиями динамики гидромеханических систем при периодических по времени (колебательных, вибрационных) воздействиях, не имеющих выделенного направления в пространстве [4, 5]. В настоящей работе рассматривается новая задача о движении гидромеханической системы при воздействиях, не имеющих выделенного направления в пространстве. Система состоит из идеальной несжимаемой не ограниченной извне жидкости и находящегося в ней твердого тела Е (включения, шара) радиуса А. В начальный момент времени t, при t = 0 жидкость и тело Ξ покоятся относительно инерциальной прямоугольной системы координат X, Y, Z. В последующие моменты времени при t > 0 на гидромеханическую систему оказываются воздействия, наличие которых проявляется в том, что скорость жидкости на бесконечности $\mathbf{V}_{\infty} = \{ V_{\infty}, 0, 0 \}$ и радиус включения периодически соответственно с периодами Т и т изменяются со временем. Центр инерции включения совпадает с центром включения. Течение жидкости является потенциальным [6]. Периоды Т, т могут совпадать друг с другом или быть различными.

Целью работы является определение движения гидромеханической системы (жидкости и включения).

Постановка и решение задачи

Пусть S — радиус-вектор центра тела Ξ (центра инерции тела Ξ); Φ — потенциал скорости жидкости; m — масса тела Ξ ; ρ — плотность жидкости; Γ — граница тела Ξ (сфера радиуса A с центром в центре тела Ξ); n — единичный вектор внешней нормали к Γ ; P — давление в жидкости; I — функция t;

$$\mathbf{F} = \left\{ \mathbf{F}_{\mathbf{X}} , \ \mathbf{F}_{\mathbf{Y}} , \ \mathbf{F}_{\mathbf{Z}} \right\} = - \iint_{\Gamma} \mathbf{P} \ \mathbf{n} \ d\Gamma ,$$

- сила, действующая со стороны жидкости на тело Ξ .

Уравнение движения тела Ξ (центра инерции тела Ξ), уравнение неразрывности, интеграл Коши–Лагранжа, граничные и начальные условия имеют следующий вид:

$$m\frac{d^2\mathbf{S}}{dt^2} = \mathbf{F} ; (1)$$

$$\Delta\Phi = 0; \tag{2}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \Phi)^2 + \frac{P}{\rho} = I; \tag{3}$$

$$\mathbf{n} \cdot \nabla \Phi = \mathbf{n} \cdot \frac{d\mathbf{S}}{dt} + \frac{d\mathbf{A}}{dt} \text{ Ha } \Gamma;$$
 (4)

$$\nabla \Phi \rightarrow V_{\infty}$$
 при $X^2 + Y^2 + Z^2 \rightarrow \infty$ (5)

$$\Phi = 0$$
, $S = 0$, $dS / dt = 0$ при $t = 0$ (6)

(функции $A = A(t), V_{\infty} = V_{\infty}(t)$ являются заданными; $A = \hat{A}, dA / dt = 0, V_{\infty} = 0$ при t = 0 ($\hat{A} > 0$ — постоянная)).

Предположим, что

$$\mathbf{S} = \mathbf{S} \mathbf{e}_{\mathbf{v}}$$
 для $\mathbf{t} > 0$ (7)

то есть при всех t>0 центр тела Ξ находится на оси X (S=0, dS / dt=0 при t=0). Отметим, что для выполнения (7) необходимо и достаточно, чтобы были удовлетворены условия

$$F_{Y} = 0, F_{Z} = 0$$
 для $t > 0.$ (8)

Зафиксируем (произвольный) момент времени t>0. Введем в рассмотрение прямоугольную систему координат X_1 , X_2 , X_3 , неподвижную относительно системы X, Y, Z, такую что начало координат X_1 , X_2 , X_3 совпадает с центром тела Ξ , ось X_1 лежит на оси X, и направления осей X_2 , X_3 совпадают соответственно с направлениями осей Y, Z. Будем использовать сферические координаты X_1 , X_2 , X_3 соотношениями

$$X_1 = R \cos \theta$$
, $X_2 = R \sin \theta \cos \varphi$,
 $X_3 = R \sin \theta \sin \varphi$.

Преобразуем задачу (2), (4), (5) к виду

$$\frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial \Phi}{\partial R} \right) + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\left(\sin \theta \right)^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \phi^2} = 0; \tag{9}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial R} = \frac{dS}{dt} \cos \theta + \frac{dA}{dt} \quad \text{при } R = A; \tag{10}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial R} \to V_{_{\!\!\!\!\! \infty}} \cos \theta, \; \frac{1}{R} \; \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \to -V_{_{\!\!\!\! \infty}} \sin \theta, \qquad \frac{1}{R \sin \theta} \; \frac{\partial \Phi}{\partial \phi} \to 0 \quad \text{при } R \to \infty. \tag{11}$$

Задача (9)-(11) имеет решение

$$\Phi = \left[V_{\infty} + \frac{1}{2} \left(V_{\infty} - \frac{dS}{dt} \right) \frac{A^3}{R^3} \right] R \cos \theta - \frac{dA^3 / dt}{3R}.$$
(12)

Отметим, что согласно (3), (12)

$$\begin{split} F_{_{Y}} &= -A^2 \int\limits_{0}^{\pi} \int\limits_{0}^{2\pi} P_{_{|_{R=A}}} \left(\sin\theta\right)^2 & \cos\phi \; d\phi \; d\theta = 0, \\ F_{_{Z}} &= -A^2 \int\limits_{0}^{\pi} \int\limits_{0}^{2\pi} P_{_{|_{R=A}}} \left(\sin\theta\right)^2 & \sin\phi \; d\phi \; d\theta = 0, \end{split}$$

то есть условия (8) являются выполненными.

Используя (1), (3), (6), (12), получим

$$F_{X} = -2\pi A^{2} \int_{0}^{\pi} P_{|_{R=A}} \cos \theta \sin \theta \, d\theta = \frac{4\pi}{3} \left\{ A^{3} \frac{dV_{\infty}}{dt} + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \left[A^{3} \left(V_{\infty} - \frac{dS}{dt} \right) \right] \right\};$$

$$\frac{d}{dt} \left[\left(m + \frac{2\pi}{3} A^{3} \rho \right) \frac{dS}{dt} \right] = 2\pi \rho A^{2} \frac{d(AV_{\infty})}{dt};$$

$$S = \frac{2\pi}{3} \rho \int_{0}^{t} \left(3A^{3}V_{\infty} - 2 \int_{0}^{t'} \frac{dA^{3}}{dt''} V_{\infty} dt'' \right) \frac{dt'}{m + \frac{2\pi}{3} A^{3} \rho} .$$
(13)

Формулами (3), (12), (13) определяется точное решение задачи (1)–(6). Пусть

$$A = \hat{A} \left[1 + \varepsilon \left(1 - \cos \frac{2\pi t}{\tau} \right) \right], \quad V_{\infty} = \hat{V} \sin \frac{2\pi t}{T}$$
 (14)

 $(\varepsilon \ge 0$ – параметр; $\hat{\mathbf{V}}$ – постоянная).

Отметим, что согласно (14)

$$\frac{dA^{3}}{dt}V_{\infty} = 3\pi\varepsilon \frac{\hat{A}^{3}\hat{V}}{\tau} \left\{ \left(1 + 2\varepsilon + \frac{3}{2}\varepsilon^{2} \right) \left[\cos \frac{2\pi(T - \tau)t}{T\tau} - \cos \frac{2\pi(T + \tau)t}{T\tau} \right] - \varepsilon \left(1 + \varepsilon \right) \left[\cos \frac{2\pi(2T - \tau)t}{T\tau} - \cos \frac{2\pi(2T + \tau)t}{T\tau} \right] - \varepsilon \left(1 + \varepsilon \right) \left[\cos \frac{2\pi(2T - \tau)t}{T\tau} - \cos \frac{2\pi(2T + \tau)t}{T\tau} \right] \right\} \right\}$$
(14)

$$-\frac{\epsilon^2}{4} \left[\cos \frac{2\pi (T-\tau)t}{T\tau} - \cos \frac{2\pi (3T-\tau)t}{T\tau} - \cos \frac{2\pi (T+\tau)t}{T\tau} - \cos \frac{2\pi (3T+\tau)t}{T\tau} \right] \right\}.$$

Остановимся на вопросе о движении тела Ξ (центра тела Ξ) при малых по сравнению с единицей значениях ε .

Пусть

$$\tau = T. \tag{15}$$

Используя (12)–(15), получим

$$\frac{dS}{dt} \sim U_1 = \frac{3}{\lambda + 1} \hat{V} \left\{ \sin \frac{2\pi t}{T} - \epsilon \left[\frac{2\pi t}{T} - \frac{3\lambda}{\lambda + 1} \sin \frac{2\pi t}{T} + \frac{2\lambda - 1}{2(\lambda + 1)} \sin \frac{4\pi t}{T} \right] \right\}, \text{ при } \epsilon \to 0, \quad (16)$$

где

$$\lambda = \frac{m}{(2\pi/3)\hat{A}^3\rho} .$$

Согласно (16) тело Ξ на фоне колебаний совершает однонаправленное движение со скоростью

$$\overline{\mathbf{U}}_{1} = -\frac{6\pi\varepsilon}{\lambda + 1} \hat{\mathbf{V}} \frac{\mathbf{t}}{\mathbf{T}} \mathbf{e}_{\mathbf{X}}.$$
 (17)

Пусть

$$\tau \neq T$$
. (18)

Подчиним периоды т, Т условию

$$\frac{\left|\tau - T\right|}{T} < 1 - \alpha , \qquad (19)$$

где $0 < \alpha < 1$ – постоянная.

Используя (13), (14), (18), (19), получим

монопериодические воздействия на гидромеханическую систему, не имеющие выделенного направления в пространстве, могут приводить к качественно различной динамике системы ((16), (17), (20)-(22)). В частности, в настоящей работе найдено, что при монопериодических воздействиях включение в жидкости на фоне колебаний совершает однонаправленное движение; при немонопериодических воздействиях с близкими периодами включение в жидкости на фоне «быстрых» колебаний совершает «медленные» колебания вдоль прямой линии с периодом, обратно пропорциональным разности периодов, и амплитудой, обратно пропорциональной квадрату разности периодов происходящих в гидромеханической системе заданных периодических изменений – колебаний скорости жидкости на бесконечности и радиуса включения.

$$\frac{dS}{dt} \sim U_{2} = \frac{3}{\lambda + 1} \hat{V} \left\{ \sin \frac{2\pi t}{T} - \epsilon \left[\frac{T}{\tau - T} \sin \frac{2\pi (\tau - T)t}{\tau T} - \frac{T}{\tau + T} \sin \frac{2\pi (\tau + T)t}{\tau T} \right] - \frac{3\lambda}{2(\lambda + 1)} \left(2\sin \frac{2\pi t}{T} - \sin \frac{2\pi (\tau - T)t}{\tau T} - \sin \frac{2\pi (\tau + T)t}{\tau T} \right) \right] \right\}.$$
(20)

Согласно (20) тело Ξ совершает колебания. В частности, при периодах τ , T, близких друг к другу, тело Ξ на фоне «быстрых» колебаний совершает «медленные» колебания со скоростью

$$\overline{\mathbf{U}}_{2} = -\frac{3 \varepsilon}{\lambda + 1} \widehat{\mathbf{V}} \frac{\mathbf{T}}{\tau - \mathbf{T}} \sin \frac{2\pi (\tau - \mathbf{T}) t}{\tau \mathbf{T}} \mathbf{e}_{\mathbf{x}}.(21)$$

Амплитуда «медленных» колебаний тела Ξ (центра тела Ξ) составляет

$$\frac{3 \varepsilon}{2\pi(\lambda+1)} |\hat{V}| \frac{\tau T^2}{(\tau-T)^2}.$$
 (22)

Отметим, что согласно (16), (20) предел U_2 при стремлении к нулю τ – T равен U_1 .

Заключение

Проведенное рассмотрение позволило обнаружить, что монопериодические и не-

Список литературы

- 1. Международная конференция «Математика в приложениях». Тезисы докладов (Новосибирск, 4–10 августа 2019 г.). Новосибирск: Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, 2019. 312 с.
- 2. Международная конференция «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике» (Новосибирск, 7–11 сентября 2020 г.). Тезисы докладов. Новосибирск: Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 2020. 262 с.
- 3. Евразийская конференция по прикладной математике: сборник тезисов (Новосибирск, 16–22 декабря 2021 г.). Новосибирск: Математический центр в Академгородке, 2021. 88 с.
- 4. Сенницкий В.Л. Преимущественно однонаправленное течение вязкой жидкости // Сибирский журнал индустриальной математики. 2021. Т. 24. № 2. С. 126–133. DOI: 10.33048/SIBJIM.2021.24.210.
- 5. Сенницкий В.Л. Об особенностях течения жидкости в поле силы тяжести // Сибирские электронные математические известия. 2022. Т. 19. № 1. С. 241–247. DOI: 10.33048/semi 2022.19.018
- 6. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч. 1. М.: Физматгиз, 1963. 584 с.

СТАТЬЯ

УДК 553.61(575.2)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КАРБОНАТА КАЛИЯ ДЛЯ ВСКРЫТИЯ НЕФЕЛИНОВЫХ СИЕНИТОВ САНДЫКСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Шаршенбек кызы А., Кочкорова З.Б., Мурзубраимов Б.М.

Институт химии и фитотехнологии НАН КР, Бишкек, e-mail: ximichka90@gmail.com

Показаны результаты исследования по вскрытию нефелиновых сиенитов Сандыкского месторождения методом спекания с использованием карбоната калия и последующей обработкой спекшейся массы раствором азотной кислоты. Изучено влияние температуры (в интервале температур от 700 до 900 °C) и продолжительности процесса спекания (от 30 до 150 мин) на эффективность извлечения Al_2O_3 и Fe_2O_3 из нефелинового сиенита в раствор. Показано, что оптимальное спекание нефелиновых сиенитов Сандыкского месторождения с поташом происходит при температуре 850 °C в течение 1,5-2 ч. Выщелачивание спека нефелиновых сиенитов после водной обработки проведено азотнокислотным способом. Исследовано влияние концентрации азотной кислоты (от 20 до 50%), температуры выщелачивания (от 100 до 200 °C), времени перемешивания реакционной смеси (от 30 до 120 мин) и соотношения азотной кислоты к спекшейся массы нефелиновых сиенитов (от 1:1 до 3,2:1) на процесс выщелачивания твердого остатка спекшейся массы нефелиновых сиенитов после водной обработки. Найден оптимальный режим выщелачивания спекшейся массы нефелиновых сиенитов азотной кислотой: концентрация азотной кислоты 30–40%, температура выщелачивания 160 °C, время выщелачивания не менее 90 мин, соотношение азотной кислоты и спекшейся массы 2,5:1.

Ключевые слова: нефелиновые сиениты, спекание, спек, алюмосодержащее сырье, выщелачивание, глинозем

POSSIBILITY OF POTASSIUM CARBONATE APPLICATION FOR EXPOSURE NEPHELINE SYENITES OF THE SANDYNK DEPOSIT

Sharshenbek kyzy A., Kochkorova Z.B., Murzubraimov B.M.

Institute of Chemistry and Phytotechnology, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic,
Bishkek, e-mail: ximichka90@gmail.com

Studies on the exposure of nepheline syenites of the Sandyk deposit by sintering using potassium carbonate and subsequent treatment of the sintered mass with a solution of nitric acid have been carried out. The influence of temperature (ranged from 700 to 900°C) and sintering process duration (from 30 to 150 min) on the efficiency of Al_2O_3 and Fe_2O_3 extraction from nepheline syenite into solution was studied. It is shown that sintering of nepheline syenites of the Sandyk deposit with potash should be carried out at a temperature of 850°C for 1,5-2 hours. The leaching of the nepheline syenites sinter after water treatment was carried out by the nitric acid method. The influence of the nitric acid concentration (from 20 to 50%), the leaching temperature (from 100 to 200°C), the reaction mixture mixing time (from 30 to 120 min) was studied and the ratio of nitric acid and the sintered mass of nepheline syenites (from 1:1 to 3,2:1) to the leaching process of sintered mass solid residue of nepheline syenites after water treatment. The optimal condition for leaching of the sintered mass of nepheline syenites with nitric acid was found to be: the concentration of nitric acid is 30-40%, the temperature of leaching is not less than 90 minutes and the ratio of nitric acid and sintering mass is 2,5:1.

Keywords: nepheline syenites, sintering, sinter, aluminum-containing raw materials, leaching, alumina

В настоящее время внимание исследователей все больше привлекает проблема комплексной переработки высококремнистых алюмосодержащих пород (нефелинов, алунитов, глин, каолинов, минеральных углей и др.) для получения глинозема, коагулянтов, солей алюминия, удобрений, строительных материалов и др.

Материалы и методы исследования

Для переработки высококремнистых алюмосодержащих пород используются несколько способов: кислотный, кислотнощелочной и щелочной. К щелочным способам переработки алюмосодержащих пород относятся: гидрохимический (способ Байера), комбинированный способ — сочетание способа Байера со способом спекания, способ спекания [1].

Внимание ученых все больше обращено на возможность использования способа спекания для переработки высококремнистых алюмосодержащих пород, в частности нефелиновых сиенитов, являющихся комплексным сырьем многоцелевого назначения.

В публикациях [2, 3] авторами изложены результаты исследований по переработке высококремнистых алюмосодержащих пород высокотемпературным спеканием (1250–1300 °C) с известняком и последующим выщелачиванием спека щелочно-алюминатными растворами и получением алюмината натрия и нефелинового шлама.

С использованием кислотного и спекательного методов разработан способ переработки нефелин-полевошпатового сырья, позволяющего получать глинозем, поташ, соду и нитраты щелочных металлов [4]. Способом спекания можно вскрыть нефелиновые сиениты с применением кальцинированной соды, флюорита и угля. Авторами такого способа установлены оптимальные условия спекания (температура, продолжительность спекания и соотношение компонентов при спекании) для извлечения алюминия из предложенного сырья [5].

Авторами исследования [6] проведена переработка известняково-нефелиновой шихты по способу спекания с использованием гипсоангидритового техногенного сырья (ГАТС). Добавка ГАТС до 2% в нефелиновую шихту снижает температуру образования спека на 30–70 °C.

Рассмотрена возможность разложения нефелиновых сиенитов месторождения Турпа и борной руды месторождения Ак-Архар спеканием с хлоридом кальция. Установлены оптимальные параметры: температура 950 °C, время спекания 1 ч и массовое соотношение нефелинового сиенита и хлорида кальция 1:2 [7].

Предложен способ переработки нефелиновых сиенитов [8] спеканием с сульфатом натрия с целью получения солей алюминия. Оптимальный интервал температур спекания $-950{\text -}1000\,^{\circ}\text{C}$, при этом достигается максимальное извлечение полезных компонентов из руды.

Способы переработки высококремнистых нефелиновых сиенитов спеканием остаются на стадии лабораторных исследований. Кроме того, недостатки, связанные с высокими температурами, требуют больших затрат электроэнергии. Таким образом, в свете изложенного выше необходим поиск способов переработки нефелинсодержащих пород с экономией энергии и материалов.

Цель исследования – разработка способа вскрытия нефелиновых сиенитов Сандыкского месторождения Кыргызстана методом спекания с использованием карбоната калия и последующего разложения спекшейся массы раствором азотной кислоты.

Результаты исследования и их обсуждение

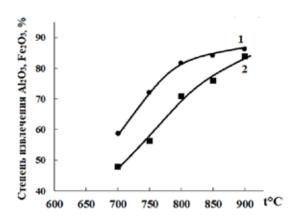
Нефелиновые сиениты Сандыкского месторождения находятся в Жумгальском районе Нарынской области. Запас породы составляет 203,4 млн т [9]. В составе нефелиновых сиенитов имеются нефелин, полевой шпат, минералы группы хлорита, мусковита, сандинина и примесные минералы гиббсит, гетит и др. [10, 11].

Химический состав исследуемых нефелиновых сиенитов Сандыкского месторождения приведен в ранее опубликованной нами работе, в мас.%: SiO, 56; Al,O, 19,65; Fe₂O₃ 2,53; TiO₂ 0,41; K₂O 11,24; Na₂O 2,17 [12].

Спекание нефелинового сиенита с карбонатом калия и выщелачивание спекшейся массы производили следующим образом: нефелиновый сиенит смешивали с карбонатом калия, полученная смесь подвергалась спеканию при заданной температуре и времени спекания в муфельной печи. Полученная спекшаяся масса после водной обработки выщелачивалась раствором азотной кислоты по методике, ранее опубликованной нами в [13]. В отфильтрованном растворе определяли содержание оксида алюминия и железа методом комплексонометрии [14].

Нами изучено влияние температуры спекания (700–900 °C) и продолжительности процесса спекания (30–150 мин) на степень извлечения Al_2O_3 и Fe_2O_3 из нефелиновых сиенитов. Выщелачивание образцов спеченной массы нефелиновых сиенитов проводили 30%-ной азотной кислотой при температуре 100 °C, продолжительности перемешивании в течение 60 мин и при соотношении азотной кислоты и спекшейся массы 2,5:1.

На рис. 1 показана зависимость степени извлечения Al_2O_3 и Fe_2O_3 от температуры спекания нефелиновых сиенитов.



Puc. 1. Зависимость степени извлечения $Al_2O_3(1)$ и $Fe_2O_3(2)$ от температуры спекания

Видно, чтоеслипритемпературеспекания 700 °C степень извлечения Al_2O_3 и Fe_2O_3 составляет 55,39 и 46,83 %, то при температуре 900 °C - 86,10 и 81,29 % соответственно. Следует отметить, что при температуре выше 850 °C происходит более значительное загрязнение азотнокислого раствора соединениями железа, что влечет за собой усложнение технологического процесса выделения глинозема.

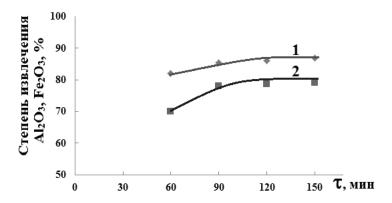


Рис. 2. Зависимость степени извлечения $Al_{2}O_{3}(1)$, $Fe_{2}O_{3}(2)$ от времени спекания

Из рис. 2 следует, что в изученном интервале времени спекания (от 600 до 150 мин) содержание Al_2O_3 и Fe_2O_3 в растворе постепенно увеличивается и при 90 мин спекания достигает максимального значения. При этом степень извлечения Al_2O_3 и Fe_2O_3 составляет 84,92 и 78,31% соответственно. Дальнейшее увеличение времени спекания практически не оказывает влияния на растворение алюминия и железа.

Интерес к выщелачиванию спека нефелиновых сиенитов азотной кислотой связан с тем, что, во-первых, соли азотной кислоты, образовавшиеся в процессе разложения сырья, легче перерабатываются, чем соли серной и соляной кислот. Во-вторых, в процессе переработки нефелинсодержащего сырья в присутствии азотной кислоты железо, находящееся в породе в двухвалентном состоянии, переходит в трехвалентное, что облегчает отделение железа от алюминия и получение глинозема лучшего качества. Выбор азотной кислоты для разложения спека нефелиновых сиенитов позволяет получать нитраты щелочных металлов, используемых в качестве азотного удобрения.

Проведены экспериментальные работы по выщелачиванию спекшейся массы

нефелиновых сиенитов после водной обработки при различной концентрации азотной кислоты (от 20 до 50%), при разной температуре выщелачивания (от 100 до 200 °C), времени перемешивания реакционной смеси (от 30 до 120 мин) и разном весовом соотношении азотной кислоты и спекшейся массы нефелиновых сиенитов (от 1:1 до 3,2:1).

Результаты исследования влияния концентрации азотной кислоты на степень извлечения оксидов алюминия и железа приведены на рис. 3.

Концентрация азотной кислоты влияет на извлечение Al_2O_3 и Fe_2O_3 из спекшейся массы нефелиновых сиенитов в раствор (рис. 3). Максимальное извлечение Al_2O_3 (82,62%) и Fe_2O_3 (69,85%) происходит при концентрации азотной кислоты в пределах 30–40%. Дальнейшее повышение концентрации кислоты более 50% приводит к резкому снижению степени извлечения Al_2O_3 и Fe_2O_3 из спекшейся массы. Ухудшение извлечения алюминия и железа из породы при высокой концентрации кислоты ранее мы связали с образованием малорастворимого соединения алюминия типа $Al_2O_3 \cdot 3N_2O_5 \cdot 8H_2O$ [15].

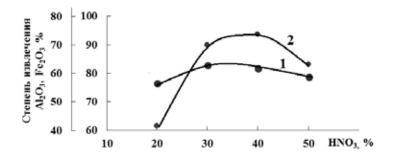


Рис. 3. Зависимость степени извлечения $Al_{2}O_{3}(1)$ и $Fe_{2}O_{3}(2)$ от концентрации азотной кислоты

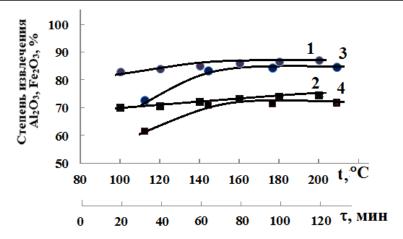


Рис. 4. Зависимость степени извлечения Al_2O_3 и Fe_2O_3 от температуры (кривые 1, 2) и продолжительности выщелачивания спекиейся массы (кривые 3, 4).

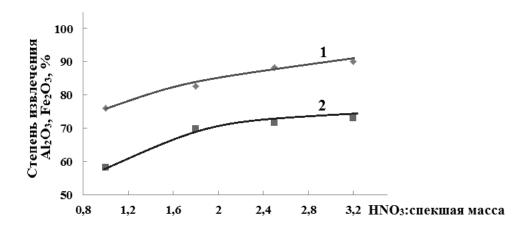


Рис. 5. Зависимость степени извлечения $Al_2O_3(1)$ и $Fe_2O_3(2)$ от весового соотношения азотной кислоты и спекшейся массы

Изучение влияния температуры азотнокислого раствора на разложение спекшейся массы нефелиновых сиенитов с азотной кислотой (рис. 4(1), (2)) показывает, что температура реакционной смеси незначительно влияет на извлечение соединений алюминия и железа. В исследуемом интервале температур (100–200 °C) максимальное разложение спека нефелиновых сиенитов в азотной кислоте наблюдается при температуре 160 °C, где степень извлечения Al₂O₃ и Fe₂O₃ достигает 86,27 и 72,74% соответственно. Обращает на себя внимание тот факт, что повышение температуры выщелачивания спекшейся массы нефелиновых сиенитов выше 160 °С нецелесообразно из-за того, что в растворе увеличивается содержание соединений железа, приводящее к загрязнению азотнокислого раствора.

Выщелачивание нефелиновых сиенитов азотной кислотой с извлечением алюминия и железа в раствор (рис. 4 (3), (4)) становится заметным при продолжительности процесса 90 мин, при этом степень извлечения Al₂O₃ и Fe₂O₃ составляет 83,52 и 70,72%.

² Как видно из рис. 5, весовое соотношение HNO_3 :спек оказывает некоторое влияние на извлечение Al_2O_3 и Fe_2O_3 из спекшейся массы нефелинового сиенита: при весовом соотношении HNO_3 :спек 1,8:1 степень извлечения Al_2O_3 и $Fe_2O_3-82,59$ и 69,85%, а при 2,5:1 степень извлечения Al_2O_3 и $Fe_2O_3-88,16$ и 71,52% соответственно.

Заключение

На основании изложенного можно заключить, что оптимальные параметры спекания нефелиновых сиенитов Сандыкского месторождения с K_2CO_3 : температура спека-

- ния 850 °C, продолжительность спекания 1,5–2 ч. Оптимальные условия разложения спекшейся массы нефелиновых сиенитов азотной кислотой:
- концентрация азотной кислоты 30-40%;
 - температура выщелачивания 160 °C;
- время выщелачивания не меньше 60 мин;
 - соотношение HNO₃:спек равное 2,5:1.

Список литературы

- 1. Лайнер А.И., Еремин Н.И., Лайнер Ю.А., Певзнер И.З. Производство глинозема. М.: «Металлургия», 1978. С. 344.
- 2. Сизяков В.М. Химико-технологические закономерности процессов спекания щелочных алюмосиликатов и гидрохимической переработки спеков // Записки горного института. 2015. Т. 217. С. 102–110.
- 3. Сизяков В.М., Бажин В.Ю., Сизякова Е.В. Поведение щелочей при сухом спекании нефелино-известковой щихты // Металлургия. 2015. N 11. С. 28–35.
- 4. Горбунова Е.С., Захаров В.И., Федоров С.Г., Алишкин А.Р., Матвеев В.А., Майоров Д.В. Способ переработки нефелин-полевошпатового сырья // Патент RU 2372290 RU МПК С 0 F/24 Патентообладатель ЗАО «Северо-Западная фосфорная компания» (СЗФК). 2009. Бюл. № 42.
- 5. Иброхим А., Мирзоев Б., Сафиев Х., Мирзоев П., Бобоев Х. Переработка нефелиновых сиенитов месторождения Турпи Таджикистана спекательным способом // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. 2016. № 3. С. 143–146.
- 6. Шепелев И.И., Головных Н.В., Сахочев А.Ю., Жижаев А.М., Котлягин А.Г. Улучшение качества спека известняково-нефелиновой шихты путем ввода в нее гипсо-ангидритового техногенного сырья // Вестник Иркутского

- государственного технического унмверситета. 2018. Т. 22. № 5. С. 225–236.
- 7. Мисратов Ж.А. Кислотные и спекательные способы разложения боро- и алюмосиликатных руд Таджикистана: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Душанбе, 2020. 21 с.
- 8. Давлатов Д.О., Назаров Ш.Б., Гиесиддина А., Мирсаидов У.М. Переработка нефелиновых сиенитов спеканием с сульфатом натрия // Известия АН Республики Таджикистан. 2020. № 2 (179). С. 71–75.
- 9. Фридман Я.Д. Отчет по научно-исследовательской работе по теме: «Физико-химическое изучение Сандыкских нефелино-сиенитовых пород и технологии их переработки» (Сводный отчет за 1957–1961 гг.) // Фонды Госгеолагентства 4821. Фрунзе, 1961.
- 10. Рыспаев О.Р., Чижиков Д.М., Китлер И.Н. Изучение поведения отдельных глиноземсодержащих минералов, входящих в состав нефелиновых сиенитов при действии азотной кислоты // О комплексном использовании нефелиновых пород в Киргизии. Фрунзе, 1968. С.110–116.
- 11. Садыралиева У.Ж. Исследование целесообразности комплексной переработки нефелино-сиенитовых руд месторождения Сандык // Технические науки от теории к практике. 2016. № 12 (60). С. 41–45.
- 12. Шаршенбек к. А., Кочкорова З.Б., Мурзубраимов Б.М. Исследование возможности разложения нефелиновых сиенитов месторождения Сандык серной кислотой // Известия Ошского технологического университета. 2020. № 2. С. 153—159.
- 13. Шаршенбек к. А., Кочкорова З.Б., Мурзубраимов Б.М., Калчаева Б.Ш. Обработка каолиновой глины Чоко-Булакского месторождения серной, азотной и соляной кислотами // Известия НАН КР. 2020. № 3. С. 23–27.
- 14. Сочеванова М.М. Ускоренный анализ горных пород с применением комплексонометрии. М.: Наука, 1969. 160 с.
- 15. Шаршенбек к. А., Кочкорова З.Б., Мурзубраимов Б.М. Исследование возможности получения глинозема из природной каолиновой глины Чоко-Булакского месторождения // Известия вузов Кыргызстана. 2017. № 7. С. 74—77.

СТАТЬЯ

УДК 33:658.5.011

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ПРЕДПРИЯТИЙ

Сергеев Р.А.

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», Camapa, e-mail: roman-sergeev-92@inbox.ru

Одной из актуальных тем современности является внедрение изменений в работе предприятий на основе цифровых технологий и подходов. Проведение цифровой трансформации становится необходимым этапом, упустив который хозяйствующие субъекты рискуют проиграть конкурентную борьбу в современном VUCA-мире. Однако необдуманные преобразования, особенно в сфере цифровизации, несут в себе значительные риски. Важным становится вопрос системности и методичности изменений бизнес-процессов. Данная статья посвящена разработке методики проведения цифровых преобразований бизнес-процессов предприятий. Объектом работы являются бизнес-процессы деятельности организаций. Предмет - методика проведения цифровых преобразований бизнес-процессов. В статье кратко проведен обзор источников по теме анализа, оптимизации, реинжиниринга бизнес-процессов. Методика представлена в виде блоксхемы алгоритма, с описанием шагов алгоритма. Существенными элементами методики являются: использование для поддержки решений системы рассуждений на основе прецедентов и экспертной системы; схема представления бизнес-процессов в виде набора отображений, которая может оказать поддержку при формировании списка кандидатов проектов; многокритериальная оценка проектов для отбора; использование гибких подходов при реализации проектов. Эти элементы, наряду с самой методикой, могут служить опорой в проведении цифровых трансформаций бизнес-процессов, что является, без сомнения, сложной задачей в развитии предприятий.

Ключевые слова: цифровизация, цифровая трансформация, бизнес-процессы, методика, искусственный интеллект, системный анализ

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DIGITAL TRANSFORMATION OF BUSINESS PROCESSES OF ENTERPRISES

Sergeev R.A.

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, e-mail: roman-sergeev-92@inbox.ru

One of the hot topics of our time is the introduction of changes in the work of enterprises based on digital technologies and approaches. Carrying out digital transformation is becoming a necessary step, missing which business entities risk losing the competition in the modern VUCA world. However, rash transformations, especially in the field of digitalization, carry significant risks. The question of consistency and methodicalness of changes in business processes becomes important. This article is devoted to the development of a method for carrying out digital transformations of business processes of enterprises. The object of the work is the business processes of organizations. The subject is a method for carrying out digital transformations of business processes. The article briefly reviews sources on the topic of analysis, optimization, and reengineering of business processes. The method is presented in the form of a block diagram of the algorithm, with a description of the steps of the algorithm. The essential elements of the method are: the use of case-based reasoning system and an expert system to support decisions; a scheme for representing business processes in the form of a set of mappings, which can provide support in the formation of a list of project candidates; multi-criteria evaluation of projects for selection; use of flexible approaches (agile) in the implementation of projects. These elements, along with the method itself, can serve as a pillar in carrying out digital transformations of business processes, which is, without a doubt, a complex task in the development of enterprises.

 $Keywords:\ digitalization,\ digital\ transformation,\ business\ processes,\ method,\ artificial\ intelligence,\ system\ analysis$

В настоящее время цифровизация и цифровая трансформация являются общемировыми трендами. Несмотря на явное наличие информационного шума и рекламы вокруг тем, связанных с цифровыми технологиями, искусственным интеллектом, грамотное проведение цифровых трансформаций является реальным инструментом сохранения и увеличения конкурентоспособности деятельности предприятий. Данная статья посвящена актуальной теме разработки методики цифровой трансформации бизнеспроцессов предприятий.

Цель исследования — разработать методику проведения цифровой трансформации бизнес-процессов предприятий, дающую алгоритм, который можно использовать как общую модель во время оптимизации и реинжиниринга деятельности предприятия на основе цифровых технологий.

Для достижения цели решаются задачи:
— обзор существующих подходов для описания бизнес-процессов, моделей, встречающихся в научной литературе по оптимизации и реинжинирингу бизнес-процессов;

- разработка блок-схемы алгоритма, представляющей методику;
- описание шагов методики с подчеркиванием существенных её сторон и элементов.

Материалы и методы исследования

При разработке методики применялись общенаучные методы анализа, синтеза, абстрагирования, а также методы системного подхода.

Результаты исследования и их обсуждение

Обзор источников по теме

Методология функционального моделирования IDEF0 является частью семейства IDEF, которая построена на основе методологии структурного анализа и проектирования SADT. В рамках IDEF0 процесс отображается в виде набора взаимосвязанных действий. Действия (называемые также активностями – Activity), отображаемые функциональными блоками, преобразуют поступающие на вход объекты в выходные объекты, а также взаимодействуют между собой на основе определенных правил. Функциональные модели, построенные с помощью нотации IDEF0, позволяют строить модели компании «Как есть», а также «Как должно быть», тем самым поддерживая процессы реинжиниринга деятельности.

Для моделирования бизнес-процессов может использоваться унифицированный язык моделирования (Unified Modeling Language, UML). Язык UML предназначен для визуализации, специфицирования, проектирования и документирования систем. В рамках UML выделяют множество типов диаграмм, например диаграммы классов, диаграммы объектов, диаграммы прецедентов, диаграммы деятельности и прочие. деятельности, Диаграммы показывающие разложение некоторой деятельности на составные части, используются при моделировании бизнес-процессов. Язык UML предоставляет широкие возможности по описанию систем, однако предназначен в основном для решения задач инжиниринга программного обеспечения.

Спецификация BPMN (Business Process Model and Notation) предназначена для отображения бизнес-процессов в диаграммы бизнес-процессов. Для этого BPMN определяет систему условных обозначений (нотация) и их описания. BPMN призвана служить связующим звеном этапов анализа и проектирования бизнес-процессов и их реализации. Это достигается с помощью использования базового набора элементов, которые должны быть понятны всем заинтересованным сторонам: аналитикам, раз-

работчикам, пользователям. Для реализации моделей существуют языки исполнения бизнес-процессов — BPEL (Business Process Execution Language) и BPML (Business Process Modeling Language).

Среди известных методологий можно отметить ARIS (Architecture of Integrated Information Systems) – методологию и программный продукт для моделирования бизнес-процессов. Помимо нотаций UML, ERM (Entity-Relation Model) в ARIS есть нотация eEPC (extended Event-driven Process Chain) – расширенная событийная цепочка процессов. Нотация ЕРС, будучи расширением методологии IDEF3 (в которой система представляется процессами и объектами с их состояниями), позволяет описывать бизнес-процессы с помощью событий и функций. События могут управлять ходом выполнения функций, а также быть результатом работы функций.

В работе [1] проведен обзор теории бизнес-процессов. В частности, дается описание таких разделов теории: типы и классы бизнес-процессов, модели (типы, виды, нотации), технологии моделирования, методы структурирования/декомпозиции, методы инжиниринга/реинжиниринга, методы анализа и верификации, методы перехода от моделей бизнес-процессов к требованиям по автоматизации бизнес-процессов.

В монографии [2] представлен подход автоматизации этапа анализа и синтеза модели бизнес-процесса на основе следующих аппаратов: имитационного моделирования, экспертных систем, ситуационного и мультиагентного моделирования. В рамках данного подхода, в частности, рассматривается динамическая модель мультиагентного процесса преобразования ресурсов, к которой применяются процедуры свертки и развертки. Под процедурой свертки при этом понимается структурный и/или параметрический синтез модели, ведущий к уменьшению структуры и/или параметров модели. А процедура развертки увеличивает размерности модели, в результате чего увеличивается пропускная способность системы. В итоге программная реализация представленного авторами подхода сократит время анализа модели, облегчит труд аналитика, ускорит процесс принятия решений.

В работе [3] строится интеграционная модель, использующая аппарат формальных грамматик (атрибутные порождающие грамматики) и экспертных систем. Грамматика позволяет строить любые правильные цепочки (сценарии) выполнения бизнеспроцесса. База знаний экспертной системы разделена на два уровня: метауровень и основной уровень. Метауровень описывает

метазнания о формировании вопросов, метаправила поиска рекомендаций по реинжинирингу и другие метаправила и метазнания, а основной уровень содержит конкретные правила реинжиниринга. Особенность заключается в том, что метаправила порождают правила для основного уровня. При работе экспертной системы происходит поиск решения в базе знаний, интеграция результатов работы экспертной системы с правилами грамматики, отбор и выдача вариантов выполнения бизнес-процесса.

В состав Национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» входят следующие федеральные проекты [4]: «Нормативное регулирование цифровой среды», «Кадры для цифровой экономики», «Информационная инфраструктура», «Информационная безопасность», «Цифровые технологии», «Цифровое государственное управление», «Искусственный интеллект», «Обеспечение доступа в Интернет за счет развития спутниковой связи», «Развитие кадрового потенциала ИТ-отрасли». Постановке и решению задач цифровизации бизнеса посвящена книга [5]. Важный вопрос оценки цифровой зрелости рассматривается в статье [6].

Методика цифровой трансформации бизнес-процессов предприятия

На рис. 1 представлена блок-схема, описывающая шаги методики, которую можно применять в процессе цифровой трансформации бизнес-процессов.

На рис. 2 раскрывается часть блоксхемы, относящаяся к процедуре «Реализация проекта».

Опишем блоки алгоритма представленной методики.

Первым шагом представленной методики является оценка цифровой зрелости предприятия. Производить данную оценку можно в соответствии с каким-либо известным подходом [6]. Целью шага является определение текущего уровня развития предприятия с точки зрения цифровизации. Итогом шага, как правило, является качественная информация, которая позволяет понять, какие области наименее готовы к цифровым преобразованиям, куда можно направить усилия и т.д.

Следующий шаг — описание и анализ бизнес-процессов предприятия. Инструментами на данном этапе являются языки описания бизнес-процессов, специальное программное обеспечение для поддержки моделирования. Подобная инвентаризация представляется важной, поскольку позволяет структурировать деятельность предприятия. В итоге получается модель «Как есть», что соответствует одному из классических этапов реинжиниринга бизнес-процессов.

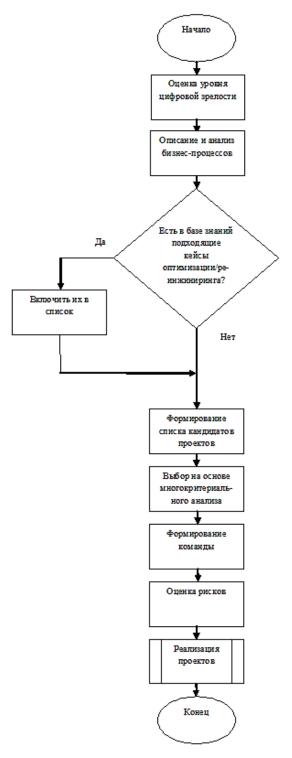


Рис. 1. Блок-схема методики цифровой трансформации бизнес-процессов предприятий

Следующий блок на блок-схеме — узел принятия решений. Здесь предлагается использовать специальную систему, основой которой являются два компонента: рассуждения на основе прецедентов (case-based reasoning) и экспертная система. На основании

введенной информации о бизнес-процессе система должна выдавать известные варианты использования цифровых технологий и подходов в данном случае. Ответственность за ведение системы (наполнение, поддержка) целесообразно возложить на руководителя цифровой трансформации (Chief Digital Transformation Officer, CDTO). Функционал подобной системы можно вполне реализовать с использованием компонентов открытого программного обеспечения (например, [7]). Система должна стать частью общей системы управления инновациями предприятия. Итогом работы системы является набор вариантов для оптимизации/реинжиниринга конкретного бизнес-процесса с использованием цифровых технологий.

Следующий шаг — формирование списка кандидатов проектов. На текущий момент в списке уже могут присутствовать варианты по проектам изменений бизнеспроцессов, которые получены на предыдущем шаге. В результате проведения анализа бизнес-процессов, а также возможных вариантов список можно расширить новыми вариантами. Их формирование проводят ответственные сотрудники под руководством СDTO (например, с помощью мозгового штурма).

В частности, предлагается рассматривать набор отображений:

$$BF \rightarrow 2^{GogF};$$

 $GogF \rightarrow 2^{AIM}$
 $AIM \rightarrow 2^{HS}$

где BF — множество бизнес-процессов (или бизнес-функций);

GogF — множество когнитивных функций GogF = {распознавание, восприятие, рассуждение, ...};

AIM — множество методов искусственного интеллекта AIM = {генетический алгоритм, искусственная нейронная сеть, экспертная система, ...};

HS — множество программных и аппаратных систем HS = {библиотека реализации искусственных нейронных сетей, облачные ресурсы, ...}.

То есть данные отображения сначала переводят взятую бизнес-функцию в совокупность когнитивных процессов, использующихся в процессе выполнения бизнес-функции; далее когнитивный процесс отображается на набор методов ИИ, моделирующих данный процесс; в конце каждый из методов представляется с помощью набора программно-аппаратных средств, его реализующих. Отметим, что булеан в правых частях указан для того, чтобы подчеркнуть многозначность отображений, т.е.

одной бизнес-функции может соответствовать множество когнитивной функции, одной когнитивной функции может соответствовать гибридная структура, состоящая из нескольких методов ИИ, и т.д.

В конечном итоге можно получить для бизнес-процессов возможные варианты реализации.

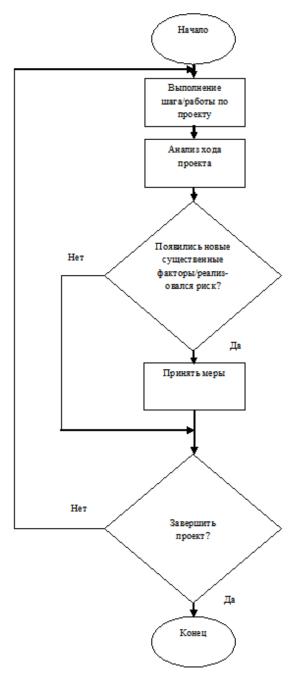


Рис. 2. Блок-схема реализации отдельного проекта

Следующий шаг – многокритериальная оценка проектов (вариантов оптимизации/ реинжинирнга бизнес-процессов). Подоб-

ная оценка может проводиться с использованием разных подходов (метод анализа иерархий, скаляризация, критерий Парето). Результат шага — отобранные для реализации проекты.

Следующие два шага — формирование команды для реализации проекта и оценка рисков.

Этап реализации представлен на другой блок-схеме (рис. 2).

Первый шаг — выполнение очередной работы по проекту (например, из схемы декомпозиции работ). После выполнения — процесс анализа хода проекта. Если в результате текущего анализа выявлены какие-либо вновь появившееся существенные факторы, влияющие на проект, или же реализовался какой-либо риск — необходимо принятие соответствующих мер. Ветвление на блок-схеме отражает решение о необходимости мер. После необходимо решить, завершить ли проект. Если проект ещё требует выполнения работ, то перейти на первое действие, иначе — выход.

В целом стандартная схема выполнения проектных работ. Целесообразным здесь является применения гибких методологий управления проектами (Agile). Получаемый на каждой итерации результат, в случае принятия решения об остановке проекта, можно пробовать использовать в других проектах. Таким образом, сформированная функциональность вследствие сложности и комплексности проектов цифровой трансформации может стать основой для других, более эффективных в текущих условиях проектов. Возможность изменять решения может рассматриваться как реальный опцион.

Заключение

Цифровая трансформация предприятия — сложный комплексный процесс, охватывающий различные области предприятий. В статье представлена методика проведения цифровой трансформации бизнес-процессов, которую можно использовать в качестве опорной модели при пла-

нировании, проведении и на других этапах преобразования деятельности предприятий. Проведен обзор источников по теме статьи. Методика представляется в виде блоксхемы для наглядности и удобства работы с ней. Существенными сторонами методики являются: использование компонентов системы рассуждений на основе прецедентов и экспертной системы для поддержки выбора вариантов цифровой трансформации бизнес-процессов; использование набора отображений при формировании вариантов реализации бизнес-процессов; многокритериальная оценка для выбора реализуемых проектов; реализация проектов с применением Agile подхода. Все эти элементы, входящие в методику, должны служить повышению управляемости и эффективности внедрения цифровых преобразований на предприятии.

Список литературы

- 1. Калянов Г.Н. Теория бизнес-процессов: формальные модели и методы // Статистика и экономика. 2016. № 4. С. 19–21. DOI: 10.21686/2500-3925-2016-4-19-21.
- 2. Аксенов К.А., Ван Кай. Разработка и применение метода реинжиниринга бизнес-процессов на основе мультиагентного моделирования: монография / Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Ульяновск: Издательство «Зебра», 2016. 192 с.
- 3. Филиппович А.Ю., Коннова Е.П. Методика реинжиниринга бизнес-процессов на основе интеграции методов экспертных систем и формальных грамматик // Проблемы полиграфии и издательского дела. 2008. № 6. URL: http://it-claim.ru/Library/Articles/publications_Philippovich_Andrew/MethodicRBP.pdf (дата обращения: 22.08.2022).
- 4. Цифровая экономика РФ. [Электронный ресурс]. URL: https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/858/ (дата обращения: 22.08.2022).
- 5. Кулагин В., Сухаревски А., Мефферт Ю. Digital@ Scale: Настольная книга по цифровизации бизнеса. М.: Интеллектуальная литература, 2021. 293 с.
- 6. Рахлис Т.П., Исаева М.М. Оценка цифровой зрелости промышленного предприятия: методологический аспект // Российские регионы в фокусс перемен: сборник докладов в двух томах. Том 1 (Екатеринбург, 18–20 ноября 2021 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2022. С. 480–484. [Электронный ресурс]. URL: http://hdl.handle.net/10995/108747 (дата обращения: 22.08.2022).
- 7. CLIPS. A Tool for Building Expert Systems. [Электронный ресурс]. URL: https://clipsrules.net/ (дата обращения: 23.08.2022).