

Том 28, №4, 2022



ISSN 2782-6724

Глобальная энергия

Санкт-Петербург

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ГЛОБАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., главный редактор, академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Александров М.Л., член-корр. РАН, Отделение нанотехнологий и информационных технологий РАН, Москва, Российская Федерация;
Згуровский М.З., ин. Член РАН, академик НАН Украины, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина;

Клименко А.В., академик РАН, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», НИТУ «МИСиС», Москва, Российская Федерация;

Костюк В.В., академик РАН, Российская академия наук, Москва, Российская Федерация;

Лагарьков А.Н., академик РАН, Институт теоретической и прикладной электродинамики ОИВТ РАН, Москва, Российская Федерация;

Окрепилов В.В., академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Рудской А.И., академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Саркисов А.А., академик РАН, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Российская Федерация;

Федоров М.П., академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., главный редактор, д-р техн. наук, академик РАН, научный руководитель Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Кондратьев С.Ю., зам. главного редактора, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Аксёнов Л.Б., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Башикарёв А.Я., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Боровков А.И., к.т.н., проректор по цифровой трансформации, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Гордеев С.К., д-р техн. наук, ст. научн. сотр. Центральный научно-исследовательский институт материалов, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Забонин В.Н., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Каляев И.А., д-р техн. наук, академик РАН, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация;

Колесун Михал, профессор, Технический университет, Кошице, Словакия;

Коровкин Н.В., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Куколев М.И., д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Митяков А.В., д-р техн. наук, профессор, Университет Турку, Турку, Финляндия;

Михайлов В.Г., д-р техн. наук, профессор, Бранденбургский технический университет, Бранденбург, Германия;

Райчик Ярослав, д-р техн. наук, профессор, Ченстоховский политехнический университет, Ченстохова, Польша;

Рамасуббу С., PhD, Директор по исследованиям BISS Division, ITW-India (P) Ltd, Бангалор, Индия;

Сергеев В.В., д-р техн. наук, профессор, чл-корр РАН, первый проректор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Тендлер М.Б., PhD, ин. член РАН, KTH Royal Institute of Technology, Стокгольм, Швеция;

Титков В.В., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Толочко О.В., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Фокин Г.А., д-р техн. наук, генеральный директор ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург», Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Цемленко В.Н., д-р техн. наук, зав. каф., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Журнал «Глобальная Энергия» (ранее «Материаловедение. Энергетика») с 1995 года издается под научно-методическим руководством Российской академии наук.

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Сетевое издание открытого доступа публикует статьи высокого научного уровня, освещающие передовой опыт, результаты НИР, теоретические и практические проблемы энергетики, электротехники, материаловедения и металлургии.

Сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich's Periodical Directory», в базах данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), Google Scholar, EBSCO, ProQuest, ROAD, Index Copernicus, CNKI, RSCI (WoS), DOAJ, в научной электронной библиотеке КиберЛенинка.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство Эл № ФС 77-78004 от 27.03.2020 г.)

Учредитель и издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Редакция журнала

О.А. Матенев – ответственный секретарь;

А.А. Кононова – компьютерная вёрстка; Д.Ю. Алексеева – перевод на английский язык.

Адрес редакции: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Тел. редакции +7 (812) 294-22-86, e-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

Дата выхода: 29.12.2022

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2022

28 (4) 2022



ISSN 2782-6724

Global Energy

St. Petersburg

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great

GLOBAL ENERGY

EDITORIAL COUNCIL

Vasiliev Yu.S. — head of the editorial council, full member of the Russian Academy of Sciences, Scientific director of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Aleksandrov M.L. — corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Zgurovskiy M.Z. — foreign member of the Russian Academy of Sciences, full member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine;

Klimenko A.V. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Kostiuk V.V. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Lagar'kov A.N. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Okrepilov V.A. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Rudskoy A.I. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Sarkisov A.A. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Fedorov M.P. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia.

EDITORIAL BOARD

Vasiliev Yu.S. — editor-in-chief, full member of the Russian Academy of Sciences, Scientific director of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Kondrat'ev S.Yu. — deputy editor-in-chief, Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Aksenov L.B. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Bashkarev A.Ya. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Borovkov A.I. — PhD in Technical Sciences, Vice Rector for Digital Transformation of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Gordeev S.K. — Doctor of Technical Sciences, prof. CNIIM, Russia;

Zaboin B.N. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Kayaev I.A. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Kolcun Michal — Ph.D., Technical University of Kosice, Slovak Republic;

Korovkin N.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Kukolev M.I. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Mityakov A.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the University of Turku, Turku, Finland;

Michailov V.G. — Doctor of Technical Sciences, prof. BTU, Germany;

Raychik Ya. — Doctor of Technical Sciences, prof. Czestochova Polytechnic University, Poland;

Ramasubbu S. — PhD, Lifetime Fellow, Indian Academy of Science, Research Director BISS, ITW-India (P) Ltd, India;

Sergeev V.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, corresponding member of the RAS, Russia;

Tendler M.B. — foreign member of the Russian Academy of Sciences, KTH Royal Institute of Technology, Sweden;

Titkov V.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Tolochko O.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Fokin G.A. — Doctor of Technical Sciences, General Director of LLC «Gazprom Transgaz St. Petersburg», Russia;

Tsemenko V.N. — Doctor of Technical Sciences, Head of Chair of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

Global Energy (formerly Materials Science. Power Engineering) has been published since 1995 under the scientific and methodical guidance of RAS since 1995.

Since 2002, the journal has been included in the List of leading peer-reviewed scientific journals compiled by the Higher Attestation Commission.

The online fully open-access journal focuses on the latest research in theoretical and practical aspects of power engineering, electrical engineering, materials science and metallurgy, striving to publish high-quality studies in these fields.

The journal is indexed by the following databases: VINITI Database RAS, Ulrich's Periodicals Directory, Russian Science Citation Index (RSCI), Google Scholar, EBSCO, ProQuest, ROAD, Index Copernicus, CNKI, RSCI (WoS), DOAJ, CyberLeninka.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (ROSKOMNADZOR), Certificate ЭЛ № ФЦ 77-78004 issued March 27, 2020.

Editorial office

O.A. Matenev – editorial manager;

A.A. Kononova – computer layout; D.Yu. Alekseeva – English translation

Address: 195251 Polytekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

+7 (812) 294-22-86, e-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

Release date: 29.12.2022

© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2022

Содержание

Энергетика. Электротехника

Галеркин Ю.Б., Рекстин А.Ф., Дроздов А.А., Маренина Л.Н. Влияние движения газа в зазорах "Рабочее колесо-корпус" центробежной компрессорной ступени на КПД и осевую силу.....	7
Синицын А.А., Ахметова И.Г., Соловьева О.В. Неразрушающий тепловой контроль конструктивно изолированного корпуса.....	21
Гриффитс С., Уратани Дж. Низкоуглеродное судовое аммиачное топливо.....	31
Бозиева А.М., Заднепровская Е.В., Аллахвердиев С.И. Получение биоводорода: последние достижения и современное состояние.....	59
Федюхин А.В., Ахметова И.Г., Соловьев С.А. Анализ эффективности применения современных теплоизоляционных материалов для высокотемпературных трубопроводов...	79

Металлургия. Материаловедение

Соколов Ю.А. Моделирование производственной системы электроннолучевой сварки.....	90
Нгуен В., Балановский А.Е., Нгуен В. Особенности формирования поверхностных слоев при плазменном нагреве обмазки оловянной бронзы.....	110
Нгуен В., Балановский А.Е., Нгуен В. Оценка абразивной износостойкости поверхностных слоев из плазменного оплавления оловянной бронзы и карбида хрома.....	123
Рыженков А.В., Волков А.В., Трушин Е.С., Черепанов С.П. Изменение смачиваемости поверхности нержавеющей стали на основе лазерного текстурирования рельефа.....	136

Contents

Energetics. Electrical engineering

Galerkin Yu.B., Rekstin A.F., Drozdov A.A., Marenina L.N. Effect of gas flow in impeller-housing gaps of centrifugal compressor stage on efficiency and axial force.....	7
Sinitsin A.A., Akhmetova I.G., Soloveva O.V. Non-destructive thermal control of a structurally insulated enclosure.....	21
Griffiths S., Uratani J. Zero and low-carbon ammonia shipping fuel.....	46
Bozieva A.M., Zadneprovskaya E.V., Allakhverdiev S.I. Biohydrogen production: recent achievements and state of the art.....	59
Fedyukhin A.V., Akhmetova I.G., Solovov S.A. Efficiency analysis of modern heat-insulating materials for high-temperature pipelines.....	79

Metallurgy. Material Science

Sokolov Y.A. Simulation of the production system of electron beam welding.....	90
Nguyen V., Balanovskiy A.E., Nguyen V. Features of the formation of surface layers during plasma heating of tin bronze pre-coating.....	110
Nguyen V., Balanovskiy A.E., Nguyen V. Estimation of abrasive wear resistance of plasma alloyed layers based on tin bronze and chromium carbide.....	123
Ryzhenkov A.V., Volkov A.V., Trushin E.S., Cherepanov S.P. Change of wettability of stainless steel surface based on laser texturing of relief.....	136

Энергетика. Электротехника Energetics. Electrical engineering

Научная статья

УДК 621.515

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28401>



Ю.Б. Галеркин, А.Ф. Рекстин, А.А. Дроздов, Л.Н. Маренина ✉

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ marenina_ln@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГАЗА В ЗАЗОРАХ "РАБОЧЕЕ КОЛЕСО-КОРПУС" ЦЕНТРОБЕЖНОЙ КОМПРЕССОРНОЙ СТУПЕНИ НА КПД И ОСЕВУЮ СИЛУ

Аннотация. При эксплуатации мощных центробежных компрессоров, в частности, компрессоров газоперекачивающих агрегатов, на некоторых режимах возникают проблемы с несущей способностью упорных подшипников. Еще в 1970-е гг. старший из авторов провел численное исследование влияния закрутки потока в зазорах «корпус – рабочее колесо». Показано, что в зазоре «рабочее колесо – покрывающий диск» поток вращается быстрее, чем в зазоре у основного диска. Причина в том, что в этот зазор поступает поток протечек лабиринтного уплотнения покрывающего диска. Поток вносит в зазор закрутку, созданную лопатками рабочего колеса. Центробежная сила вращающегося потока снижает давление в зазоре у покрывающего диска сильнее, чем в противоположном зазоре. Если затормозить поток в зазоре у покрывающего диска – осевая сила уменьшится. Но потери трения диска снизят КПД. Авторы сделали расчетное CFD-исследование влияния напряжения трения в зазоре «корпус – покрывающий диск» на осевую силу и КПД центробежной ступени. Расчеты ступени с диаметром рабочего колеса 409 мм сделаны при гидравлически гладкой стенке корпуса в зазоре у покрывающего диска и при шероховатости 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5 мм. При шероховатости 0.25 мм осевая сила уменьшилась на 21% ценой снижения КПД на 0.5% у ступени с коэффициентом расхода $\Phi = 0.0492$. При шероховатости 1.5 мм КПД снизился на 0.9%, а осевая сила уменьшилась на 32.6%. CFD-расчеты конкретного компрессора могут показать, является ли торможение потока в зазоре у покрывающего диска конкурентным по отношению к другим. Специальный расчет показал роль протечки в лабиринтном уплотнении. При герметичном лабиринтном уплотнении КПД был бы выше на 0.9%, коэффициент теоретического напора выше 0.8%, осевая сила меньше 22.8%. Расчет показал также, что при коррозии стенок корпуса в пределах обоих зазоров потери трения на поверхностях тормозят поток, снижают КПД, но практически не влияют на осевую силу.

Ключевые слова: центробежная компрессорная ступень, рабочее колесо, коэффициент трения дисков, коэффициент протечек, лабиринтное уплотнение.

Благодарности: Расчеты проводились с использованием суперкомпьютерного центра «Политехнический» СПбПУ.

Для цитирования:

Галеркин Ю.Б., Рекстин А.Ф., Дроздов А.А., Маренина Л.Н. Получение биоводорода: последние достижения и современное состояние // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 4. С. 7–20. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28401>



Yu.B. Galerkin, A.F. Rekstin, A.A. Drozdov, L.N. Marenina ✉

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

✉ marenina_ln@mail.ru

EFFECT OF GAS FLOW IN IMPELLER-HOUSING GAPS OF CENTRIFUGAL COMPRESSOR STAGE ON EFFICIENCY AND AXI-AL FORCE

Abstract. When operating powerful centrifugal compressors, in particular, pipeline compressors, some modes of operation pose problems with the thrust bearing capacity. Back in 1970, the senior of the authors carried out a numerical study of the effect of flow rotation in the housing–impeller gaps. It was shown that in the impeller–shroud gap the flow rotates faster than in the gap near the main disk. The reason is that the leakage flow of the labyrinth seal of the shroud enters this gap. The flow introduces the rotation created by the impeller blades. The authors made a computational CFD study of the effect of friction stress in the housing–shroud gap on the thrust force and efficiency of the centrifugal stage. Calculations of a stage with an impeller diameter of 409 mm are made with a hydraulically smooth housing wall in the gap near the shroud at roughness of 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5 mm. With a roughness of 0.25 mm, the axial force decreased by 21% at the cost of reducing the efficiency by 0.5% for a stage with a flow coefficient $\Phi = 0.0492$. With a roughness of 1.5 mm, the efficiency decreased by 0.9%, and the axial force decreased by 32.6%. In exceptional cases and as a temporary measure to decrease the thrust force, it is possible to use deceleration of the flow in the gap at the shroud disk. A special calculation showed the role of leakage in the labyrinth seal. With a hermetic labyrinth seal, the efficiency would be higher by 0.9%, the loading factor would be higher by 0.8%, and the axial force would be less by 22.8%. The calculation also showed that during corrosion of the housing walls within both gaps, friction losses on the surfaces slow down the flow rotation in both gaps, reduce the efficiency, but have practically no impact on the thrust force.

Keywords: centrifugal compressor stage, impeller, cavity, parasitic losses, disc friction coefficient, leakage coefficient.

Acknowledgements: The calculations were carried out using the facilities of Supercomputer Center "Polytechnic", Peter the Great SPbPU.

Citation:

Yu.B. Galerkin, A.F. Rekstin, A.A. Drozdov, L.N. Marenina, Effect of gas flow in impeller-housing gaps of centrifugal compressor stage on efficiency and axial force, *Global Energy*, 28 (04) (2022) 7–20, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28401>

Введение. Среди газовых нагрузок, действующих на ротор центробежного компрессора, осевая сила является наибольшей по величине, достигая нескольких тонн у компрессоров газоперекачивающих агрегатов [1–5]. Ни традиционные масляные, ни современные магнитные подшипники не в состоянии уравновесить осевую силу такой величины. Для уменьшения осевой силы применяются так называемые разгрузочные поршни, или думмисы. Для определения их размеров требуются достаточно сложные газодинамические расчеты. При введении в строй новых компрессоров иногда возникают проблемы с несущей способностью упорных подшипников [6–8]. Иногда меняются условия эксплуатации существующих машин, когда появляется такая же проблема. Изменение диаметра думмиса для снижения нагрузки на подшипник конструктивно сложная и

дорогостоящая задача. Авторы предлагают альтернативный подход воздействия на вращение потока в зазоре между покрывающими дисками рабочих колес и корпусом.

Методы и материалы

Политехническая научная школа турбокомпрессоростроения, к которой относят себя авторы, имеет давний и успешный опыт газодинамического проектирования промышленных центробежных компрессоров [9]. Основной инструмент – комплекс ПК-программ на основе инженерных математических моделей («Метод универсального моделирования»). Хотя по опыту авторов, программы вычислительной газодинамики (CFD) не гарантируют корректность моделирования центробежных компрессоров и ступеней [10], для ряда частных задач проектирования применение CFD дает полезные результаты [11].

Специалисты, эксплуатирующие компрессора, указывают на то, что восприятие газодинамической осевой силы упорным подшипником не всегда гарантировано. Осевая сила, действующая на ротор, очень велика. На рис. 1 показана схема рабочих колес промежуточной и последней ступени компрессора.

Осевая сила всегда направлена в сторону входа в рабочее колесо, поскольку давление на входе (сечение 0) меньше давления в зазоре «основной диск – корпус». На стадии проектирования для уменьшения осевой силы концевое лабиринтное уплотнение (ЛУ) располагают не на валу, а на некоем большем радиусе. Конструктивно это обычно диск (думмис, разгрузочный поршень) с цилиндрической или конической поверхностью лабиринтного уплотнения. Вытекающий из уплотнения думмиса газ отводится на всасывание компрессора и давление за думмисом практически равно давлению на всасывании. Чем выше расположено уплотнение думмиса, тем меньше осевая сила. Но это приводит к увеличению протечки газа через концевое лабиринтное уплотнение. Объемный КПД [9] становится меньше.

В зазорах «рабочее колесо – корпус» газ вращается, поэтому давление $p(r)$ в зазоре уменьшается от давления p_2 на выходе из рабочего колеса (рис. 1), до величины, определяемой градиентом давления, возникающим из-за центробежной силы при вращении газа со скоростью c_u :

$$p(r) = p_2 - \int_{r_1}^{r_2} \rho \frac{c_u^2}{r} dr. \quad (1)$$

где ρ – плотность газа, r – радиус, индексы 1 и 2 обозначают вход и выход из рабочего колеса соответственно.

В зазоре у основного диска газ получает вращение от поверхности вращающегося диска. Скорость вращения газа в зависимости от радиуса $c_u(r)$ примерно равна половине окружной скорости $u = \omega \times r$ (u – окружная скорость, ω – угловая скорость вращения).

В зазор у покрывающего диска из рабочего колеса поступает газ протечек лабиринтного уплотнения. Этот газ уже имеет окружную составляющую скорости c_{u2} . Поэтому в зазоре у покрывающего диска газ вращается быстрее, чем в противоположном зазоре. В зазоре, где газ вращается быстрее, согласно уравнению (1) давление меньше. Падение давления в зазоре «корпус – покрывающий диск» увеличивает осевое усилие.

Если в процессе эксплуатации компрессора упорный подшипник не справляется, естественное решение – увеличить диаметр думмиса. Это приведёт к некоторому снижению КПД. Цель работы – изучить альтернативный путь уменьшения осевой силы торможением потока в зазоре «корпус – покрывающий диск». Авторы публикаций о центробежных насосах [12–17], указывают на два способа снижения осевой силы воздействием на вращение газа – но в противоположном зазоре «корпус-основной диск», рис. 2:

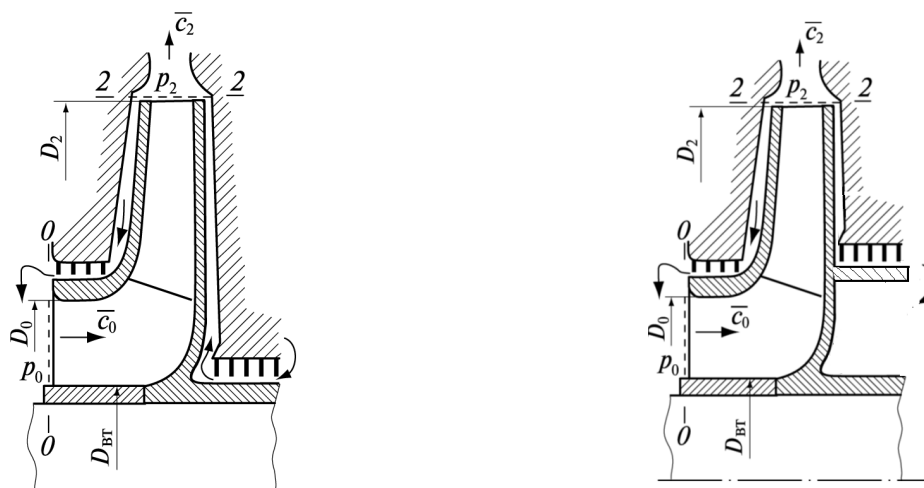


Рис. 1. Схема уравнивания осевой силы думмисом (разгрузочным поршнем). Слева – промежуточная ступень. Справа – конечная ступень с думмисом [9]

Fig. 1. Scheme of the axial force balancing with a dummis (unloading piston). On the left is an intermediate stage. On the right – the end stage with dummis [9]

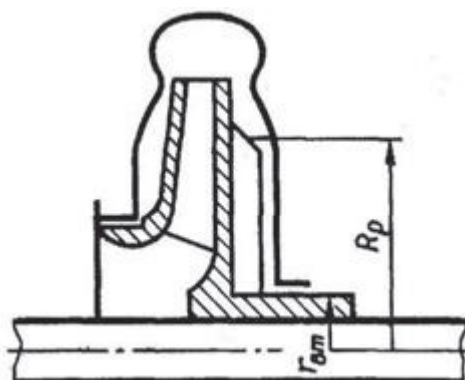


Рис. 2. Уменьшение осевой силы раскруткой потока ребрами на поверхности основного диска [12]

Fig. 2. A decrease in the axial force by spinning the flow with ribs on the main disk surface [12]

Раскрутка потока ребрами на вращающемся рабочем колесе наверняка очень энергозатратна. В многоступенчатом компрессоре снижение осевой силы может быть недостаточным. Ниже представлена расчетная оценка того, насколько торможение вращения газа в зазоре «корпус-покрывающий диск» уменьшает осевую силу с оценкой снижения КПД из-за увеличения потерь от трения наружной поверхности покрывающего диска.

Объект исследования. Методика CFD-расчетов

Объект исследования – модельная ступень типа РРК 0048-048-029 семейства 20СЕ Проблемной лаборатории компрессоростроения ЛПИ [18]. Модельные ступени этого семейства разрабатывались в 1990-е гг. и нашли применение при создании нового поколения центробежных компрессоров 1990–2000 гг. для Газпрома [18]. В тот период по проектам Методом универсального моделирования проф. Ю.Б. Галеркина были созданы компрессора и сменные проточные части мощностью 10–25 МВт, получившие высокую оценку производителей и потребителей компрессоров [19]. Сейчас по проектам авторов создано более 400 промышленных центробежных компрессоров с суммарной мощностью 5.5 млн. кВт.

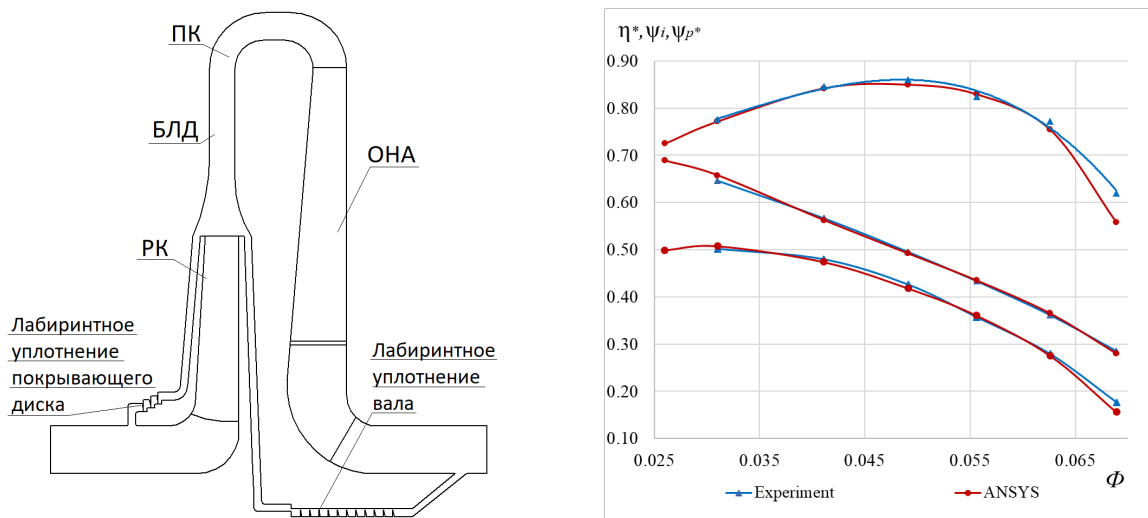


Рис. 3. Меридиональный разрез проточной части модельной ступени РПК 0048-048-029 и результат CFD-моделирования характеристик. Испытание при $M_u = 0.6$

Fig. 3. Meridional section of the flow path of the RPK 0048-048-029 model stage and the result of CFD modeling. Test at $M_u = 0.6$

Выбор модельной ступени РПК 0048-048-029 в качестве объекта представленного ниже исследования обусловлен тем, что это единственная ступень, характеристики которой авторам удалось достаточно корректно симулировать CFD – расчётом – рис. 3.

Характеристики модельной ступени представлены в безразмерном виде $\psi_p^* = \psi_i \cdot \eta^*$, где:

– коэффициент расхода $\Phi = \frac{\bar{m}}{\rho_{ax}^* \frac{\pi}{4} D_2^2 u_2}$,

– политропный КПД по полным параметрам $\eta^* = \frac{\ln\left(\frac{p_k^*}{p_n^*}\right)}{\frac{k}{k-1} \ln\left(\frac{T_k^*}{T_n^*}\right)}$,

– коэффициент внутреннего напора $\psi_i = \frac{c_p (T_k^* - T_n^*)}{u_2^2}$,

– коэффициент политропного напора $\psi_i, \eta^*, \psi_p^* = f(\Phi)$,

– p_n^* и p_k^* – полное давление на входе и выходе соответственно, T_n^* и T_k^* – полная температура на входе и выходе соответственно, k – показатель адиабаты, c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, $\bar{m}$ – массовый расход, ρ_{ax}^* – плотность по полным параметрам на входе, u_2 – окружная скорость на выходе из рабочего колеса.

Для проведения численного исследования ступеней с моделированием течения в зазорах и лабиринтных уплотнениях использовался пакет программ Ansys CFX. Для построения структурированной гексаэдральной расчётной сетки трехмерная модель разбита на отдельные области: «входной участок + РК + половина безлопаточного диффузора (БЛД)», «вторая половина БЛД

+ ПК + основная лопатка ОНА», «спрямляющая лопатка ОНА + выходной участок». Общее количество ячеек в зазорах 1,2 млн, размер всей расчётной сетки около 3 млн ячеек. Интерфейс «Frozen Rotor» задавался на удаленном расстоянии от ПК, на радиусе, соответствующем середине БЛД. В расчётах использована модель турбулентности «SST» (Shear Stress Transport), в соответствии с требованиями низкорейнольдсовой модели турбулентности, задавались значения y^+ не более 2 для корректного разрешения течения в пограничных слоях. Эта методика использована при выполнении представленного ниже расчетного исследования.

Известно, что уменьшение осевой силы путем торможения потока в зазоре у покрывающего диска иногда применяется в гидронасосах. На поверхности корпуса выполняются радиальные канавки, препятствующие вращению потока. В этом расчетном исследовании для торможения потока стенка корпуса условно делалась шероховатой, что увеличивало касательное напряжение трения в зазоре. Расчеты сделаны при гидравлически гладких поверхностях, образующих зазоры, и при шероховатой поверхности корпуса в пределах зазора «корпус - покрывающий диск». Диаметр зерна эквивалентной песочной шероховатости принимался равным 0,25, 0,50, 0,75, 1, 1,5 мм. Диаметр рабочего колеса модельной ступени 409 мм. Расчеты сделаны только для оптимального режима, значение условного коэффициента расхода $\Phi_{\text{опт}} = 0,0491$ соответствует режиму экспериментального исследования.

Результаты

Поведение газа в зазоре «корпус — покрывающий диск»

Поток протечек в лабиринтном уплотнении $\bar{m}_{\text{прлу}}$ и шероховатость стенок влияет на картину течения и давление в зазоре. На рис. 4 показаны линии тока в зазоре при разных условиях. Для наглядности зазор разделен на две части по его длине.

При отсутствии радиального течения движение газа в зазоре циркуляционное. У вращающейся поверхности покрывающего диска газ движется к периферии. У неподвижной стенки корпуса газ движется в обратном направлении. При радиальном течении газа к лабиринтному уплотнению и более сильном торможении на шероховатой стенке циркуляционная составляющая скорости уменьшается (эту составляющую скорости принято называть закруткой потока). Показанные на рис. 4 линии тока демонстрируют поведение меридиональной скорости потока $c_m = w_m$. Показанная цветом величина — это относительная скорость $\vec{w} = \vec{c}_u - \vec{u}$. Когда стенка шероховатая, закрутка потока в абсолютном движении сильно тормозится. На рисунке справа область больших относительных скоростей на стенке корпуса — это область, где газ почти не вращается в зазоре, $\vec{c}_u \rightarrow 0$.

На рис. 5 показано изменение осредненной по ширине зазора окружной составляющей относительной скорости w_u по радиусу. Для удобства анализа показана безразмерная закрутка — скорость потока отнесена к окружной скорости u_2 .

Разница в закрутке потока при гладких стенках — кривые 1 и 2 — объясняется влиянием потока протечек $\bar{m}_{\text{прлу}}$. Когда есть радиальный поток протечек $\bar{m}_{\text{прлу}}$ с закруткой c_{u2} на входе в зазор, во всем зазоре поток вращается быстрее. В относительном движении скорость меньше — поток вращается вместе с колесом.

Шероховатость стенки сильно тормозит вращение. С ростом шероховатости её влияние на закрутку уменьшается.

Обратим внимание на то, что при разной шероховатости разный расход газа через лабиринтное уплотнение. Чем больше шероховатость, тем медленнее поток вращается в зазоре. Давление перед уплотнением увеличивается — увеличивается поток протечек $\bar{m}_{\text{прлу}}$.

Окружная составляющая скорости в зазоре определяет давление $p(r)$, что и определяет влияние шероховатости на осевую силу. Изменение давления газа в зазоре показано на рис. 6.

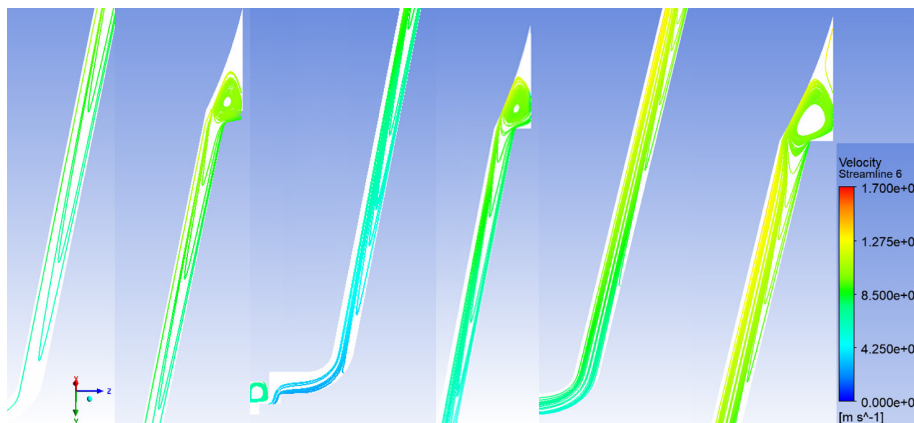


Рис. 4. Линии тока в зазорах «покрывающий диск – корпус». Слева – при нулевом радиальном зазоре.

В центре при радиальном зазоре 0,25 мм, поверхности гидравлически гладкие.

Справа – при радиальном зазоре 0,25 мм, шероховатость корпуса 1 мм

Fig. 4. Streamlines in the gaps "covering disk – housing". Left – with zero radial clearance.

In the center with a radial clearance of 0.25 mm, the surfaces are hydraulically smooth.

Right – with a radial clearance of 0.25 mm, housing roughness of 1 mm

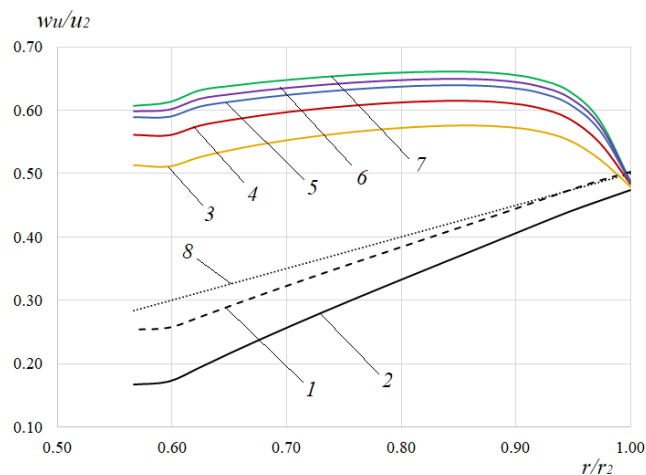


Рис. 5. Изменение окружной составляющей скорости по радиусу в зазоре «покрывающий диск – корпус»

1 – Поверхности гладкие, нет протечки в ЛУ; 2 – Поверхности гладкие, поток протечки $\bar{m}_{\text{нрл}} = 0,0285$ кг/с;

3 – Шероховатость 0,25 мм, поток протечки $\bar{m}_{\text{нрл}} = 0,0219$ кг/с; 4 – Шероховатость 0,5 мм, поток протечки $\bar{m}_{\text{нрл}} = 0,0223$ кг/с; 5 – Шероховатость 0,75 мм, поток протечки $\bar{m}_{\text{нрл}} = 0,0228$ кг/с;

6 – Шероховатость 1 мм, поток протечки $\bar{m}_{\text{нрл}} = 0,0226$ кг/с;

7 – Шероховатость 1,5 мм, поток протечки $\bar{m}_{\text{нрл}} = 0,0228$ кг/с; 8 – 0,5 u

Fig. 5. Change in the circumferential velocity component along the radius in the gap "covering disk – housing"

1 – Surfaces are smooth, there is no leakage in the seals; 2 – Smooth surfaces, leakage flow $\bar{m}_{\text{нрл}} = 0.0285$ kg/s;

3 – Roughness 0.25 mm, leakage flow $\bar{m}_{\text{нрл}} = 0.0219$ kg/s; 4 – Roughness 0.5 mm, leakage flow $\bar{m}_{\text{нрл}} = 0.0223$ kg/s;

5 – Roughness 0.75 mm, leakage flow $\bar{m}_{\text{нрл}} = 0.0228$ kg/s; 6 – Roughness 1 mm, leakage flow $\bar{m}_{\text{нрл}} = 0.0226$ kg/s;

7 – Roughness 1.5 mm, leakage flow $\bar{m}_{\text{нрл}} = 0.0228$ kg/s; 8 – 0.5 u

На рис. 7 показано, как условия движения в зазоре влияют на касательное напряжение трения, определяющее мощность, затрачиваемую на преодоление сопротивления вращению диска.

Касательные напряжения зависят от закрутки потока и меняются по той же закономерности, что и закрутка потока на рис. 4.

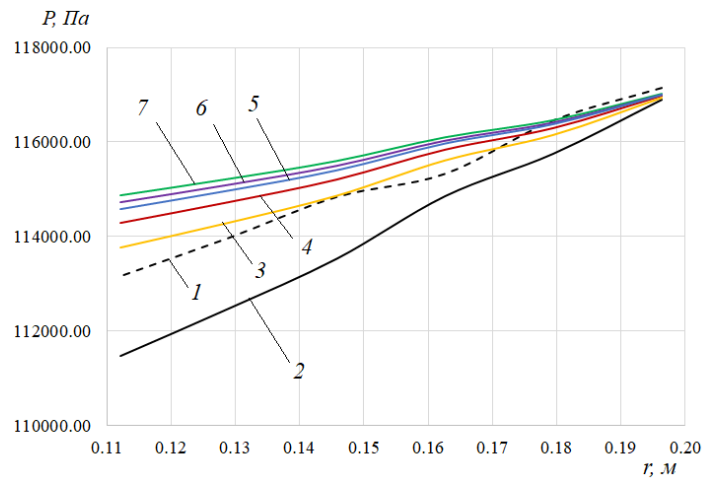


Рис. 6. Изменение статического давления по радиусу в зазоре «покрывающий диск – корпус»
 1 – Поверхности гладкие, нет протечки в ЛУ; 2 – Поверхности гладкие; 3 – Шероховатость 0,25 мм;
 4 – Шероховатость 0,5 мм; 5 – Шероховатость 0,75 мм; 6 – Шероховатость 1 мм; 7 – Шероховатость 1,5 мм

Fig. 6. Change in the static pressure along the radius in the gap "covering disk – housing"
 1 – Surfaces are smooth, there is no leakage in the seals; 2 – Surfaces are smooth; 3 – Roughness 0.25 mm;
 4 – Roughness 0.5 mm; 5 – Roughness 0.75 mm; 6 – Roughness 1 mm; 7 – Roughness 1.5 mm

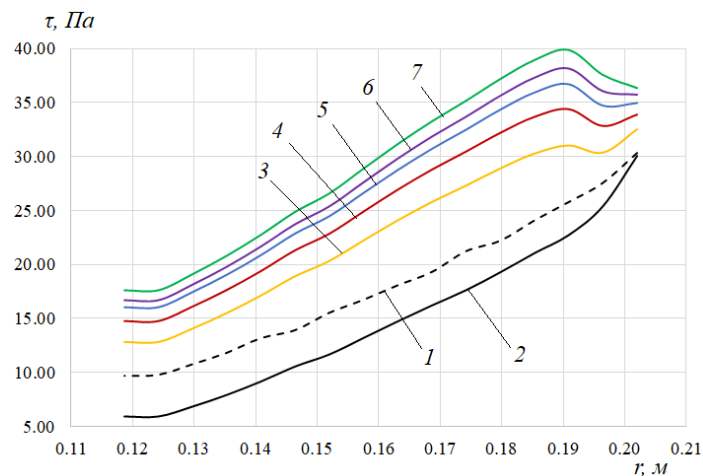


Рис. 7. Изменение касательного напряжения трения по радиусу в зазоре «покрывающий диск – корпус»
 1 – Поверхности гладкие, нет протечки в ЛУ; 2 – Поверхности гладкие; 3 – Шероховатость 0,25 мм;
 4 – Шероховатость 0,5 мм; 5 – Шероховатость 0,75 мм; 6 – Шероховатость 1 мм; 7 – Шероховатость 1,5 мм

Fig. 7. Change in the shear stress along the radius in the gap "covering disk – housing"
 1 – Surfaces are smooth, there is no leakage in the seals; 2 – Surfaces are smooth; 3 – Roughness 0.25 mm;
 4 – Roughness 0.5 mm; 5 – Roughness 0.75 mm; 6 – Roughness 1 mm; 7 – Roughness 1.5 mm

Энергетические соотношения в центробежной компрессорной ступени при CFD – расчете

При анализе влияния шероховатости на эффективность ступени используются следующие зависимости:

– коэффициент внутреннего напора:

$$\psi_i = \frac{h_i}{u_2^2} = \frac{c_p (T_k^* - T_n^*)}{u_2^2}, \quad (2)$$

где h_i – внутренний напор. Температура на входе задана, температура на выходе рассчитана;
– внутренняя мощность:

$$N_i = h_i \times \bar{m}, \quad (3)$$

расход газа задан;

– коэффициент теоретического напора:

$$\psi_T = \frac{c_{u2cp}}{u_2} = \frac{2\pi r_2}{\bar{m} u_2 b_2} \int_0^{b_2} c_{u2} c_{r2} \rho_2 db_2, \quad (4)$$

где b_2 – высота лопатки рабочего колеса на выходе, c_{r2} – расходная компонента абсолютной скорости. Компоненты абсолютной скорости рассчитаны;

– теоретическая мощность:

$$N_T = \psi_T u_2^2 \bar{m}, \quad (5)$$

– сумма коэффициентов щелевых потерь (косвенное определение):

$$\beta_{mp} + \beta_{np} = \frac{h_i}{h_T} - 1, \quad (6)$$

– коэффициент протечки в уплотнении покрывающего диска:

$$\beta_{np} = \frac{\bar{m}_{np}}{\bar{m}}, \quad (7)$$

массовый расход газа через лабиринтное уплотнение $\bar{m}_{np}$ рассчитан;

– мощность трения диска:

$$N_{mp} = \omega M_{mp} = \omega 2\pi \int_{r_1}^{r_2} \tau r^2 dr + \tau_2 \pi D_2 b_{o2} r_2, \quad (8)$$

здесь b_{o2} – ширина цилиндрического участка диска на периферии, D_2 – диаметр выхода из рабочего колеса. Касательные напряжения τ рассчитаны;

– коэффициент трения диска:

$$\beta_{mp} = \frac{N_{mp}}{N_T}, \quad (9)$$

– осевая сила, действующая на рабочее колесо:

$$R_z = 2\pi \int_{r_{вала}}^{r_2} p_{o\partial} dr - 2\pi \int_{r_{вала}}^{r_2} p_{n\partial} dr - p_0^* \frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_{вм}^2) - p_0 \frac{\pi}{4} (D_{л}^2 - D_0^2), \quad (10)$$

где D_0 , $D_{вм}$, $D_{л}$ – диаметр входа в рабочее колесо, втулочный диаметр и диаметр лабиринтных уплотнений покрывающего диска соответственно.

Давление газа в зазорах рассчитано.

Обсуждение

На давление газа в зазоре «корпус — порывающий диск», т.е. на осевую силу, влияет поток протечек в лабиринтном уплотнении. Для дополнительной оценки этого фактора рассчитан вариант «гс-лу0» с гладкими стенками и нулевым зазором в лабиринтном уплотнении. Основные варианты «ш0,5 — 1,5- лу0,25» Для более полного представления о влиянии шероховатости на дисковое трение дополнительно рассчитан вариант с шероховатостью стенок корпуса 1,5 мм в обоих зазорах «ш1,5пд/од-лу0,25». Результаты расчета представлены в таблице.

Таблица 1

Параметры исследованных вариантов ступени

Table 1

Parameters of the studied stage variants

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8
	«гс-лу0»	«гс-лу0,25»	«ш0,25- лу0,25»	«ш0,5- лу0,25»	«ш0,75- лу0,25»	«ш1- лу0,25»	«ш1,5- лу0,25»	ш1,5пд/ од-лу0,25»
η^*	0,865	0,856	0,851	0,849	0,848	0,848	0,847	0,843
Ψ_i	0,495	0,494	0,496	0,497	0,497	0,497	0,497	0,500
Ψ_T	0,477	0,473	0,472	0,472	0,471	0,471	0,471	0,471
$\beta_{mp} + \beta_{np}$ (кв рсч)	0,0377	0,0444	0,0508	0,0529	0,0552	0,0552	0,0552	0,0616
β_{np}	0,0059	0,0173	0,0185	0,0187	0,0190	0,0191	0,0190	0,0182
$\beta_{mp\ од}$	0,0100	0,0087	0,0123	0,0143	0,0144	0,0149	0,0154	0,0155
$\beta_{mp\ од}$	0,0120	0,0143	0,0143	0,0143	0,0143	0,0144	0,0143	0,0189
$\beta_{mp} + \beta_{np}$ (прм рсч)	0,0279	0,0403	0,0451	0,0473	0,0477	0,0484	0,0488	0,0527
$\tau_{ср\ од}$, Па	18,09	14,90	22,75	25,31	27,02	28,00	29,24	29,24
$M_{mp\ од}$, Н·м	0,3192	0,2735	0,3881	0,4510	0,4537	0,4530	0,4862	0,4883
R_z , Н	366,0	473,9	374,6	349,7	334,6	331,5	319,6	446,4
R_z/R_{zz}	0,772	1	0,790	0,747	0,706	0,700	0,674	0,942

При шероховатости 0,25 мм осевая сила уменьшилась на 21% ценой снижения КПД на 0,5% у ступени с коэффициентом расхода $\Phi = 0,0492$. При шероховатости 1,5 мм КПД снизился на 0,9%, а осевая сила уменьшилась на 32,6%.

Специальный расчет показал роль протечки в лабиринтном уплотнении (сопоставление вариантов 1 и 2). При герметичном лабиринтном уплотнении КПД был бы выше на 0,9%, коэффициент теоретического напора выше на 0,8%, осевая сила меньше на 22,8%. При износе лабиринтных уплотнений происходит увеличение осевой силы. Если проблема с несущей способностью упорного подшипника возникает в процессе эксплуатации, причиной может быть увеличение зазора в лабиринтном уплотнении покрывающего диска.

Расчет варианта 8 показал, что при коррозии стенок корпуса в пределах обоих зазоров потери трения на поверхностях тормозят поток, снижают КПД, но практически не влияют на осевую силу.

Неизбежные погрешности численных расчётов демонстрирует сравнение щелевых потерь, рассчитанных двумя способами. Прямой расчет по формулам (7, 9) дает величину $\beta_{mp} + \beta_{np}$ на

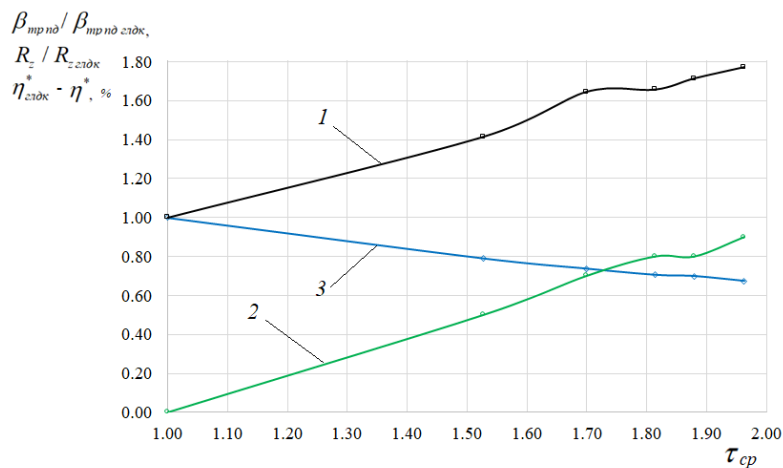


Рис. 8. Влияние касательного напряжения на стенке корпуса на осевую силу, потерю КПД и коэффициенты щелевых потерь

Fig. 8. Influence of shear stress on the housing wall on axial force, efficiency losses and gap losses factors

15 – 30% больше, чем косвенный расчет по формуле (6). Погрешности численного расчёта демонстрируют также выпадающие точки при графическом представлении результатов на рис. 8. Рассчитанные параметры представлены в зависимости от среднего касательного напряжения на стенках зазора у покрывающего диска.

Среднее касательное напряжение рассчитано по формуле

$$\tau_{cp} = \frac{\sum_r \tau \times 2\pi r \Delta r}{\pi(r_2^2 - r_l^2)}. \quad (11)$$

При изменении касательного напряжения вдвое, КПД снижается на 0.9% из-за увеличения щелевых потерь на 80%. Положительный результат – осевая сила уменьшается на 32.6%.

Все представленные на рис. 8 параметры зависят от роста касательного напряжения практически линейно. В зависимости от того, насколько нужно снизить осевую силу, следует выбрать степень торможения закрутки потока в зазоре «корпус – покрывающий диск».

Заключение

В процессе эксплуатации возможна коррозия и загрязнение поверхностей корпуса в зазорах «корпус – рабочее колесо». Согласно расчету, это снижает КПД, но не влияет на осевую силу. Износ лабиринтных уплотнений снижает КПД и заметно увеличивает осевую силу.

Для уменьшения осевой силы у построенного компрессора нужно заменить думмис на думмис большего диаметра. Это увеличит протечки в его лабиринтном уплотнении и снизит объемный КПД. Это можно оценить CFD-расчетом. Возможно, в том или ином конкретном случае уменьшение осевого усилия целесообразно сделать путем торможения закрутки потока в зазоре «корпус – покрывающий диск». Для этого на поверхности корпуса надо сделать радиальные бороздки. CFD-расчет позволит сравнить положительный и отрицательный эффект двух вариантов снижения осевого усилия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Шнепп В.Б.** Конструкция и расчёт центробежных компрессорных машин // М. : Машиностроение, 1995, 240 с.
- [2] **Shnepp V.B.** Computation of axial forces in the centrifugal stage with allowance for leakage through seals. Chemical and Petroleum Engineering, 19(8):318–323, 1983.
- [3] **Белоусов А.И., Иванов А.И.** Расчет осевых сил, действующих в турбомашинах: Учеб. пособие. Куйбышев, 1981. 81 с.
- [4] **Brun K., Simons S., Kurz R., Pinelli M., Morini M., Munari E.** Measurement and Prediction of Centrifugal Compressor Axial Forces During Surge: Part 1 — Surge Force Measurements. ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, GT2017-63061, V009T27A003, 2017.
- [5] **Gulich J.F.** Disc friction losses of closed turbomachine impellers. Forschung im Ingenieurwesen 68 (2003) 87 – 95 Springer-Verlag, 2003.
- [6] **Sokolov N.V., Maksimov T.V., Khadiev M.B., Sagbiev I.R.** Influence of the axial force of the rotor of a centrifugal compressor on the operating of the operation of the thrust bearing. Oil and gas engineering (OGE-2021), AIP Conference Proceedings 2412(1):030047, 2021.
- [7] **Соколов Н.В., Хадиев М.Б., Максимов Т.В., Футин В.А.** Испытания упорного подшипника скольжения с параллельным междуподушечному каналу скосом в центробежном компрессоре // Вестник казанского технологического университета. 2014. Т. 17 № 7, С. 239–244.
- [8] **Беденко К.А., Тисарев А.Ю., Виноградов А.С.** Проблемы расчетного определения осевой силы на радиально-упорный подшипник ротора высокого давления // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: сборник трудов конференции. 2021, Самара, С. 62–63.
- [9] **Галеркин Ю.Б.** Турбокомпрессоры // Монография, Издательство ООО «ИИЦ КХТ», 2010, с. 596.
- [10] **Боровков А.И., Воинов И.Б., Никитин М.А., Галеркин Ю.Б., Рекстин А.Ф., Дроздов А.А.** Моделирование характеристик одноступенчатого центробежного компрессора газоперекачивающего агрегата // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 3. С. 153–175.
- [11] **Галеркин Ю.Б., Маренина Л.Н., Солдатова К.В., Дроздов А.А.** Численное моделирование и оптимизация обратно-направляющих аппаратов центробежных компрессорных ступеней разной быстротходности // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: Материалы 11-ой международной научно-технической конференции. 2021, Омск. С. 77–78.
- [12] **Тё А.М.** Судовые вспомогательные механизмы, системы и устройства: Учеб. пособие. Владивосток. Мор. гос. ун-т, 2013. 208 с.
- [13] **Jin F., Tao R., Wei Z., Wu Y., Xiao R.** Investigation of the axial force on a varying-speed centrifugal pump impeller. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part a Journal of Power and Energy 236(1):095765092110539, 2021.
- [14] **Jin F., Li N., Wei Z., Wu Y., Tao R., Xiao R.** Sensitivity analysis on the influence factor of clearance axial force of a varying-speed centrifugal pump. Journal of Physics Conference Series 2217(1):012001, 2022.
- [15] **Zhang H., Dong W., Chen D.** Numerical analysis of the flow mechanism and axial force characteristics of the cavity in a centrifugal pump with a front inducer. Journal of Vibroengineering 22(5):1210-1227, 2020.
- [16] **Петров А.И., Флидлер Д.В., Флидлер А.В.** Расчет осевого усилия и анализ эффективности разгрузочных устройств для полукрытого рабочего колеса с использованием численного моделирования // Гидравлика. 2018. №1 (5). С. 98–118.
- [17] **Будаев Г.А., Данилов Д.А., Исаев Н.Ю.** Исследования осевой силы на роторе центробежного насоса двухстороннего всасывания при неравномерном износе щелевых уплотнений // Гидравлика. 2021. №12. С. 9–18.
- [18] **Галеркин Ю.Б.** Труды научной школы компрессоростроения Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого // СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. 2021, 332 с.

[19] **Васильев Ю.С., Родионов П.И., Соколовский М.И.** Высокоэффективные центробежные компрессоры нового поколения. Научные основы расчета, разработка методов оптимального проектирования и освоение производства // Промышленность России. 2000. № 10-11. С. 78–85.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГАЛЕРКИН Юрий Борисович — профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.
E-mail: yuri_galerkin@mail.ru

РЕКСТИН Алексей Феликсович — ведущий специалист, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.
E-mail: rekstin2k7@mail.ru

ДРОЗДОВ Александр Александрович — доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.
E-mail: a_drozdi@mail.ru

МАРЕНИНА Любовь Николаевна — старший преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.
E-mail: marenina_ln@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9380-9754>

REFERENCES

- [1] **V.B. Shnepp**, Konstruktsiya i raschet tsentrobezhnykh kompressornykh mashin (Design and calculation of centrifugal compressor machines) // М. : Mashinostroyeniye, 1995, 240 s.
- [2] **V.B. Shnepp**, Computation of axial forces in the centrifugal stage with allowance for leakage through seals. Chemical and Petroleum Engineering, 19(8):318–323, 1983.
- [3] **A.I. Belousov, A.I. Ivanov**, Raschet osevykh sil, deystviyushchikh v turbomashinakh: Ucheb. posobiye. Kuybyshev, 1981. 81 s.
- [4] **K. Brun, S. Simons, R. Kurz, M. Pinelli, M. Morini, E. Munari**, Measurement and Prediction of Centrifugal Compressor Axial Forces During Surge: Part 1 — Surge Force Measurements. ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, GT2017-63061, V009T27A003, 2017.
- [5] **J.F. Gulich**, Disc friction losses of closed turbomachine impellers. Forschung im Ingenieurwesen 68 (2003) 87 – 95 Springer-Verlag, 2003.
- [6] **N.V. Sokolov, T.V. Maksimov, M.B. Khadiev, I.R. Sagbiev**, Influence of the axial force of the rotor of a centrifugal compressor on the operating of the operation of the thrust bearing. Oil and gas engineering (OGE-2021), AIP Conference Proceedings 2412(1):030047, 2021.
- [7] **N.V. Sokolov, M.B. Khadiyev, T.V. Maksimov, V.A. Futin**, Ispytaniya upornogo podshipnika skolzheniya s parallelnym mezhdupodushechnomu kanalu skosom v tsentrobezhnom kompressore // Vestnik kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2014. T. 17 №7, S. 239–244.
- [8] **K.A. Bedenko, A.Yu. Tisarev, A.S. Vinogradov**, Problemy raschetnogo opredeleniya osevoy sily na radialno-upornyy podshipnik rotora vysokogo davleniya // Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroyeniya: sbornik trudov konferentsii. 2021, Samara, S. 62–63.
- [9] **Yu.B. Galerkin**, Turbokompressory (Turbochargers) // Monografiya, Izdatelstvo OOO «IITs KKhT», 2010, s. 596.

- [10] A.I. Borovkov, I.B. Voinov, M.A. Nikitin, Yu.B. Galerkin, A.F. Rekstin, A.A. Drozdov, Modelirovaniye kharakteristik odnostupenchatogo tsentrobezhnogo kompressora gazoperekachivayushchego agregata // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestven-nyye i inzhenernyye nauki. 2018. T. 24, № 3. S. 153–175.
- [11] Yu.B. Galerkin, L.N. Marenina, K.V. Soldatova, A.A. Drozdov, Chislennoye modelirovaniye i optimizatsiya obratno-napravlyayushchikh apparatov tsentrobezhnykh kompressornykh stupeney raznoy bystrokhodnosti // Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i nefte-gazovogo proizvodstva: Materialy 11-oy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. 2021, Omsk. S. 77–78.
- [12] A.M. Te, Sudovyye vspomogatelnyye mekhanizmy, sistemy i ustroystva (Ship auxiliary mechanisms, systems and devices): Ucheb. posobiye. Vladivostok. Mor. gos. un-t, 2013. 208 s.
- [13] F. Jin, R. Tao, Z. Wei, Y. Wu., R. Xiao, Investigation of the axial force on a varying-speed centrifugal pump impeller. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part a Journal of Power and Energy 236(1):0957650921110539, 2021.
- [14] F. Jin, N. Li, Z. Wei, Y. Wu, R. Tao, R. Xiao, Sensitivity analysis on the influence factor of clearance axial force of a varying-speed centrifugal pump. Journal of Physics Conference Series 2217(1):012001, 2022.
- [15] H. Zhang, W. Dong, D. Chen, Numerical analysis of the flow mechanism and axial force characteristics of the cavity in a centrifugal pump with a front inducer. Journal of Vibroengineering 22(5): 1210–1227, 2020.
- [16] A.I. Petrov, D.V. Flidlider, A.V. Flidlider, Raschet osevoy usiliya i analiz effektivnosti razgruzochnykh ustroystv dlya poluotkrytogo rabocheho koleasa s ispolzovaniyem chislennogo modelirovaniya (Calculation of axial force and analysis of the efficiency of unloaders for a semi-open impeller using numerical simulation) // Gidravlika. 2018. №1 (5). S. 98–118.
- [17] G.A. Budayev, D.A. Danilov, N.Yu. Isayev, Issledovaniya osevoy sily na rotore tsentrobezhnogo nasosa dvukhstoronnego vsasyvaniya pri neravnomernom iznose shchelevykh uplot-neniy (Investigation of the axial force on the rotor of a double-suction centrifugal pump with un-even wear of slotted seals) // Gidravlika. 2021. №12. S. 9–18.
- [18] Yu.B. Galerkin, Trudy nauchnoy shkoly kompressorostroyeniya Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta Petra Velikogo (Proceedings of the Scientific School of Com-pressor Engineering of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University) // SPb. : POLITEKh-PRESS. 2021, 332 s.
- [19] Yu.S. Vasilyev, P.I. Rodionov, M.I. Sokolovskiy, Vysokoeffektivnyye tsentrobezhnyye kompressory novogo pokoleniya. Nauchnyye osnovy rascheta, razrabotka metodov optimalnogo proyektirovaniya i osvoeniye proizvodstva (New generation high efficiency centrifugal com-pressors. Scientific basis of calculation, development of methods for optimal design and development of production) // Promyshlennost Rossii. 2000. № 10-11. S. 78–85.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Yuri B. GALERKIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: yuri_galerkin@mail.ru

Aleksey F. REKSTIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: rekstin2k7@mail.ru

Aleksandr A. DROZDOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: a_drozdi@mail.ru

Lyubov N. MARENINA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: marenina_ln@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9380-9754>

Поступила: 18.10.2022; Одобрена: 04.12.2022; Принята: 05.12.2022.
Submitted: 18.10.2022; Approved: 04.12.2022; Accepted: 05.12.2022.

Обзорная статья

УДК 621.386

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28402>



А.А. Синицын¹, И.Г. Ахметова², О.В. Соловьева² ✉

¹ Вологодский государственный университет,
г. Вологда, Россия;

² Казанский государственный энергетический университет,
Казань, Россия

✉ solovyeva.ov@kgeu.ru

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ КОНСТРУКТИВНО ИЗОЛИРОВАННОГО КОРПУСА

Аннотация. Требования, предъявляемые к современным конструкциям, для обеспечения энергоэффективности зданий, необходимо реализовывать с помощью точной диагностики ситуации до непосредственной модернизации здания. В этой работе описываются преимущества неразрушающего теплового контроля для оценки эксплуатационных характеристик зданий и разработки точных проектов энергетической модернизации для жилищного сектора. Инфракрасная диагностика позволяет быстро и качественно оценить эксплуатационные характеристики ограждающих конструкций зданий, выявлять зоны, в которых наблюдаются высокие тепловые потери, для их последующего устранения. В данной статье представлены технические особенности тепловизионной съемки ограждающей конструкции блочно-модульного многоквартирного жилого дома. Для оценки приоритетности мер по модернизации здания, с помощью тепловизионной съемки определяются зоны высоких теплопотерь и низкой эффективности изоляции. Исходя из актуальности и практической значимости строительной термографии при рассмотрении вопросов энергосбережения и энергоэффективности, авторы представили некоторые особенности и результаты внешней и внутренней термографии на примере жилого помещения в многоквартирном доме.

Ключевые слова: энергосбережение, модернизация здания, тепловое инфракрасное излучение, неразрушающий контроль, теплопотери.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания №075-01262-22-01 от 28 января 2022 г. (Дополнительное соглашение 075-03-2022-151/1 с 31 января 2022 года).

Для цитирования:

Синицын А.А., Ахметова И.Г., Соловьева О.В. Анализ эффективности применения современных теплоизоляционных материалов для высокотемпературных трубопроводов // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 4. С. 21–30. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28402>



A.A. Sinitsin¹, I.G. Akhmetova², O.V. Soloveva² ✉

¹ Vologda State University, Vologda, Russia;

² Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

✉ solovyeva.ov@kgeu.ru

NON-DESTRUCTIVE THERMAL CONTROL OF A STRUCTURALLY INSULATED ENCLOSURE

Abstract. The requirements for modern structures to ensure the energy efficiency of buildings must be implemented through an accurate diagnosis of the situation before the actual modernization of the building. This paper describes the benefits of non-destructive thermal testing for evaluating building performance and designing accurate energy retrofit projects for the residential sector. Infrared diagnostics allows you to quickly and accurately assess the performance of building envelopes, identify areas where high heat losses are observed for their subsequent elimination. This article presents the technical features of thermal imaging of the building envelope of a block-modular multi-apartment residential building. To prioritize building modernization measures, thermal imaging identifies areas of high heat loss and low insulation efficiency. Based on the relevance and practical significance of building thermography when considering issues of energy saving and energy efficiency, the authors presented some features and results of external and internal thermography using the example of a dwelling in an apartment building.

Keywords: energy saving, building modernization, thermal infrared radiation, non-destructive testing, heat loss.

Acknowledgements: The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of state task No. 075-01262-22-01 dated January 28, 2022 (Additional agreement 075-03-2022-151/1 dated January 31, 2022).

Citation:

A.A. Sinitsin, I.G. Akhmetova, O.V. Soloveva, Non-destructive thermal control of a structurally insulated enclosure, *Global Energy*, 28 (04) (2022) 21–30, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28402>

Введение. Внедрение новых стандартов в области энергосбережения и повышения энергоэффективности является глобальной проблемой в течение последних 50 лет [1–3]. Валовой внешний продукт и экономика трех крупных государств, таких как Китай, Соединенные Штаты и Россия, в значительной степени основаны на потреблении невозобновляемых энергетических ресурсов. В частности, промышленный сектор и жилые здания Российской Федерации потребляют более половины всех энергоресурсов страны.

Чтобы минимизировать теплопотери в зданиях, были разработаны меры по повышению энергоэффективности [4–9]. Эти меры включают установку энергосберегающего профиля; оснащение помещений радиаторами с индивидуальной системой управления; создание непрерывного контура теплоизоляции; использование специализированных входных дверей с теплоизоляционным профилем, периодическое обследование зданий и сооружений, с использованием современного тепловизионного оборудования для обнаружения температурных аномалий и мостов.

В последние годы эксперты, работающие над вопросами энергосбережения и энергоэффективности, пришли к выводу, что наибольшее количество тепла теряется именно через ограждающие конструкции зданий и сооружений. Поскольку количество технологий для строительства

зданий ограничено, имеет смысл унифицировать методы, используемые для повышения энергосбережения зданий.

Тепловой неразрушающий контроль может быть использован для качественной и количественной оценки уровня тепловой защиты, энергосбережения и энергетической эффективности строительного объекта [10–12]. Тепловизионная съемка – это один из видов теплового неразрушающего контроля. Его преимущества заключаются в точности и надежности полученных результатов; тепловизионная съемка эффективна и универсальна, безопасна и позволяет проводить съемку на удаленном расстоянии от объекта исследования. Тепловизоры можно применять при низких температурах, а для высококачественной обработки термограмм имеются широкие возможности. Термография и тепловизионная съемка нашли широкое практическое применение не только в строительстве, но и в различных отраслях промышленности и производства: в энергетике, металлургии, машиностроении, транспорте, электроснабжении, теплоснабжении и электронике.

В Российской Федерации тепловая визуализация ограждающих конструкций зданий, а также инженерных систем регулируется несколькими нормативными документами^{1,2}. Однако существуют также общие правила и рекомендации. Тепловизионная съемка должна применяться ко всем элементам внешнего ограждения здания [13–17], т.е. стенам с внешними углами, промежуточным этажам, мансардным этажам или покрытиям; окнам, фрамугам и балконным дверям; эркерам, потолкам над проходами и т.д.

Обзор современной научной литературы [18–20] показывает, что среди методов неразрушающего контроля термоконтроль является наилучшим вариантом оценки не только теплозащитных свойств ограждающих конструкций капитального и завершенного строительства различного назначения, но и общего потенциала энергосбережения здания. Применение тепловизионного оборудования в строительстве уже вышло за рамки диагностики только ограждающих конструкций зданий и выявления теплотехнических дефектов. В настоящее время тепловизоры и сопутствующее оборудование активно используются при обследовании инженерных систем жизнеобеспечения и поиске мест расположения технических коммуникаций в стенах и потолках строительных объектов. Также можно выполнить тепловизионную диагностику систем отопления и теплоснабжения зданий.

Постановка задачи

Целью данной работы является тепловизионная диагностика жилой квартиры и выявление теплотехнических дефектов, составление рекомендаций по их устранению.

Материалы и методы

Тепловизионная диагностика была выполнена с помощью тепловизионной камеры Testo 875-2. Полученные данные были обработаны с помощью профессионального программного обеспечения Airsoft. При построении термограмм учитывались следующие параметры тепловизионного изображения: температура воздуха (t , °C), относительная влажность воздуха (ϕ , %), расстояние между линзой устройства и поверхностью исследуемого объекта (R , m), коэффициент излучения материала поверхности объекта ε (взято из справочных данных).

Тепловизионная съемка наружных ограждающих конструкций квартиры была проведена в холодное время года в естественных условиях 21 января 2021 года. Наружная тепловизионная съемка началась в 10 часов утра; внутренняя тепловизионная съемка началась в 11 часов утра были обследованы следующие строительные объекты: стеновые панели, вертикальные и горизонтальные стыки стен, угловые соединения, места примыкания стен к межэтажным перекрытиям.

¹ Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 54852-2011 "Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций", М., 2011, 19 с.

² ISO 6781-1983 Thermal Insulation – Qualitative Detection of Thermal Irregularities in Building Envelopes – Infrared Method.

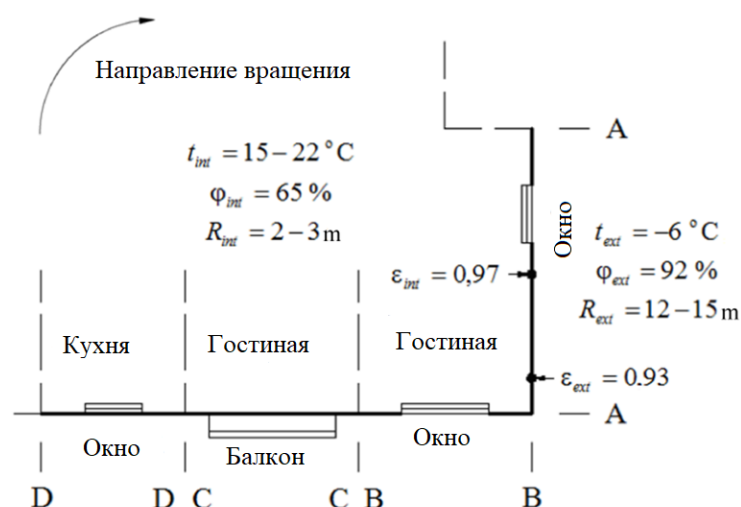


Рис. 1. Принципиальная схема и несколько параметров теплового неразрушающего контроля квартиры:
A – A, B – B, C – C, D – D являются характерными участками (срезами) объекта исследования

Fig. 1. Schematic diagram and several parameters of thermal non-destructive testing of an apartment:
A – A, B – B, C – C, D – D are characteristic sections (slices) of the object of study

Эксперименты проводились в г. Вологда, Российская Федерация. Полномасштабная проверка объекта проводилась при отрицательных наружных температурах и положительных внутренних температурах, при отсутствии осадков, тумана, солнечных бликов и других подобных природных явлений. Погодные условия соответствовали требованиям тепловизионного мониторинга.

Внешняя тепловизионная съемка проводилась при следующих условиях: $t_{ext} = -6^{\circ}\text{C}$, $\phi_{ext} = 92\%$, $R_{ext} = 12-15\text{ м}$, $\varepsilon_{ext} = 0,93$ (цементно-песчаный раствор). Внутренняя тепловизионная съемка проводилась при следующих условиях: $t_{int} = 15-22^{\circ}\text{C}$, $\phi_{int} = 65\%$, $R_{int} = 2-3\text{ м}$, $\varepsilon_{int} = 0,97$ (обои, штукатурка, лакокрасочное покрытие).

Термография наружных ограждающих конструкций проводилась в перпендикулярном направлении к поверхности обследуемого объекта или с отклонением от этого направления, не превышающим 30° угла наклона к горизонтальной плоскости. Тепловизионное изображение было реализовано в виде общего панорамного изображения, охватывающего всю внешнюю поверхность ограждающей конструкции с вертикальными и горизонтальными швами. Обследование проводилось последовательно вдоль обозначенных участков с покадровой записью термограмм в энергонезависимой памяти тепловизора.

На рис. 1 показана принципиальная схема теплового неразрушающего контроля квартиры. Результаты тепловизионной съемки представлены в табл. 1.

Результаты

В табл. 1 приведены результаты локальной тепловизионной съемки ограждающих конструкций квартиры в блочно-модульном панельном многоквартирном доме.

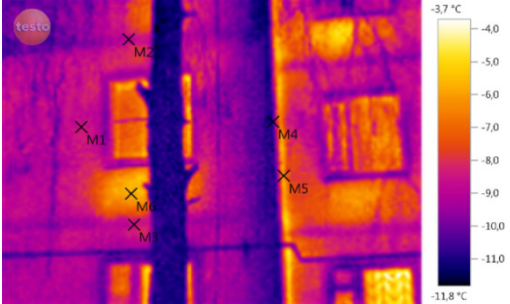
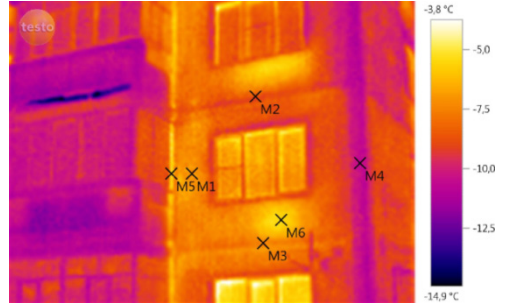
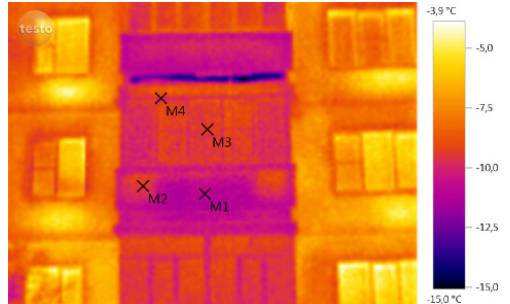
Проанализировав данные из табл. 1, мы сформулировали перечень выводов и рекомендаций по устранению выявленных теплотехнических дефектов. Внешняя тепловизионная съемка. На кадрах №1 (М2 – М4), №2 (М2 – М4) и №4 (М2) показано, что горизонтальные и вертикальные межэтажные перекрытия ограждающих конструкций обследованного объекта однородны по температурному полю и не содержат тепловых дефектов. Никаких тепловых дефектов в стеновых панелях, показанных на кадрах №1 (М1), №2 (М1) и №4 (М1), обнаружено не было. Анализ термограмм показал, что для участков №1 (М1), №2 (М1) и №4 (М1) температура поверхности сое-

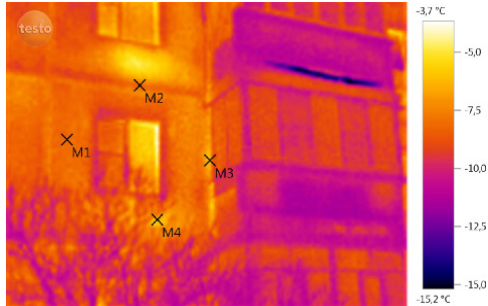
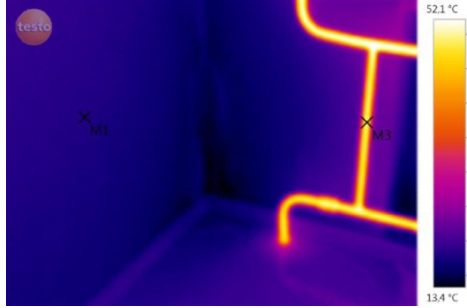
Таблица 1

**Локальная тепловизионная съемка ограждающих конструкций квартиры
в блочно-модульном панельном многоквартирном доме**

Table 1

**Local thermal imaging of the enclosing structures of an apartment
in a block-modular panel apartment building**

Участок	Фотография обследованного участка	Термограмма исследуемого участка
Внешняя тепловизионная съемка		
A–A		
Участок No.1 M1: -8.4°C; M2: -8.9°C; M3: -8.7°C; M4: -10.9°C; M5: -6.2°C; M6: -5.7°C. M1, M2, M3, M4: никаких дефектов; M5: мостик холода в области вертикального стыка панельных плит (внешняя теплоизоляция с использованием напыляемого пенополиуретана с защитным покрытием и (или) термокраской); M6: чрезмерные потери тепла в области ниши нагревателя.		
B–B		
Участок No.2 M1: -7.2°C; M2: -8.5°C; M3: -7.5°C; M4: -10.5°C; M5: -5.3°C; M6: -5.4°C. M1, M2, M3, M4: никаких дефектов; M5: мостик холода в области вертикального стыка панельных плит (внешняя теплоизоляция с использованием напыляемого пенополиуретана с защитным покрытием и (или) термокраской); M6: чрезмерные потери тепла в области ниши обогревателя.		
C–C		

	Участок No.3 M1: -11.0°C; M2: -9.2°C; M3: -9.5°C; M4: -9.8°C. M1, M3, M4: никаких дефектов; M2: незначительный мостик холода (установка теплоизоляционных плит или панелей для балконов и лоджий, например, из пенополиуретана или минеральной ваты).	
D-D		
	Участок No.4 M1: -8.0°C; M2: -8.0°C; M3: -6.4°C; M4: -5.9°C. M1, M2: никаких дефектов; M3: мостик холода в области вертикального стыка панельных плит (внешняя теплоизоляция с использованием напыляемого пенополиуретана с защитным покрытием и (или) термокраской); M4: чрезмерные потери тепла в области ниши нагревателя.	
LR		
	Участок No.5 M1: 19.4°C; M2: 17.3°C; M3: 18.7°C; M4: 18.0°C; M5: 48.9°C. M1, M3, M4: никаких дефектов; M2: низкая температура поверхностного излучения; M5: потери тепла в помещение через трубы системы водяного отопления.	
		
	Участок No.6 M1: 18.1°C; M2: 13.7°C; M3: 49.4°C. M1: никаких дефектов; M2: Область возможного образования конденсата (температура точки росы $t_{\text{dew}} = 14.2^{\circ}\text{C}$); M3: потери тепла в помещение через трубы системы водяного отопления.	

динения в среднем ниже температуры самих панелей на $0,1-0,5^{\circ}\text{C}$. Также видно, что для участков №1 (М5), №2 (М5) и №4 (М3) вертикальные швы недостаточно герметичны, и поэтому их уровень тепловой защиты сравнительно ниже.

Области максимальных теплопотерь в подоконных зонах помещения четко прослеживаются на участках №1 (М6), №2 (М6) и №4 (М4), что можно объяснить существующей компоновкой отопительных приборов в жилом здании. На участке №3 (М2) также был обнаружен незначительный мостик холода из-за низкого уровня тепловой защиты этой области ограждающей конструкции.

Внутреннее тепловизионное изображение. Сравнительный анализ внешних и внутренних тепловизионных изображений контролируемого объекта (кадры № 1 и № 5, № 2 и № 6) показал, что нет необходимости сравнивать выявленные внутренние и внешние тепловые дефекты внешних ограждающих конструкций контролируемого объекта, поскольку они имеют разное происхождение. Мостики холода снаружи и внутри квартиры расположены не в одних и тех же точках отсчета (например, участки № 2 (М4) и № 6 (М2)).

Область потенциального образования конденсата была обнаружена на кадре № 6 (М2), поскольку температура в этих контрольных точках равна или ниже возможной температуры точки росы $t_{\text{dew}} = 14,2^{\circ}\text{C}$. Здесь наиболее вероятной причиной является техническое ухудшение качества теплоизоляции наружных ограждающих конструкций здания. Это обусловлено, во-первых, сроком эксплуатации строительного объекта, а во-вторых, несоответствием теплотехнических характеристик внешних ограждающих конструкций уровню тепловой защиты здания для условий города Вологда.

Таким образом, в холодный период года наружная стена промерзает, установленные стеклопакеты с ПВХ-оболочкой повышают относительную влажность внутреннего воздуха, а накопленное тепло в помещении вызывает образование конденсата. Точка росы становится выше при более высокой внутренней температуре и относительной влажности воздуха. Следовательно, наружная стена, и особенно нижнее стыковое соединение панелей (верхнее соединение дополнительно нагревается воздухом помещения за счет конвективной теплопередачи от нагревательных приборов, стояков и соединений), при низкой температуре наружного воздуха может иметь фактическую температуру, сопоставимую с температурой точки росы. Эти условия обычно приводят к образованию конденсата и плесени. Образования плесени вызывают процессы биокоррозии и биodeградации материалов.

Обсуждение

Авторы обладают многолетним практическим опытом в области тепловизионных исследований, который был использован для разработки перечня возможных мер по устранению явных или скрытых внутренних тепловых дефектов ограждающих конструкций:

1. Всесторонний технический осмотр межпанельных швов.
2. Внешняя теплоизоляция стен путем напыления пенополиуретана с защитным покрытием и (или) нанесения термомаски.
3. Антисептическая обработка мест образования плесени (например, с помощью Fongifluid).
4. Гидроизоляция внутренних поверхностей наружных стен (например, полижидкостью) или нанесение грунтовки глубокого проникновения на проблемные участки.
5. Внутренняя герметизация межпанельных швов пенополиуретаном (однокомпонентный пенополиуретановый герметик, например, Macroflex).
6. Установка оконных вентиляционных клапанов (например, Air-Box Comfort) и (или) очистка вентиляционных каналов (для кухни).

Оценка технического состояния обследованных ограждающих конструкций квартиры блочно-модульного панельного многоквартирного жилого дома (физико-механические свойства

железобетона, наличие или отсутствие слоя теплоизоляции, его фактические тепловые характеристики и т.д.) может быть выполнена с использованием дополнительной экспертизы, которая включает в себя работы по вскрытию и демонтажу конструкции, лабораторный анализ образцов и т.д.

Повторное тепловизионное обследование, проведенное после тепловой реконструкции проблемных зон здания, позволит оценить энергоэффективность мероприятия. В свою очередь, расчет технико-экономического эффекта мероприятий, направленных на локализацию тепловых дефектов, выявленных в результате тепловизионной диагностики, основан на определении годовой разницы в потреблении тепла зданием до и после ремонта.

Заключение

Тепловизионная диагностика строительного объекта является важным элементом теплотехнической части энергетического обследования, предназначенным для измерения и контроля фактического температурного поля поверхности излучения, которое может включать внешние ограждающие конструкции, внутренние источники тепла (система отопления) и т.д.

Авторы работы на примере жилой квартиры действующего объекта завершеного строительства показывают некоторые методические и инженерные особенности и преимущества тепловизионных съемок, которые в последнее время стали актуальными и востребованными на рынке строительной недвижимости. Проанализированы выявленные теплотехнические дефекты и предложены рекомендации по их устранению.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Owen G.** Energy efficiency and energy conservation: Policies, Programmes and their effectiveness // *Energy & Environment*. 2000. Т. 11. № 5. С. 553–564.
- [2] **Vera I., Langlois L.** Energy indicators for sustainable development // *Energy*. 2007. Т. 32. 6 С. 875–882.
- [3] **Wagner O., Götz T.** Presentation of the 5Ds in energy policy: a policy paper to show how Germany can regain its role as a pioneer in energy policy // *Energies*. 2021. Т. 14. № 20. С. 6799.
- [4] **Biswas K., Shrestha S., Hun D., Atchley J.** Thermally anisotropic composites for improving the energy efficiency of building envelopes // *Energies*. 2019. Т. 12. № 19. С. 3783, 12.
- [5] **Economidou M., Todeschi V., Bertoldi P., D'Agostino D., Zangheri P., Castellazzi L.** Review of 50 2022s of EU energy efficiency policies for buildings // *Energy and Buildings*. 2020. Т. 225. С. 11032.
- [6] **Pisello A. L., Castaldo V. L., Rosso F., Piselli C., Ferrero M., Cotana F.** Traditional and innovative materials for energy efficiency in buildings // *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications Ltd. 2016. Т. 678. С. 14–34.
- [7] **da Cunha S.R.L., de Aguiar J.L.B.** Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge // *Journal of Energy Storage*. 2020. Т. 27. С. 101083.
- [8] **Michailidis I.T., Sangi R., Michailidis P., Schild T., Fuettere J., Mueller D., Kosmatopoulos E.B.** Balancing energy efficiency with indoor comfort using smart control agents: a simulative case study // *Energies*. 2020. Т. 13. № 23. С. 6228.
- [9] **Kwiatkowski J., Rucińska J.** Estimation of energy efficiency class limits for multi-family residential buildings in Poland // *Energies*. 2020. Т. 13. №. 23. С. 6234.
- [10] **Tabatabaei S.A., Van der Ham W., CA Klein M., Treur J.** A data analysis technique to estimate the thermal characteristics of a house // *Energies*. 2017. Т. 10. № 9. С. 1358.
- [11] **Chowdhury D., Neogi S.** Thermal performance evaluation of traditional walls and roof used in tropical climate using guarded hot box // *Construction and Building Materials*. 2019. Т. 218. С. 73–89.
- [12] **Lu X., Memari A.** Application of infrared thermography for in-situ determination of building envelope thermal properties // *Journal of Building Engineering*. 2019. Т. 26. С. 100885.

- [13] Garrido I., Lagüela S., Otero R., Arias P. Thermographic methodologies used in infrastructure inspection: A review—Post-processing procedures // *Applied Energy*. 2020. T. 266. С. 114857.
- [14] Bayomi N., Nagpal S., Rakha T., Fernandez J.E. Building envelope modeling calibration using aerial thermography // *Energy and Buildings*. 2021. T. 233. С. 110648.
- [15] Шойхет Б.М. СП 61.13330. 2012 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов»: правила расчета и проектирования // *Научное обозрение*. 2013. №. 9. С. 138–141.
- [16] Павлов М.В., Карпов Д.Ф., Князев В.А. Качественно-количественный анализ тепловых изображений в строительной термографии // *Научный журнал «Вестник ВоГУ. Серия: Технические науки»*. Вологда: ВоГУ. 2019. №. 4. С. 6.
- [17] Карпов D. The algorithm of complex diagnostics of technical condition of building structures on thermograms analysis // *Constr. Mater. Prod*. 2020. № 2. С. 23.
- [18] Соловьева А., Соловьев С. Reliability analysis of rhs steel trusses joints based on the p-boxes approach // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. T. 17. № 1. — С. 87–97.
- [19] Карпов D.F. Application of active and passive thermal control in defectoscopy of construction materials and products, filler structures of buildings and constructions // *Stroitel'nye materialy i izdeliya* [Construction Building Materials and Products]. 2019. T. 2. № 4. С. 39–44.
- [20] Карпов Д.Ф. Тепловые методы и средства контроля теплопроводности термокраски // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2019. № 2. С. 61–68, 61.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СИНИЦЫН Антон Александрович — *заведующий кафедрой Теплогазоводоснабжения, Вологодский государственный университет, канд. техн. наук.*
E-mail: sinitsyn.science@mail.ru

АХМЕТОВА Ирина Гареевна — *проректор по развитию и инновациям, Казанский государственный энергетический университет, д-р техн. наук.*
E-mail: irina_akhmetova@mail.ru

СОЛОВЬЕВА Ольга Викторовна — *доцент, Казанский государственный энергетический университет, канд. физ.-мат. наук.*
E-mail: solovyeva.ov@kgeu.ru

REFERENCES

- [1] G. Owen, Energy efficiency and energy conservation: Policies, Programmes and their effectiveness // *Energy & Environment*. 2000. T. 11. № 5. S. 553–564.
- [2] I. Vera, L. Langlois, Energy indicators for sustainable development // *Energy*. 2007. T. 32. 6 S. 875–882.
- [3] O. Wagner, T. Götz, Presentation of the 5Ds in energy policy: a policy paper to show how Germany can regain its role as a pioneer in energy policy // *Energies*. 2021. T. 14. № 20. S. 6799.
- [4] K. Biswas, S. Shrestha, D. Hun, J. Atchley, Thermally anisotropic composites for improving the energy efficiency of building envelopes // *Energies*. 2019. T. 12. № 19. S. 3783, 12.
- [5] M. Economidou, V. Todeschi, P. Bertoldi, D. D'Agostino, P. Zangheri, L. Castellazzi, Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings // *Energy and Buildings*. 2020. T. 225. S. 11032.

- [6] A.L. Pisello, V.L. Castaldo, F. Rosso, C. Piselli, M. Ferrero, F. Cotana, Traditional and innovative materials for energy efficiency in buildings // *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications Ltd. 2016. T. 678. S. 14–34.
- [7] S.R.L. da Cunha, J.L.B. de Aguiar, Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge // *Journal of Energy Storage*. 2020. T. 27. S. 101083.
- [8] I.T. Michailidis, R. Sangi, P. Michailidis, T. Schild, J. Fuettere, D. Mueller, E.B. Kosmatopoulos, Balancing energy efficiency with indoor comfort using smart control agents: a simulative case study // *Energies*. 2020. T. 13. № 23. S. 6228.
- [9] J. Kwiatkowski, J. Rucińska, Estimation of energy efficiency class limits for multifamily residential buildings in Poland // *Energies*. 2020. T. 13. № 23. S. 6234.
- [10] S.A. Tabatabaei, W. Van der Ham, M. CA Klein, J. Treur, A data analysis technique to estimate the thermal characteristics of a house // *Energies*. 2017. T. 10. № 9. S. 1358.
- [11] D. Chowdhury, S. Neogi, Thermal performance evaluation of traditional walls and roof used in tropical climate using guarded hot box // *Construction and Building Materials*. 2019. T. 218. S. 73–89.
- [12] X. Lu, A. Memari, Application of infrared thermography for insitu determination of building envelope thermal properties // *Journal of Building Engineering*. 2019. T. 26. S. 100885.
- [13] I. Garrido, S. Lagüela, R. Otero, P. Arias, Thermographic methodologies used in infrastructure inspection: A review—Post-processing procedures // *Applied Energy*. 2020. T. 266. S. 114857.
- [14] N. Bayomi, S. Nagpal, T. Rakha, J.E. Fernandez, Building envelope modeling calibration using aerial thermography // *Energy and Buildings*. 2021. T. 233. S. 110648.
- [15] B.M. Shoykhet, SP 61.13330. 2012 «Teplovaya izolyatsiya oborudovaniya i truboprovodov»: pravila rascheta i proyektirovaniya // *Nauchnoye obozreniye*. 2013. № 9. S. 138–141.
- [16] M.V. Pavlov, D.F. Karpov, V.A. Knyazev, Kachestvenno-kolichestvennyy analiz teplovykh izobrazheniy v stroitel'noy termografii // *Nauchnyy zhurnal «Vestnik VoGU. Seriya: Tekhnicheskiye nauki»*. Vologda: VoGU. 2019. № 4. S. 6.
- [17] D. Karpov, The algorithm of complex diagnostics of technical condition of building structures on thermograms analysis // *Constr. Mater. Prod*. 2020. № 2. S. 23.
- [18] A. Solovyeva, S. Solovyev, Reliability analysis of rhs steel trusses joints based on the p-boxes approach // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. T. 17. № 1. — S. 87–97.
- [19] D.F. Karpov, Application of active and passive thermal control in defectoscopy of construction materials and products, filler structures of buildings and constructions // *Stroitel'nye materialy i izdeliya [Construction] Building Materials and Products*. 2019. T. 2. № 4. S. 39–44.
- [20] D.F. Karpov, Teplovyye metody i sredstva kontrolya teploprovodnosti termokraski // *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2019. № 2. S. 61–68, 61.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Anton A. SINITSIN — *Vologda State University*.
E-mail: sinitsyn.science@mail.ru

Irina G. AKHMETOVA — *Kazan State Power Engineering University*.
E-mail: irina_akhmetova@mail.ru

Olga V. SOLOVEVA — *Kazan State Power Engineering University*.
E-mail: solovyeva.ov@kgeu.ru

Поступила: 03.11.2022; Одобрена: 08.12.2022; Принята: 09.12.2022.
Submitted: 03.11.2022; Approved: 08.12.2022; Accepted: 09.12.2022.

Данный материал был ранее опубликован. Ссылка для цитирования: С. Гриффитс, Дж. Уратани. Низкоуглеродное топливо на основе аммиака. 3-й ежегодный доклад Ассоциации "Глобальная энергия". С 4–19. Оригинальный полный текст доклада доступен по ссылке: https://globalenergyprize.org/ru/wp-content/uploads/2022/06/02545_22_brosh_GlobalEnergy_block_preview-2.pdf

С. Гриффитс, Дж. Уратани

Университет науки и технологий Халифа,
Абу Даби, ОАЭ

НИЗКОУГЛЕРОДНОЕ СУДОВОЕ АММИАЧНОЕ ТОПЛИВО

Введение. Около 90% продаваемых товаров зависят от морских перевозок как основного вида транспорта, и, по оценкам ОЭСР, к 2050 году морская торговля может увеличиться в три раза [1]. По данным ЮНКТАД, в 2019 году объемы морской торговли достигли 11,08 млрд тонн, и, хотя начавшаяся в 2020 году пандемия COVID-19 привела к его снижению на 4,1%, восстановление морских перевозок в 2021 году должно привести, согласно данным последнего отчета ЮНКТАД о морском транспорте, к увеличению объемов торговли на 4,8%, [2].

Хотя морской транспорт остается наиболее энергосберегающим и экономичным способом перемещения больших объемов товаров по всему миру (разбивка по типам товаров, перевезенных в 2019 году, представлена на рис. 1, сам размер этого сектора означает, что связанные с ним выбросы по-прежнему значительны).

По оценкам Международной морской организации (ИМО), в 2018 году выбросы парниковых газов на морском транспорте составили 1076 Мт CO_2 , экв, или 2,89% от всех антропогенных выбросов парниковых газов, а сопутствующее потребление энергии составило 9,1 ЭДж [3]. Текущие прогнозы ИМО для «инерционного сценария» (BAU), выполненные с учетом будущего спроса на морские перевозки, состава флота и топливного баланса, показывают, что выбросы CO_2 в 2050 году могут составить 90–130% от базовых значений 2008 года (что эквивалентно 100–150% от значений 2018 года). Эти значения согласуются с проведенными МАЭ оценками BAU сценария, согласно которым выбросы CO_2 в секторе морских перевозок в 2050 году составят 135% от значений 2018 года [4].

В то время как сектор воздушных перевозок, относящийся к еще одному виду транспорта, «слабо поддающемуся декарбонизации», недавно объявил о намерениях по достижению к 2050 году углеродной нейтральности в масштабах всей отрасли [5], морской сектор пока не ставил таких целей. Хотя отрасли морских грузоперевозок в отдельных странах (например, в таких странах Северной Европы, как Дания и Норвегия) объявили о намерениях по достижению углеродной нейтральности к 2050 году [6], текущие цели ИМО по сокращению выбросов парниковых газов по-прежнему предполагают (как показано на рис. 2) наличие выбросов в этом секторе в среднесрочной перспективе (т. е. сокращение выбросов CO_2 на 40% к 2030 году и на 70% к 2050 году, а также сокращение общих выбросов парниковых газов до 50% к 2050 году по сравнению с базовым уровнем 2008 года).

Для достижения целей по ограничению повышения средней глобальной температуры к концу этого века не более, чем на 1,5°C по сравнению с доиндустриальными уровнями, необходимо ускорение декарбонизации сектора морских перевозок, что потребует быстрых действий со стороны политиков, промышленных компаний и разработчиков технологий. Более того, если ИМО

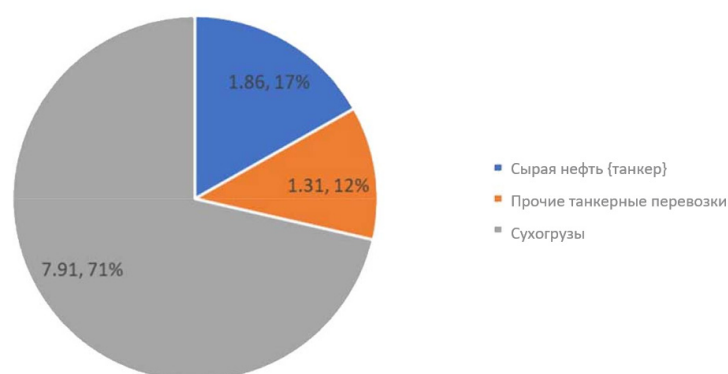
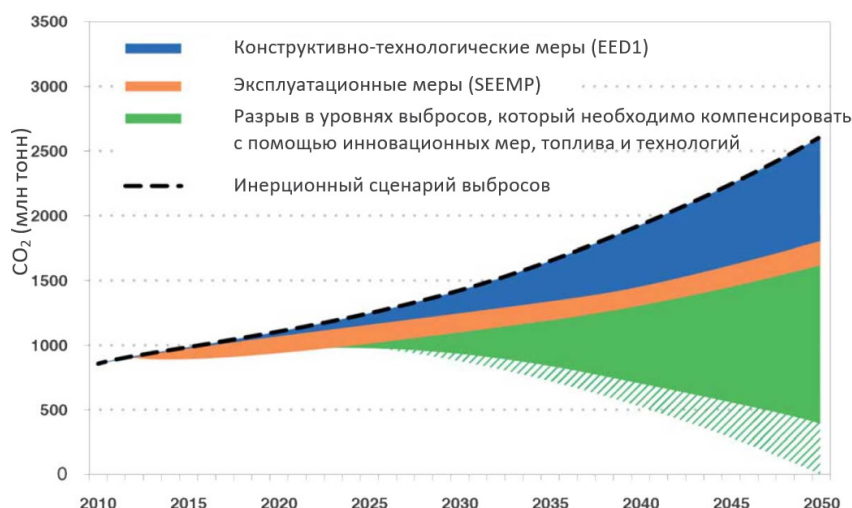


Рис. 1. Виды грузов, перевезенных морским транспортом в 2019 году (млрд тонн) [2]



Примечание: EEDI – Показатель проектируемой энергоэффективности; SEEMP – План управления энергоэффективностью судов. Текущие цели по сокращению выбросов показаны зеленым цветом, а область с зеленой штриховкой соответствует целям по достижению углеродной нейтральности к 2050 году [7]

Рис. 2. График сокращения общих выбросов парниковых газов, предлагаемый для достижения амбициозных целей ИМО

примет решение о достижении к 2050 году целевых показателей, соответствующих углеродной нейтральности (о чем свидетельствуют недавно принятые отраслевые и национальные обязательства [8]), то, вероятно, потребуется пакет решений по эффективной декарбонизации сектора морских перевозок.

Среди них ключевым решением является переход на декарбонизированное топливо (с соответствующим развитием производства топлива, инфраструктуры снабжения и совместимых силовых установок), позволяющие сократить прямые выбросы (табл. 1). В настоящее время различные виды декарбонизированного топлива, такие как биотопливо, электричество (например, электротопливо и системы аккумуляторов – топливных элементов), низкоуглеродный водород (и его производные, такие как аммиак и метанол), все еще рассматриваются и остаются многообещающими вариантами. Наиболее перспективными из них для использования в качестве судового топлива являются водород и, в особенности, аммиак. Поэтому в следующих разделах мы более подробно рассматриваем декарбонизированный аммиак как топливо для морских перевозок.

Таблица 1

**Обзор потенциальных сокращений выбросов
и ключевых характеристик альтернативных видов судового топлива [9]**

Потенциальное топливо	Максимальный потенциал сокращения выбросов парниковых газов (%)	Текущая стоимость топлива (\$/ГДж)	Углеродная эффективность (\$/t _{CO2})	Совместимость с существующими силовыми установками
СПГ	10%	7,1	340,1	Требуется газовый или двухтопливный двигатель, а также соответствующее криогенное хранилище
Био-СПГ	169% ^a	113	49,5	
Метанол	92%	28,7	305,3	Не синтетическое топливо, совместимо с модернизированными ДВС
Аммиак	79% ^b / 100% ^c	31,9	400,5	Совместимо с ДВС (искровое зажигание в сочетании с водородом или двухтопливный двигатель с запальным дизельным топливом)
Водород	95% ^b / 100% ^c	89,2	1,028,7	Совместим с ДВС (искровое зажигание или двухтопливный двигатель с запальным дизельным топливом), требует использования компрессоров или криогенного хранилища
FAME	84%	17,0	174,0	Синтетическое топливо (смесь < 20% FAME с ископаемым HVO)
БИО-мазут	91%	17,2	163,3	Синтетическое топливо (смесь или чистое)

Примечание: ^a – при использовании в процессе производства BECCS (биоэнергии с улавливанием и хранением углерода) возможны отрицательные выбросы; ^b – использование биологического синтеза; ^c – химический синтез с использованием возобновляемой или углеродно-нейтральной электроэнергии; СПГ – сжиженный природный газ; FAME – метиловые эфиры жирных кислот; HVO – мазут; ДВС – двигатель внутреннего сгорания.

Технология

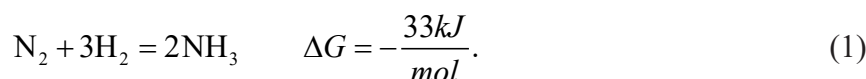
Использование аммиака в качестве энергоносителя предлагается в тех случаях, когда перво-степенное значение имеет плотность энергии (т. е. количество полезной энергии на единицу массы и/или единицу объема), а прямая электрификация проблематична из-за недостатков, прису-щих нынешним технологиям получения аккумуляторов. Несмотря на недавние достижения по применению аккумуляторных технологий для хранения электроэнергии, у химического способа хранения энергии плотность энергии по-прежнему на несколько порядков выше и, таким обра-зом, он представляет собой более конкурентоспособный вариант для транспортировки тяжелых грузов на большие расстояния. В качестве потенциального химического топлива рассматрива-ются возобновляемые виды топлива (как углеродсодержащие виды топлива, так и топливо, не содержащих углерода), а их окончательная классификация зависит от способа их получения.

Согласно сценарию МЭА (NZE2050) по достижению углеродной нейтральности к 2050 году около одной трети потребности в водороде может быть связано с производством таких видов во-дородного топлива, как аммиак, синтетический керосин и синтетический метан. Этот специфи-ческий для транспорта спрос соответствует увеличению потребности с текущего значения, рав-ного, примерно, 20 тыс. тонн H₂/год, до более чем 100 млн тонн H₂/год к 2050 году [10]. Расшире-ние вариантов использования аммиака помимо применения его в химическом секторе (в первую

очередь для производства удобрений) наиболее заметно на морском транспорте (в частности, для дальних перевозок), где до 45% мирового спроса на судовое топливо может быть удовлетворено, согласно сценарию NZE2050, за счет аммиака.

Предпочтительным видом топлива для морских перевозок является аммиак. Это связано с тем, что его плотность энергии соответствует 23 МДж/кг и сравнима с плотностью энергии ископаемого топлива, такого как СПГ (55 МДж/кг) и бункерное топливо (т. е. мазут, 30–40 МДж/кг). Несмотря на то, что сам водород имеет гораздо более высокую плотность энергии на единицу массы (142 МДж/кг), объемная плотность энергии водорода в условиях окружающей среды составляет всего 13 МДж/м³, что составляет лишь незначительную часть от объемной плотности энергии мазута, равной 41500 МДж/м³ [11]. Сжижение водорода для достижения объемной плотности энергии значения 10039 МДж/м³ требует охлаждения водорода до температуры –253°С, что требует значительных затрат энергии. С другой стороны, аммиак можно сжижать, охладив его при атмосферном давлении до –33°С. Полученная в результате жидкость имеет объемную плотность энергии 15600 МДж/м³, что делает аммиак более пригодным для использования, чем водород, в тех случаях, когда требуется высокая объемная плотность энергии, например, при его использовании в качестве судового топлива [12]. В табл. 2 обобщены основные характеристики альтернативных видов низкоуглеродного судового топлива, которые в настоящее время исследуются для применения в секторе морского транспорта.

Промышленное производство аммиака — это устоявшийся процесс, разработанный в начале 20 века. Наиболее широко распространенный и технологически совершенный способ его производства основан на использовании процесса Габера-Боша, в котором чистый газообразный азот (N₂) объединяется в реакторе с газообразным водородом (H₂) в присутствии катализатора и в условиях высокой температуры и давления. Это экзотермическая (т. е. с выделением энергии) термодинамически выгодная реакция, представленная следующим идеальным уравнением:



В реальности, основные реакции, связанные с производством аммиака, сжиганием топлива и использованием топливных элементов, можно описать следующим образом [18]:

Традиционный синтез аммиака Габера-Боша:



Синтез возобновляемого аммиака:



Сжигание аммиака (использование в двигателях внутреннего сгорания, ДВС):



Разложение аммиака (использование в топливных элементах):



Внимание к аммиаку в качестве судового топлива связано с отсутствием выбросов CO₂ при его сжигании в качестве топлива в двигательных установках. Однако важно подчеркнуть необхо-

димось учета всех выбросов в производственном цикле, используемом для получения аммиака, поскольку в противном случае учет связанных с ним выбросов CO_2 просто перемещаются вверх по потоку к точке производства топлива.

Газообразный азот для аммиака обычно получают из атмосферы с помощью воздухоразделительной установки (ASU), водородный реагент традиционно получают с использованием обычных ископаемых источников. Около 95% мирового производства аммиака зависит от ископаемого топлива, при этом 72% мирового производства аммиака связано с использованием водорода, полученного из природного газа посредством парового риформинга метана (SMR), а для 22% мирового производства аммиака используется водород, полученный при газификации угля (основным производителем метана по данной технологии является Китай) [19]. Водород, полученный при риформинге природного газа, часто называют серым водородом, тогда как водород, полученный из угля, называют коричневым или черным в зависимости от источника угля.

Производство аммиака с низким и даже нулевым углеродным следом может быть достигнуто за счет перехода на использование низкоуглеродных и возобновляемых источников энергии для разделения, нагрева, фильтрации и очистки воздуха, а также использования голубого водорода (т.е. серого, коричневого или черного водорода в сочетании с CCUS — технологиями улавливания, использования и хранения углерода), зеленого водорода (получаемого, например, путем электролиза воды с использованием возобновляемых источников энергии), бирюзового водорода (получаемого, например, при расщеплении метана посредством пиролиза) или розового водорода (например, с применением электролиза воды с использованием атомной энергии). Низкоуглеродный водород, к которому в контексте данной работы относится водород с нулевым углеродным следом, может также производиться из органической фракции твердых бытовых отходов (OF-MSW), на очистных сооружениях (WWTP) или с помощью биоэлектрохимических систем, таких как микробные топливные элементы (MFC). Однако в настоящее время такие способы биологического синтеза аммиака не относятся к основным технологиям, применяемым в промышленном производстве аммиака.

Таким образом, основные альтернативы промышленному производству аммиака подразделяются, как правило, по «цвету» водорода, используемого в синтезе Габера-Боша: зеленый водород из возобновляемых источников энергии позволяет получать так называемый «зеленый аммиак», а голубому водороду из ископаемых источников в сочетании с технологиями улавливания, использования и хранения углерода (CCUS) соответствует «голубой аммиак». Эти две разновидности производства низкоуглеродного аммиака показаны на рис. 2 и 3 соответственно. При использовании в процессе производства голубого водорода таких технологий CCUS, как повышение нефтеотдачи (EOR) и/или производство синтетических углеводородов (например, синтез метанола), позволяющих получать другие продукты с добавленной стоимостью (рис. 3), голубой аммиак, получаемый из этого водорода не будет действительно углеродно-нейтральным. Если желательным продуктом является безуглеродный аммиак, то в производстве необходимо использовать зеленый водород (в соответствии с концепцией «power-to-X», рис. 4).

Для водорода и аммиака уже имеются инфраструктуры для их передачи, хранения и распределения, поскольку первый в настоящее время используется, в основном, в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, а второй является одним из основных продуктов (около 175 млн т/год) химического производства и применяется, в частности, в производстве удобрений [22]. Хотя более широкое использование любого из этих энергоносителей в качестве топлива потребует дополнительных инвестиций в специализированную инфраструктуру, наличие возможностей по преобразованию или перепрофилированию существующих силовых установок и инфраструктуры на основе сжиженного нефтяного газа (СНГ) в системы на основе аммиака склоняет чашу весов в пользу последнего варианта [23]. Кроме того, двигатели, способные работать на аммиаке, смешанным с обычным углеводородным топливом (т. е. двухтопливные

Таблица 2

**Сравнение основных альтернативных
низкоуглеродных видов топлива для морских перевозок**

Параметр	Альтернативное и низкоуглеродное судовое топливо					
	Водород	Аммиак	Метанол	Биометан	СПГ или Био-СПГ	Биодизельное топливо
Содержание углерода (масс. %)	0	0	37,5	74,8	≈75 (90–99% CH ₄)	86,9 (число углеродных атомов C ₈ –C ₂₀)
Плотность при 15°C (кг/м ³)	0,08 (1 бар) 39,69 (700 бар) 72,41 (жидкий)	0,72 (1 бар)	794,6	422,5 ^a	431 – 464 ^a	833 – 881
Температура кипения при 101,3 кПа (°C)	–253	–33	64,5	–161,5	–160	163 – 399
Низшая теплота сгорания (МДж/кг)	142	23	20	50	55	42,5
Объемная плотность энергии (МДж/м ³)	13 (окружающая среда*) 5600 (700 бар) 10000 (сжиженный –253°C)	15600 (сжиженный 33°C)	16000 (окружающая среда*)	37,8 (окружающая среда*) 32000 (800 бар)	20000–22000 (–160°C)	36000 (окружающая среда*)
Силовая установка	ДВС (одно-топливный) Топливный элемент (РЕМ, НТ-РЕМ, щелочной, фосфорнокислый, расплавленной карбонатный, твердооксидный)	ДВС (одно- или однотопливные двигатели) Топливный элемент (щелочной, мембранный щелочной, гидразин-борановый, боразановый твердооксидный) Водородный топливный элемент ^b (бортовая генерация водорода)	ДВС (одно- или однотопливные двигатели) Топливный элемент (с прямым окислением метанола, фосфорнокислый, расплавленной карбонатный, твердооксидный) Водородный топливный элемент ^b (бортовая генерация водорода из метанола)	ДВС (одно- или однотопливные двигатели)	ДВС (одно- или однотопливные двигатели)	ДВС (одно-топливный, стандартный двигатель для синтетического топлива)
УТГ ^c	7 (ДВС) 5 (ДВС)	6 (ДВС) 5 (ДВС)	5–6 (ДВС) 8–9 (ДВС)	10+ (ДВС)	10+ (ДВС)	10+ (ДВС)

Примечание: * – условия окружающей среды соответствуют стандартной температуре 25°C и давлению 1 бар; ^a – при температуре кипения метана; РЕМ – протонообменная мембрана; НТ-РЕМ: высокотемпературная РЕМ; ТЭ – топливный элемент; ДВС: двигатель внутреннего сгорания; ^b – при бортовой генерации водорода, применимы технологии водородных топливных элементов; ^c – Значения УТГ (уровня технологической готовности) основаны на расширенной шкале МЭА для оценки Технологий чистого развития [13]. Основано на данных [9–11, 14–17]

двигатели), предоставляют возможность перехода с постепенной заменой традиционного судового топлива [24, 25].

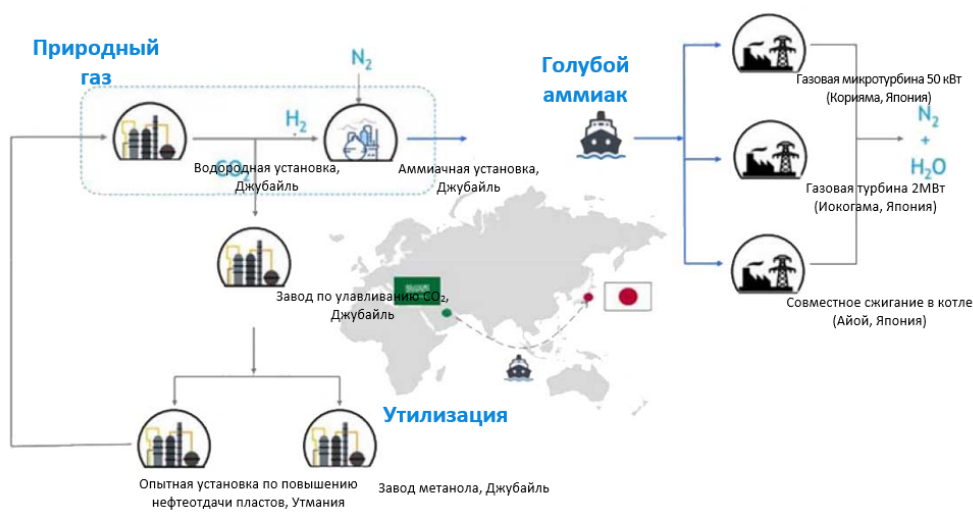


Рис. 3. Концептуальная блок-схема, демонстрирующая систему поставок голубого аммиака [20]

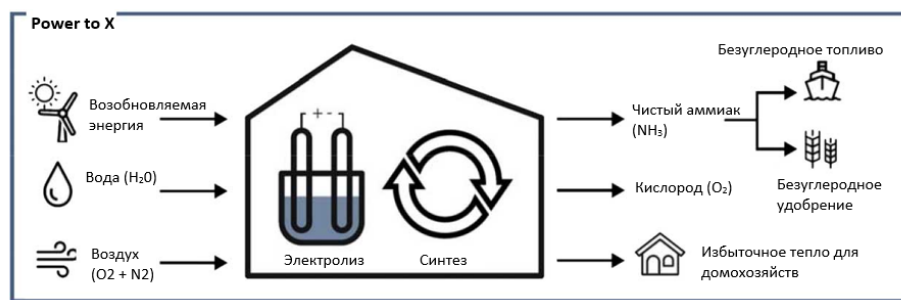


Рис. 4. Производство зеленого аммиака как пример применения концепции «power-to-X» [21]

Основным препятствием для широкого распространения зеленого водорода является отсутствие экономичных технологий его производства, в то время как голубой водород сталкивается с проблемами экономической осуществимости технологий CCUS, в особенности связанных с хранением CO_2 . Кроме того, при использовании аммиака, полученного из низкоуглеродного водорода, в качестве судового топлива необходимо учитывать все плюсы и минусы различных альтернатив декарбонизации, как показано на рис. 5. В то время как прямая электрификация силовых установок с помощью возобновляемых источников электроэнергии в сочетании с хранением энергии позволяет получить КПД энергопреобразования, достигающим 80%, плотность энергии современных аккумуляторных технологий недостаточна для больших судов дальнего плавания, так как наличие требований к значительному весу и объему аккумуляторов приводит к необходимости снижения грузоподъемности судов. По сравнению с литий-ионными аккумуляторами, имеющими гравиметрическую плотность энергии, равную примерно 1 МДж/кг и объемную плотность энергии, равную примерно 2800 МДж/м³, аммиак с низким или нулевым содержанием углерода имеет гравиметрическую плотность, равную примерно 23 МДж/кг и объемную плотность энергии в жидком состоянии, равную примерно 15600 МДж/м³. Следовательно, аммиак предъявляет гораздо меньшие требования к объему хранилища и будет более подходящим вариантом декарбонизации при замене мазута. Что касается сравнения жидкого водорода и жидкого аммиака при их использовании в качестве судового топлива, то жидкий аммиак имеет объемную

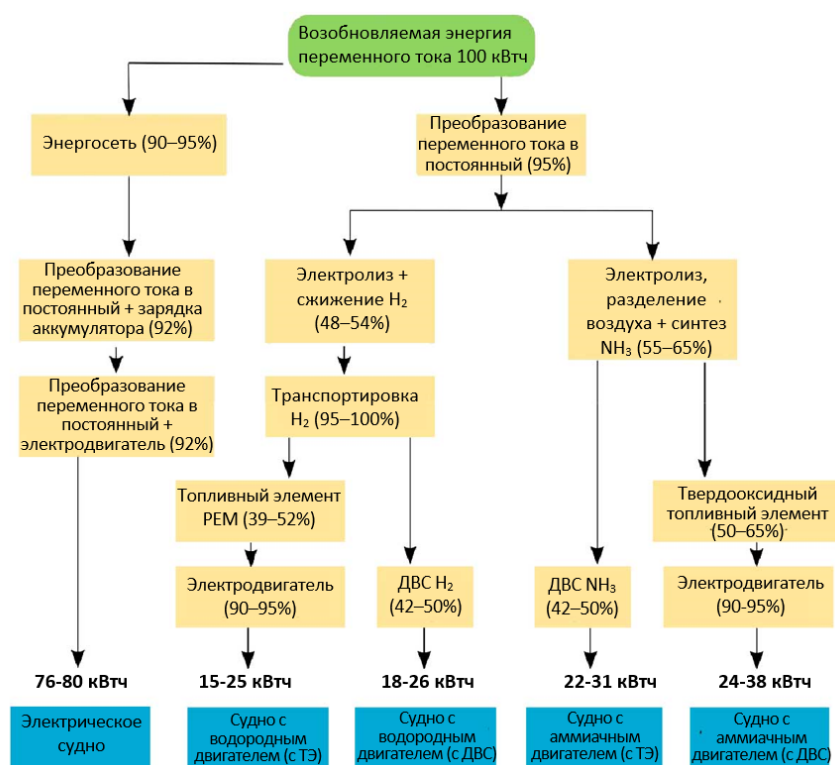


Рис. 5. Энергоэффективность потенциальных видов судового топлива, получаемых с использованием возобновляемых источников электроэнергии [6]

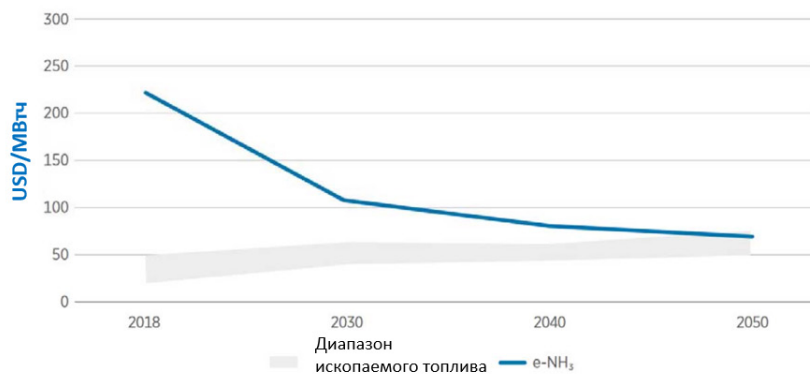
плотность энергии примерно на 55% выше, чем водород, и его можно сжижать при атмосферном давлении путем охлаждения до -33°C , тогда как водород для достижения жидкого состояния требует охлаждения при атмосферном давлении до -253°C . Следовательно, аммиак в целом является более экономичным вариантом топлива.

Экономический потенциал

Препятствием для более широкого внедрения зеленого аммиака остаются затраты на его производство [26], поскольку по текущим оценкам его цена составляет 480 долларов за тонну (около 1080 долларов за тонну нефтяного эквивалента), а приведенная стоимость водорода составляет 3,0 доллара за кг [27]. К 2030 году приведенная стоимость аммиака может упасть до 350 долларов за тонну (около 790 долларов за тонну нефтяного эквивалента) и до 310 долларов за тонну (менее 700 долларов за тонну нефтяного эквивалента) в определенных географических точках, таких как Океания [28]. Хотя цены на бункерное топливо в конце сентября 2021 года превысили 600 долларов за тонну нефтяного эквивалента [29], что связано с восстановлением цен на нефть до значения выше 80 долларов за баррель [30], затраты на тонну топливо и милю отгруженного груза для зеленого аммиака все еще выше (по сравнению с мазутом). Это связано с тем, что аммиак весит вдвое больше и требует в три раза больше места для хранения, чем мазут (для того же количества энергии). Чтобы соответствовать диапазону затрат на ископаемое судовое топливо необходимо, как показано на рис. 6, чтобы приведенная (к единице энергии) стоимость зеленого аммиака снизилась более чем на 65% и приблизиться к 60–70 \$/МВтч, что маловероятно в ближайшее время.

Стандарты и правила

Организации, занимающиеся промышленной стандартизацией, такие как Американское бюро судоходства (ABS), опубликовали в 2021 году руководящие документы по проектированию



Примечание. Стоимость продукта включает затраты на производство, транспортировку и логистику.

Источник: прогнозы стоимости энергии на NH₃ собственного производства; прогнозы стоимости топлива (Lloyd's Register, 2019; Ship & Bunker, 2019)

Рис. 6. Сравнение (прогноз) затрат на производство зеленого аммиака (e-NH₃) и ископаемого судового топлива [31]

и постройке судов, работающих на аммиаке [32]. Среди документации, относящейся к данной теме и опубликованной в 2021 году, следует отметить сборники правил по сертификации и обозначению классов, выпущенные, например, компаниями Bureau Veritas («Суда, работающие на аммиаке NR671 – предварительные правила») [33], RINA («Использование аммиака в качестве топлива» и обозначение класса «Готовность к аммиаку») [34], DNV (новое обозначение, учитывающее использование аммиака в качестве топлива, «использование аммиака в газовом состоянии в качестве топлива») [35] и Корейский регистр («Руководство для судов, использующих аммиак в качестве топлива») [36].

Эти руководящие документы соответствуют таким стандартам безопасности, как «Международный кодекс безопасности судов, использующих газы или другие виды топлива с низкой температурой вспышки» (также известный как Кодекс IGF) Международной морской организации (ИМО). Они также соответствуют другим инициативам ИМО по содействию устойчивому развитию, таким как «Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов» 1973 года («Конвенция МАРПОЛ») и отраслевые задачи по сокращению выбросов парниковых газов.

Дальнейшие перспективы

При оценке потенциала использования аммиака с нулевым и низким содержанием углеводов в качестве судового топлива очевиден ряд заметных преимуществ и возможностей данного топлива:

- **Налаженное производство углеродно-нейтрального или низкоуглеродного аммиака, обеспечивающее большие преимущества:** производство в химической промышленности аммиака, полученного из ископаемого топлива, привело к выбросам в 2018 году CO₂ в объеме, равном, примерно, 406 Мт в год, что превышает выбросы, соответствующие производству метанола (на уровне 211 млн т CO₂/год) и других ценных химикатов (258 млн т CO₂/год) [22]. Широкое внедрение аммиака в качестве судового топлива потребует широкого использования водорода, получаемого с помощью возобновляемых источников, а также низкоуглеродного водорода, в противном случае экологические выгоды от внедрения аммиака для морских перевозок не будут реализованы. Тем не менее, такие преимущества очевидны даже без учета декарбонизации, поскольку замена мазута аммиаком в целом полезна для морской среды (табл. 3) [37, 38].

- **Модернизация инфраструктуры и силовых установок.** Относительная простота модернизации существующей инфраструктуры, связанной с морскими перевозками, для использования

аммиака, является еще одним преимуществом, особенно при сравнении с требованиями к водородной инфраструктуре. Это связано с масштабом применения (например, инфраструктура доставки аммиака более широко развита, чем инфраструктура доставки водорода, в особенности в сжиженном виде), технической готовностью (например, инфраструктура для морских перевозок с использованием сжиженного углеводородного газа и сжиженного нефтяного газа аналогична инфраструктуре, необходимой для аммиака, и легко подвергается модернизации) и наличием нормативной базы (хотя аммиак и считается токсичным химическим веществом, нормативно база по обеспечению безопасности его использования для морских перевозок уже существует, а аналогичные правила для использования водорода все еще разрабатываются) [23, 39].

- **Безопасность, эксплуатационные характеристики и особенности регулирования.** Что касается проблем, связанных с использованием аммиака в качестве судового топлива, то его использование в двигателях и для производства электроэнергии в целом требует внимания. Использование аммиака в двигателях с воспламенением от сжатия затруднено из-за требований к более высокой степени сжатия для воспламенения по сравнению с применяемым в настоящее время жидким топливом. Преодоление этого ограничения возможно за счет использования аммиака в двигателях с искровым зажиганием или использования пилотного топлива с более низкой температурой воспламенения. В то время как первое менее желательно с технологической точки зрения из-за присущих данному методу проблем надежности, связанных с характеристиками воспламеняемости аммиака, второе технологически достижимо с помощью крекинга аммиака на месте эксплуатации с целью производства водорода (который имеет гораздо более широкий диапазон воспламенения и, таким образом, подходит для роли пилотного топлива) [40]. Новые технологии использования аммиака для выработки энергии включают в себя твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ) и прямое сжигание в газовых/паровых турбинах, но показатели их энергоэффективности (как рабочий, так и тепловой КПД) еще не соответствуют показателям современных двигателей внутреннего сгорания [41].

Однако для реализации этих преимуществ и возможностей необходимы согласованные действия, в особенности, следующие:

- **Продолжение инвестиций в НИОКР.** Заинтересованные стороны в судоходной отрасли должны прилагать постоянные усилия для поддержки НИОКР, направленных на разработку систем производства аммиака, основанных на использовании возобновляемых источников, а также низкоуглеродного аммиака. Эти усилия напрямую связаны с развитием водородной экономики, поскольку независимо от того, будет ли для производства аммиака использоваться электричество или ископаемое топливо в сочетании с CCS, оба направления имеют несколько общих технологий, предполагающих производство водорода в качестве энергоносителя. Кроме того, дальнейшие разработки по использованию аммиака в качестве топлива могут иметь прямые последствия для реализации других вариантов использования данного топлива, прежде всего для таких стационарных применений, как балансировка энергосистемы. Таким образом, исследовательские усилия должны быть нацелены, как правило, на вывод на рынок технологий с низким и средним уровнем УГТ (уровня технологической готовности) и быть направлены на развитие различных технологий, проектирование и внедрением систем передачи, распределения и хранения, а также разработку бизнес-моделей и создание политических и нормативных стимулов, способствующие внедрению аммиака в оптимальные сроки. Кроме того, необходимо изучить потенциальные возможности синергизма с другими секторами конечного потребления, такими как сельское хозяйство, наземный транспорт и химическая промышленность, поскольку промышленные кластеры могут предоставить возможности снижения рисков для новых инвестиций в аммиачные проекты [18].

- **Требования к капитальным вложениям для замены флота и инвестиций в технологии.** Для достижения более широкого внедрения аммиака в качестве судового топлива необходимо модер-

Таблица 3

**Процентное снижение воздействия на окружающую среду при использовании аммиака
или водородного топлива вместо обычного мазута (в пересчете на тонна-км) [37]**

Тип судна	Топливо	Источник энергии для производства топлива	Экологическая токсичность морских отложений	Морская водная экологическая токсичность	Закисление	Абиотическое истощение	Разрушение озонового слоя	Абиотическое истощение
Грузовое судно	NH ₃	Биомасса	68%	69%	55%	63%	90%	63%
		Геотермальные воды/бытовые отходы	73%	77%	83%	64%	90%	64%
		Гидроэнергия	72%	75%	82%	60%	89%	60%
		Ветер	67%	69%	82%	56%	87%	56%
	H ₂	Биомасса	80%	80%	75%	83%	94%	83%
		Геотермальные воды/бытовые отходы	80%	86%	96%	85%	94%	85%
		Гидроэнергия	82%	84%	95%	81%	93%	81%
		Ветер	78%	80%	94%	76%	93%	76%
Танкер	NH ₃	Биомасса	74%	74%	77%	53%	85%	53%
		Геотермальные воды/бытовые отходы	77%	77%	90%	54%	85%	54%
		Гидроэнергия	76%	76%	90%	55%	83%	55%
		Ветер	74%	74%	89%	49%	81%	49%
	H ₂	Биомасса	77%	78%	86%	70%	88%	70%
		Геотермальные воды/бытовые отходы	79%	80%	96%	71%	88%	71%
		Гидроэнергия	78%	79%	96%	68%	90%	68%
		Ветер	75%	77%	96%	61%	90%	61%

низировать имеющиеся морские суда или заменить их судами с двухтопливными двигательными установками (т. е. обеспечивающих смешивание топлива с целью одновременного сжигания) или двигательными установками, адаптированными для использования аммиака. Проанализированные компанией DNV в последнее время сценарии позволяют дать оценку общего объема необходимых инвестиций за период с настоящего момента до 2050 года в диапазоне 250–800 миллиардов долларов с пиковыми инвестициями в 60 миллиардов долларов в год [17]. Кроме того, для производства достаточного количества зеленого и синего аммиака потребуются привлечение инвестиций в начальный этап технологического цикла с целью обеспечения к 2050 году мощности возобновляемых источников энергии до 8 ТВт или производительности установок CCS до 750 Мт CO₂/год, соответственно. В общей сложности для достижения к 2050 году углеродной нейтральности с целью полной декарбонизации сектора морских перевозок может потребоваться до 2,4 триллиона долларов, из которых 0,6 триллиона долларов необходимо потратить на меры по повышению эффективности судов (например, путем уменьшения сопротивления, очистки выхлопных газов и модернизации энергетических систем, без учета двигателей), 0,1 триллиона долларов на повышения эксплуатационной эффективности (в частности, с помощью оцифровки

и анализа больших данных) и 1,7 триллиона на альтернативные виды судового топлива (в основном, производство, хранение и транспортировка водорода и аммиака, бункеровка, бортовые хранилища, двигатели и силовые установки) [42]. Без активизации усилий по разработке и внедрению механизмов, обеспечивающих доступ к рынкам капитала и возможностям инвестирования в инфраструктуру, переход на аммиак в качестве декарбонизированного судового топлива может оказаться, с учетом требуемых больших сумм, невозможным.

- **Политическая поддержка и ожидания потребителей.** Необходим четкий и согласованный политический механизм для поддержки усилий судоходных компаний по сокращению выбросов за счет инвестиций в технологии и перехода на топливо с низким и нулевым содержанием углерода. В частности, требуется создание соответствующих механизмов выплат за выбросы углекислого газа в атмосферу, позволяющих избежать перемещение экологически вредных производств за границу, что имеет первостепенное значение, поскольку экономические стимулы для лиц, принимающих решения, часто являются важным фактором для преодоления организационной инерции и нежелания вводить новшества [43]. Кроме того, международные компании, доставка товаров которых в значительной степени зависит от сектора международных морских перевозок, также могут подтолкнуть своих поставщиков логистических услуг к ускорению принятия инициатив по углеродной нейтральности или снижению выбросов углерода. Глобальные компании, включая Amazon, Ikea, Unilever и шесть других компаний, в октябре 2021 года пообещали добровольно использовать к 2040 году только те грузовые суда, которые работают на безуглеродном топливе [44]. Этот тип «корпоративной активности» является отражением более широкой тенденции в экологических, социальных и управленческих (ESG) воззрениях, влияющей на деловую практику и инвестиции, поскольку компании стали пересматривать свои фидуциарные обязательства, более полно учитывая внешние последствия своей деятельности (ранее игнорировавшиеся или недостаточно учитываемые) [45].

Если все указанные действия по переходу на использование аммиака с низким и нулевым выбросом углерода в качестве судового топлива будут предприняты, а отмеченные возможности и преимущества реализованы, то в одном из секторов «тяжело поддающихся декарбонизации» будет сделан большой шаг вперед. Промышленные компании уже объявили в 2021 году о существенных мерах по внедрению судового топлива с низким и нулевым выбросом углерода, начиная с технико-экономических обоснований и заканчивая инициативами экспериментального и демонстрационного масштаба. Хотя не все эти проекты нацелены на использование аммиака в качестве судового топлива, тем не менее они обеспечивают существенное увеличение объемов производства низкоуглеродного аммиака, что необходимо для снижения затрат на использование данного топлива для морских перевозок. Судостроительных компаний в Японии (например, Mitsubishi Heavy Industries [46], Nihon Shipyard [47] и Nippon Yusen Kaisha [48]) и Кореи (например, Hyundai Heavy Industries [49] и Samsung Heavy Industries [50]) реализуют крупные проекты, направленные на внедрение силовых установок, работающих на аммиаке. Данные проекты разработаны в партнерстве с основными заинтересованными промышленными компаниями в европейских странах (например, AP Møller-Mærsk, Wärtsilä, MAN Energy Solutions, ECONNECT Energy), а также химическими компаниями (например, Yara International [51]).

Заключение

Преимущества низкоуглеродного и безуглеродного топлива, присущие данным видам топлива при решении задачи по декарбонизации сектора морских перевозок, могут быть достигнуты только при использовании низкоуглеродных технологий производства и учете выбросов по всей производственно-сбытовой цепочки. И водород, и аммиак, похоже, готовы к использованию в качестве низкоуглеродного топлива благодаря снижению производственных затрат за счет технологических инноваций, более широкого промышленного внедрения и повышения спроса на

кэптивном рынке, а также благодаря реализации политических механизмов, поддерживающих согласованные выплаты за выбросы CO₂. В секторе морских перевозок аммиак, по-видимому, имеет преимущество перед другими вариантами низкоуглеродного топлива, поскольку аммиак имеет хорошую гравиметрическую и объемную плотность энергии и в значительной степени совместим с существующей инфраструктурой доставки.

В 2021 году резко возросли промышленные усилия по использованию аммиака в качестве судового топлива, что требует дальнейшей поддержки развития систем производства аммиака (как синего, так и зеленого), а также технологий производства. Согласование данного применения аммиака с другими видами промышленной деятельности, в которых используется аммиак, а также с применениями, в которых он используется в качестве основного сырья, может способствовать более быстрому развитию инфраструктуры, а также снизить риски проектных инвестиций. По мере приложения усилий регулирующих органов по использованию аммиака в качестве судового топлива отрасль морских перевозок должна обеспечить через свои международные представительства и торговые органы согласование на глобальном уровне своих отраслевых задач по предотвращению выбросов с амбициозными глобальными целями по смягчению последствий изменения климата.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] OECD, Ocean shipping and shipbuilding, (n.d.). <https://www.oecd.org/ocean/topics/ocean-shipping/>
- [2] UNCTAD, Review of Maritime Transport 2020, United Nations, New York, 2020.
- [3] IMO, Fourth IMO GHG Study, International Maritime Organization, 2020.
- [4] IEA, Energy Technology Perspectives 2020, International Energy Agency, Paris, 2020.
- [5] IATA, Net-Zero Carbon Emissions by 2050, (n.d.). <https://www.iata.org/en/pressroom/2021-releases/2021-10-04-03/>
- [6] International Transport Forum, Navigating Towards Cleaner Maritime Shipping: Lessons From the Nordic Region, OCED, Paris, 2020. <https://doi.org/10.1787/ab3d3fbc-en>.
- [7] IMO, Initial IMO GHG Strategy, (n.d.). <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx>
- [8] IEA, Net Zero by 2050, International Energy Agency, Paris, 2021. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- [9] CONCAWE, A review of the options for decarbonising maritime transport by 2050 (Concawe Review 29.2), (2021). <https://www.concawe.eu/publication/a-review-of-the-options-for-decarbonising-maritime-transport-by-2050/>
- [10] IEA, Global Hydrogen Review 2021, International Energy Agency, Paris, 2021.
- [11] **Staffell I.** The Energy and Fuel Data Sheet, (2011). https://www.claverton-energy.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/08/the_energy_and_fuel_data_sheet1.pdf.
- [12] ETC, Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy, Energy Transitions Commission, 2021. <https://www.energy-transitions.org/publications/making-clean-hydrogen-possible/>
- [13] IEA, ETP Clean Energy Technology Guide, IEA. (2020). <https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide>
- [14] FCBI Energy, Methanol as a Marine Fuel Report, Methanol Institute, 2015. <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2018/03/FCBI-Methanol-Marine-Fuel-Report-Final-English.pdf>
- [15] **Markowski J., Pielecha I.** The potential of fuel cells as a drive source of maritime transport, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 214 (2019) 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012019>
- [16] **Xing H., Stuart C., Spence S., Chen H.** Fuel cell power systems for maritime applications: Progress and perspectives, Sustainability. 13 (2021) 1213.

- [17] DNV, Maritime Forecast to 2050, DNV, Høvik, Norway, 2021.
- [18] EPRI, Technology Insights Brief: Renewable Ammonia Generation, Transport, and Utilization in the Transportation Sector, (2019). <https://www.epri.com/research/products/000000003002015353>
- [19] **Dimitriou P., Javaid R.** A review of ammonia as a compression ignition engine fuel, *Int. J. Hydrog. Energy*. 45 (2020) 7098–7118. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.209>
- [20] **Saudi Aramco.** IEEJ, SABIC, World's first blue ammonia shipment opens new route to a sustainable future, (2020). <https://eneken.ieej.or.jp/data/9135.pdf>
- [21] DFDS, Green Ammonia | Sustainable fuels, DFDS AS. (n.d.). <https://www.dfds.com/en/about/fuels/green-ammonia>
- [22] IEA, Chemicals, (2020). <https://www.iea.org/reports/chemicals>.
- [23] **Hansson J., Brynolf S., Fridell E., Lehtveer M.** The Potential Role of Ammonia as Marine Fuel — Based on Energy Systems Modeling and Multi-Criteria Decision Analysis, *Sustainability*. 12 (2020) 3265. <https://doi.org/10.3390/su12083265>
- [24] **Lindstrand N.** The case for two-stroke ammonia engines, *MAN Energy Solut.* (n.d.). <https://www.man-es.com/discover/two-stroke-ammonia-engine>
- [25] **Burgess J.** INTERVIEW: CMB targets ammonia dual-fuel ships from 2024, Antwerp hydrogen expansion, *SP Glob.* (2021). <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/petrochemicals/063021-interview-cmb-targets-ammonia-dual-fuel-ships-from-2024-antwerp-hydrogen-expansion>
- [26] **Prussi M., Scarlat N., Acciaro M., Kosmas V.** Potential and limiting factors in the use of alternative fuels in the European maritime sector, *J. Clean. Prod.* 291 (2021) 125849. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125849>.
- [27] **Shiozawa B.** The Cost of CO₂-free Ammonia, *Ammon. Energy Assoc.* (n.d.). <https://www.ammoniaenergy.org/articles/the-cost-of-co2-free-ammonia/>
- [28] **Michael Nayak-Luke R., Bañares-Alcántara R.** Techno-economic viability of islanded green ammonia as a carbon-free energy vector and as a substitute for conventional production, *Energy Environ. Sci.* 13 (2020) 2957–2966. <https://doi.org/10.1039/D0EE01707H>
- [29] World Bunker Prices, *Ship Bunker.* (n.d.). <https://shipandbunker.com/prices>
- [30] Business Insider, Crude Oil Price Today | BRENT OIL PRICE CHART | OIL PRICE PER BARREL | Markets Insider, *Markets.Businessinsider.Com.* (n.d.). <https://markets.businessinsider.com/commodities/oil-price>
- [31] IRENA, Navigating the way to a renewable future: Solutions to decarbonise shipping, *International Renewable Energy Agency*, Abu Dhabi, 2019.
- [32] ABS, Guide for Ammonia Fueled Vessels 2021, (2021). https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/325_guide_ammonia_fueled_vessels/ammonia-fueled-vessels-sept21.pdf
- [33] **Bureau Veritas.** NR671 ammonia-fuelled ships - tentative rules, *Mar. Offshore.* (n.d.). <https://marine-offshore.bureauveritas.com/nr671-ammonia-fuelled-ships-tentative-rules>
- [34] RINA, RINA publishes new rules for the use of “ammonia as a fuel” and the class notation “Ammonia Ready,” (n.d.). <https://www.rina.org/en/media/news/2021/05/13/ammonia-fuel-ships>
- [35] DNV, Rules for classification of ships – July 2021 edition, DNV. (n.d.). <https://www.dnv.com/news/rules-for-classification-of-ships-july-2021-edition-203529>
- [36] Korean Register, [기술 규칙 회보] Establishment of the “Guidelines for Ships Using Ammonia as Fuels,” (2021). http://www.krs.co.kr/sub/eng_board_read.aspx?no=13835&s_code=0401080000&b_code=006078000
- [37] **Elishav O., Mosevitzky Lis B., Miller E.M., Arent D.J., Valera-Medina A., Grinberg Dana A., ShterG.E., Grader G.S.** Progress and Prospective of Nitrogen-Based Alternative Fuels, *Chem. Rev.* 120 (2020) 5352–5436. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00538>
- [38] **Bicer Y., Dincer I., Vezina G., Raso F.** Impact Assessment and Environmental Evaluation of Various Ammonia Production Processes, *Environ. Manage.* 59 (2017) 842–855. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0831-6>

- [39] **Dolan R.H., Anderson J.E., Wallington T.J.** Outlook for ammonia as a sustainable transportation fuel, *Sustain. Energy Fuels*. 5 (2021) 4830–4841. <https://doi.org/10.1039/D1SE00979F>
- [40] **Valera-Medina A., Xiao H., Owen-Jones M., David W.I.F., Bowen P.J.** Ammonia for power, *Prog. Energy Combust. Sci.* 69 (2018) 63–102. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.07.001>
- [41] **Giddey S., Badwal S.P.S., Munnings C., Dolan M.** Ammonia as a Renewable Energy Transportation Media, *ACS Sustain. Chem. Eng.* 5 (2017) 10231–10239. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02219>.
- [42] Global Shipping's Net-Zero Transformation Challenge, BCG Glob. (2021). <https://www.bcg.com/publications/2021/global-zero-carbon-shipping-transformation-challenge>
- [43] DNV, Pathway to Net Zero Emissions, DNV, Høvik, Norway, 2021. <https://eto.dnv.com/2021/about-pathway-to-net-zero>
- [44] **Thomas D.** Amazon, Ikea and Unilever pledge zero-carbon shipping by 2040, BBC News. (2021). <https://www.bbc.com/news/business-58970877>
- [45] **Gillan S.L., Koch A., Starks L.T.** Firms and social responsibility: A review of ESG and CSR research in corporate finance, *J. Corp. Finance*. 66 (2021) 101889. <https://doi.org/10.1016/j.jcorpfin.2021.101889>
- [46] Mitsubishi Heavy Industries, Project Launched to Probe Conversion of Existing Ships from Fossil-based Fuels to Decarbonized Energy Sources, Mitsubishi Heavy Ind. Ltd. (2021). <https://www.mhi.com/news/210520.html>
- [47] **Kawasaki N., Shimada K.** Japan shipbuilding pins comeback hopes on zero-emissions vessels, *Nikkei Asia*. (2021). <https://asia.nikkei.com/Spotlight/Environment/Climate-Change/Japan-shipbuilding-pins-comeback-hopes-on-zero-emissions-vessels>
- [48] NYK Line, Agreement Reached with Yara International for Joint Study of Ammonia-Fueled Ammonia Gas Carrier, (n.d.). https://www.nyk.com/english/news/2021/20210602_01.html
- [49] Bureau Veritas, HHI & KSOE receive Approval in Principle for Ammonia Carrier with Ammonia Fuel Propulsion, *Mar. Offshore*. (2021). <https://marine-offshore.bureauveritas.com/newsroom/hhi-ksoe-receive-approval-principle-ammonia-carrier-ammonia-fuel-propulsion>
- [50] Wärtsilä and SHI agree to collaborate on ammonia fuelled engines for future newbuilds, *Wartsila.Com*. (n.d.). <https://www.wartsila.com/media/news/22-09-2021-wartsila-and-shi-agree-to-collaborate-on-ammonia-fuelled-engines-for-future-newbuilds-2978445>
- [51] Yara International, Yara, JERA and Idemitsu Kosan explore clean ammonia bunkering and distribution collaboration in Japan, Yara International. (2021). <https://www.yara.com/corporate-releases/yara-jera-and-idemitsu-kosan-explore-clean-ammonia-bunkering-and-distribution-collaboration-in-japan/>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГРИФФИТС Стивен — Старший вице-президент по научным исследованиям и разработкам, практикующий профессор Университета науки и технологий Халифа.

УРАТАНИ Джоао — Научный сотрудник Университета науки и технологий Халифа.

This article has been previously published. Citation link: S. Griffiths, J. Uratani. Zero and low-carbon ammonia shipping fuel. 3rd Annual Report of the Global Energy Association. pp. 4–19. The original full text of the report is available at the link: https://globalenergyprize.org/en/wp-content/uploads/2022/06/02545_22_brosh_GlobalEnergy_block_preview-2.pdf

S. Griffiths, J. Uratani

Khalifa University of Science and Technology,
Abu Dhabi, UAE

ZERO AND LOW-CARBON AMMONIA SHIPPING FUEL

Introduction. Around 90% of traded goods depend on the maritime transport sector as its main transportation mode and the OECD estimates maritime trade may increase three-fold volume-wise by 2050 [1]. In 2019, maritime trade volumes reached 11.08 billion tons according to UNCTAD, and while the COVID-19 pandemic that began in 2020 resulted in a volume decrease of 4.1%, recovery in 2021 should result in a 4.8% expansion in trade volumes, according to their latest report on maritime transport [2].

While maritime transport remains the most energy and cost efficient mode for movement of large volumes of goods all over the world (a breakdown of the types of goods transported in 2019 is presented in Fig. 1), the sheer size of this sector means that its associated emissions are still significant.

The International Maritime Organization (IMO) estimates that maritime transport GHG emissions totaled 1,076 Mt CO_{2,eq}, or 2.89% of anthropogenic GHG emissions in 2018, with accompanying energy consumption of 9.1 EJ [3]. Current IMO “business as usual” (BAU) forecasts, taking into consideration future shipping demand, fleet composition and fuel mix indicates that 2050 CO₂ emissions could be 90–130% of baseline 2008 values (equivalent to 100–150% of 2018 values). These values agree with IEA BAU scenario estimates, which place 2050 CO₂ emissions by the maritime transport sector at 135% of 2018 values [4].

While the aviation sector, another “hard-to-decarbonize” transport sector, has recently announced its goal to achieve industry-wide net-zero carbon emissions by 2050 [5], the maritime sector has yet

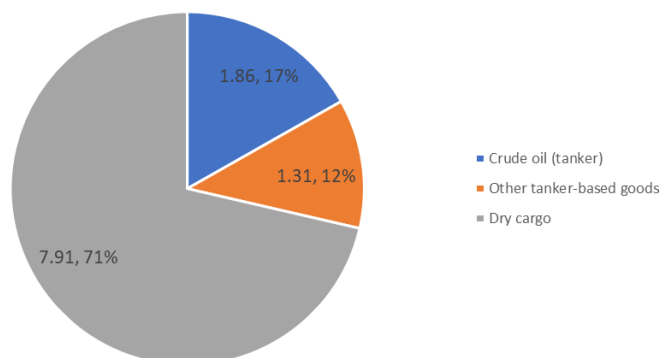


Fig. 1. Type of goods transported via maritime shipping in 2019 (billion tons) [2]

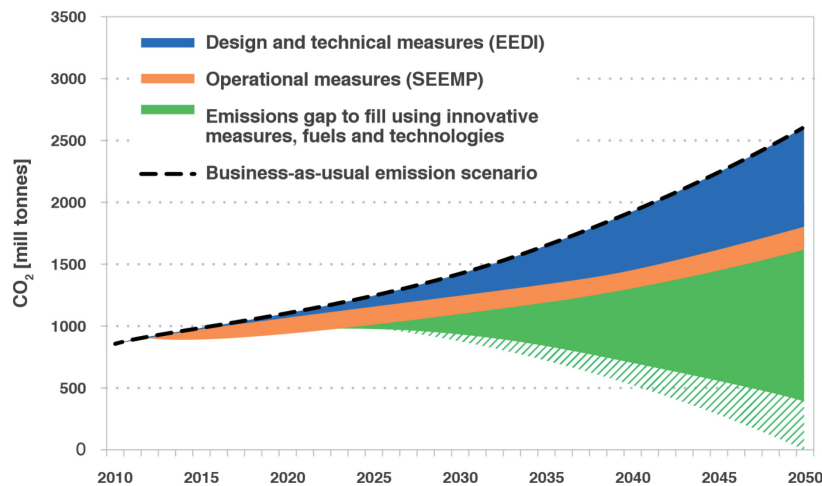


Fig. 2. Overall GHG reduction pathway to achieve IMO's ambitious goals. Note: EEDI: Energy Efficiency Design Index; SEEMP: Ship Energy Efficiency Management Plan. Current emissions reduction targets are shown in green, while dashed green represent a potential path towards net-zero emissions by 2050 [7]

to make such pledge. Although the maritime shipping industries in individual countries (e.g., Nordic countries, such as Denmark and Norway) have announced their carbon neutrality goals for 2050 [6], current IMO GHG emissions reduction targets still expect positive emissions from the sector in the medium term (i.e., 40% CO₂ reduction by 2030 and 70% CO₂ reduction by 2050, and up to 50% reduction of total GHG emissions by 2050, from a 2008 baseline), as illustrated in Fig. 2.

Accelerating the decarbonization of the maritime transport sector will require swift action from policymakers, industrial stakeholders, and technology developers, if goals in line with limiting the increase in global average temperature by the end of this century to 1.5 °C relative to pre-industrial levels are to be met. Furthermore, if the IMO decides on the adoption of net-zero emissions targets by 2050, as seen in recent sectoral and national pledges [8], a portfolio of solutions is likely to be necessary in order to effectively decarbonize the maritime transport sector.

Among these solutions, adoption of decarbonized fuels (with associated development of fuel production, supply infrastructure and compatible propulsion systems) is the key to reducing direct emissions (Table 1). Currently, multiple decarbonized fuels, such as biofuels, electricity (i.e., e-fuels and battery/fuel cell systems), low-carbon hydrogen (and its derivatives, such as ammonia and methanol), are still under consideration and remain promising options. Among these, hydrogen, and ammonia in particular, has emerged as promising candidates to serve as shipping fuels of the future. We therefore assess decarbonized ammonia as a shipping fuel in greater detail in the following sections.

Technology

The use of ammonia as an energy vector is proposed for use cases where energy density (i.e., amount of useful energy per unit mass and/or unit volume) is paramount, and where direct electrification presents a challenge due to the inherent handicaps of current battery technologies. Despite recent advances in battery technology for electrical energy storage, chemical energy storage remains orders of magnitude higher from an energy density perspective and thus represents a more viable option for heavy duty and long-distance transport needs. Among potential chemical fuels, both carbon-containing and carbon-free molecules are considered for use as renewable fuels with the final classification depending on how they are produced.

According to the IEA Net Zero Emissions Scenario (NZE2050), by 2050 around one-third of hydrogen demand may stem from the production of hydrogen-based fuels such as ammonia, synthetic

kerosene and synthetic methane. This transport-specific demand represents an increase from the current value of approximately 20 kt H₂/yr to more than 100 Mt H₂/yr by 2050 [10]. The expansion of use cases for ammonia beyond existing applications in the chemicals sector (primarily for fertilizers) is most notable in maritime transport (in particular long-distance shipping), where up to 45% of global shipping fuel demand could be met by ammonia in the NZE2050 scenario.

Table 1

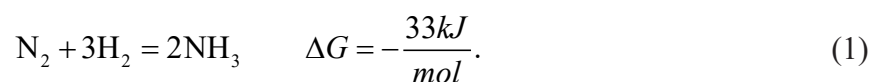
Overview of potential emissions reduction and key aspects of alternative shipping fuels [9]

Fuel candidate	Maximum GHG reduction potential (%)	Current fuel cost (\$/GJ)	Carbon cost-effectiveness (\$/t _{CO2})	Compatibility with existing propulsion systems
LNG	10%	7.1	340.1	Requires gas-fed or dual-fuel engine and associated cryogenic storage
Bio-LNG	169% ^a	113	49.5	
Methanol	92%	28.7	305.3	Not drop-in, compatible with ICE with retrofits
Ammonia	79% ^b / 100% ^c	31.9	400.5	Compatible with ICE (spark ignition coupled with hydrogen, or dual-fuel with pilot diesel)
Hydrogen	95% ^b / 100% ^c	89.2	1,028.7	Compatible with ICE (spark ignition or dual-fuel with pilot diesel), requires compressed or cryogenic storage
FAME	84%	17.0	174.0	Drop-in (blended < 20% FAME into fossil HVO)
Bio-HVO	91%	17.2	163.3	Drop-in (blended or neat)

Note: ^a – negative emissions are possible assuming use of bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) during production; ^b – assuming biological pathway is used; ^c – assuming chemical synthesis pathway with renewable or carbon-neutral electricity; LNG – liquified natural gas; FAME – fatty acid methyl esters; HVO – heavy fuel oil; ICE – internal combustion engine.

Ammonia is favored for shipping applications as its energy density of 23 MJ/kg is comparable to that of fossil fuels, such as LNG (55 MJ/kg) and bunker fuel (i.e., heavy fuel oil, at 30–40 MJ/kg). Even though hydrogen itself has a much higher energy density per unit mass (142 MJ/kg), hydrogen's volumetric energy density at ambient conditions is only 13 MJ/m³, which is just a fraction heavy fuel oil's volumetric energy density of 41,500 MJ/m³ [11]. Liquefaction of hydrogen to achieve a volumetric energy density of 10,039 MJ/m³ requires cooling hydrogen to a temperature of –253°C and this comes at a significant energy cost. Ammonia, on the other hand, can be liquefied by cooling it at atmospheric pressure to –33°C. The resulting liquid has a volumetric energy density of 15,600 MJ/m³ making ammonia more suitable than hydrogen for applications that require high volumetric energy density, such as shipping fuel [12]. Table 2 summarizes the main attributes of low-carbon shipping fuel alternatives currently explored for adoption by the maritime transport sector.

Industrial production of ammonia is an established process dating back to the early 20th Century. The most widely adopted and technologically mature production pathway is the Haber-Bosch process, in which pure nitrogen gas (N₂) is combined with hydrogen gas (H₂) in a reactor in the presence of a catalyst under high temperature and pressure conditions. This is an exothermic (i.e., energy producing), thermodynamically favorable reaction, represented by the following net equation:



In reality, the main reactions involved in ammonia production, combustion and fuel cell use are summarized below [18]:

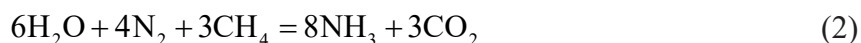
Table 2

Comparison of main low-carbon fuel alternatives for use in maritime shipping

Parameter	Alternative and lower-carbon maritime shipping fuels					
	Hydrogen	Ammonia	Methanol	Biomethane	LNG or Bio-LNG	Biodiesel
Carbon content (wt.%)	0	0	37.5	74.8	≈75 (90–99% CH ₄)	86.9 (C ₈ –C ₂₀ range molecules)
Density at 15°C (kg/m ³)	0.08 (1 bar) 39.69 (700 bar) 72.41 (liquid)	0.72 (1 bar)	794.6	422.5 ^a	431 to 464 ^a	833 to 881
Boiling point at 101.3 kPa (°C)	–253	–33	64.5	–161.5	–160	163 to 399
Net heating value (MJ/kg)	142	23	20	50	55	42.5
Volumetric energy density (MJ/m ³)	13 (ambient*) 5,600 (700 bar) 10,000 (liquefied, –253°C)	15,600 (liquefied, –33°C)	16,000 (ambient*)	37.8 (ambient*) 32,000 (800 bar)	20,000–22,000 (–160°C)	36,000 (ambient*)
Propulsion technology	ICE (single-fuel) Fuel cell (PEM, HT-PEM, alkaline, phosphoric acid, molten carbonate, solid oxide)	ICE (single- or dual-fuel engines) Fuel cell (alkaline, alkaline membrane, hydrazine borane, ammonia borane and ammonia-fed solid oxide) Hydrogen fuel cell b (onboard conversion to hydrogen)	ICE (single- or dual-fuel engines) Fuel cell (direct methanol, phosphoric acid, molten carbonate, solid oxide) Hydrogen fuel cell b (onboard methanol reforming to hydrogen)	ICE (single or dual-fuel engines)	ICE (single or dual-fuel engines)	ICE (single fuel, conventional engine drop-in fuel)
TRL ^c	7 (ICE) 5 (FC)	6 (ICE) 5 (FC)	5–6 (ICE) 8–9 (FC)	10+ (ICE)	10+ (ICE)	10+ (ICE)

Note: * – ambient conditions at standard ambient temperature and pressure equal to 25°C and 1 bar; ^a – using methane boiling point; PEM: proton exchange membrane; HT-PEM – high-temperature PEM; FC – fuel cell; ICE – internal combustion engine; ^b – in case of onboard conversion to hydrogen, hydrogen fuel cell technologies are applicable; ^c – TRL values based on the extended scale by IEA for evaluation of Clean Development Technologies [13]. Adapted from [9–11, 14–17].

Traditional Haber-Bosch ammonia synthesis:



Renewable ammonia synthesis:



Ammonia combustion (use in internal combustion engines, ICE):



Ammonia splitting (use in fuel cells):



The focus on ammonia as shipping fuel stems from its lack of CO₂ emissions when combusted as a fuel in propulsion engines. However, it is important to emphasize the need to account for whole value chain emissions in the production of ammonia, as otherwise associated CO₂ emissions are merely moved upstream towards the point of fuel production.

The nitrogen gas for ammonia is usually sourced from the atmosphere using an air separation unit (ASU), the hydrogen reactant has traditionally been produced using conventional fossil sources. Around 95% of ammonia production worldwide is reliant on fossil fuels with 72% of global ammonia production originating from hydrogen produced from natural gas via steam methane reforming (SMR) and 22% of global ammonia production originating from hydrogen produced from coal gasification (where China is the major producer via this pathway) [19]. The hydrogen produced from natural gas reforming is often referred to as grey hydrogen whereas the hydrogen produced from coal is referred to as brown or black depending on the source of coal.

Lower-carbon, and even zero-carbon, ammonia production may be achieved by adoption of low-carbon and renewable energy sources to supply energy for air separation, heating, filtration and purification and the use of blue hydrogen (i.e., grey, brown or black hydrogen coupled with CCUS), green hydrogen (i.e., water electrolysis using renewable power), turquoise hydrogen (i.e., methane splitting via pyrolysis) or pink hydrogen (i.e., water electrolysis using nuclear power). Low-carbon hydrogen, which in the context of this work includes zero-carbon hydrogen, can also be produced via the organic fraction of municipal solid waste (OF-MSW), from wastewater treatment plants (WWTP), or via bioelectrochemical systems, such as microbial electrochemical cells (MEC). Currently, however, such bio-based ammonia synthesis pathways are not primary contributors to industrial ammonia industrial production.

Thus, the main alternatives for industrial ammonia production tend to be separated by the “color” of hydrogen used in the Haber-Bosch synthesis: green hydrogen, from renewable energy sources, leads to the so-called “green ammonia”, while blue hydrogen from fossil sources coupled with carbon capture, utilization and storage (CCUS) technologies leads likewise to “blue ammonia”. These two varieties of low-carbon ammonia production are illustrated in Fig. 2 and 3, respectively. While blue hydrogen production may utilize CCUS technologies, such as enhanced oil recovery (EOR) and/or synthetic hydrocarbon production (e.g., methanol synthesis) for the generation of other value-added products (Fig. 3), the blue ammonia generated from this hydrogen feedstock would not be truly carbon neutral. If

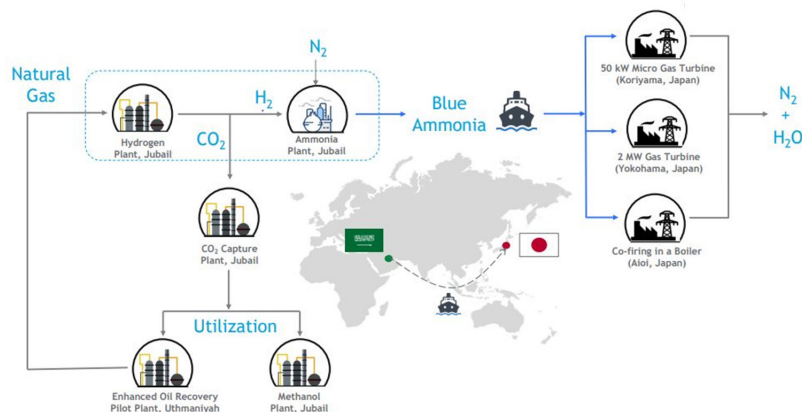


Fig. 3. Conceptual Flow Diagram of Blue Ammonia Supply Chain Demonstration [20]

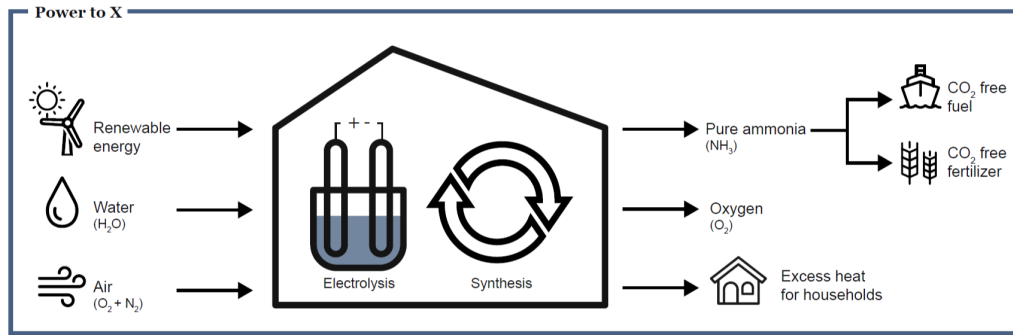


Fig. 4. Green ammonia production as an example of “power-to-X” application [21]

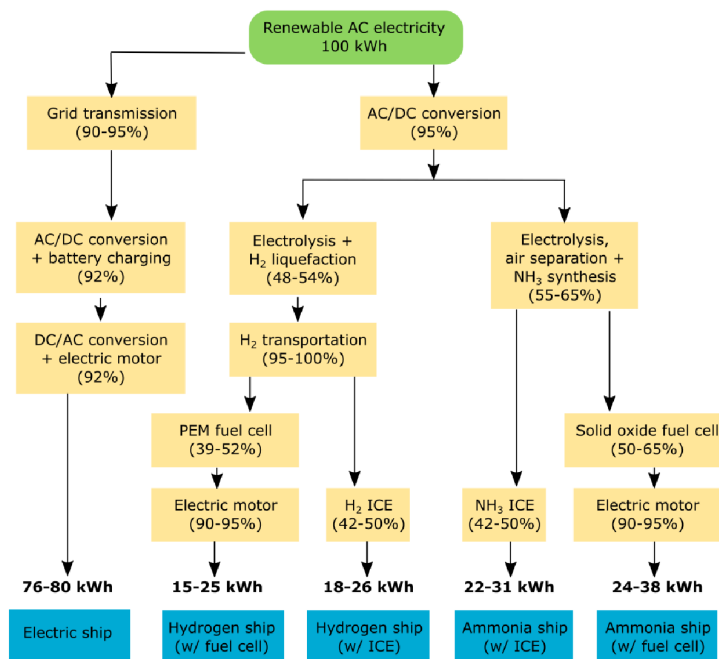


Fig. 5. Energy efficiency of potential maritime fuels created from renewable electricity source [6]

zero-carbon ammonia is the desired product, production via green hydrogen is necessary (in line with the “power-to-X” concept, Fig. 4).

Both hydrogen and ammonia already have existing infrastructure in place for transmission, storage and distribution, as the former is currently used primarily in oil refining and petrochemical industries while the latter is one of the main products (at around 175 Mt/yr) of the chemical industry sector, particularly for use in fertilizer production [22]. While wider adoption of either energy vector for fuel applications would require further investments in dedicated infrastructure, the potential to convert or repurpose existing liquefied petroleum gas (LPG) propulsion technology and infrastructure for ammonia-based systems tilts the balance in favor of the latter option [23]. In addition, engines capable of combustion of ammonia blended with conventional hydrocarbon fuels (i.e., dual-fuel use engines) provide a transition pathway option where gradual replacement of conventional maritime fuels is possible [24, 25].

Low-cost technologies for the production of green hydrogen remain the major obstacle for its widespread adoption, while blue hydrogen faces challenges in the economic feasibility of CCUS, particu-

larly CO₂ storage. Further, the use of ammonia derived from low-carbon hydrogen as a shipping fuel must take into consideration trade-offs between decarbonization alternatives, as demonstrated in Fig. 5. While direct electrification of propulsion systems via renewable electricity coupled with energy storage could provide up to 80% energy conversion efficiency, the energy density of current battery technologies is not sufficient for large, long-haul ships, as cargo capacity would need to be reduced to allow for the substantial battery weight and volume requirements. In comparison to lithium-ion batteries, which have gravimetric energy densities of approximately 1 MJ/kg and volumetric energy densities approximately 2800 MJ/m³, low or zero-carbon ammonia has a gravimetric density of approximately 23 MJ/kg and a volumetric energy density, in the liquid state, of approximately 15,600 MJ/m³. Hence, ammonia would have a much smaller storage requirement and be a more suitable decarbonization option for heavy fuel oil. Regarding the trade-offs between liquid hydrogen and liquid ammonia for use as shipping fuel, liquid ammonia has about a 55% higher volumetric energy density than hydrogen and can be liquefied at atmospheric pressure by cooling to −33°C whereas hydrogen requires cooling at atmospheric pressure to −253°C to achieve the liquid state. Hence, ammonia is altogether a more cost-effective fuel option.

Economic potential

The production costs of green ammonia remain a barrier for its wider adoption [26], as current estimates put its price at 480 \$/t_{NH3} (around 1,080 \$/toe), based on a levelized cost of hydrogen of 3.0 \$/kg [27]. By 2030, the levelized cost of ammonia could fall to 350 \$/tNH3 (around 790 \$/toe), and as low as 310 \$/tNH3 (under 700 \$/toe) in certain geographical locations, such as Oceania [28]. Although bunker fuel commodity prices exceeded 600 \$/toe in late September 2021 [29] with the recovery of oil prices above 80 \$/bbl [30], fuel costs per ton and mile of cargo shipped are still higher for green ammonia relative to heavy fuel oil due to the fact that ammonia weighs twice as much and requires three time more space to contain the same amount of energy as heavy fuel oil. On a cost per unit energy content, the levelized cost of green ammonia would have to fall by more than 65% and approach 60–70 \$/MWh to match the cost range of maritime fossil fuels, which as seen in Fig. 6 is not likely in the near term.

Standards and Regulations

Industry standard setting bodies, such as the American Bureau of Shipping (ABS), have published in 2021 guidance documents for the design and construction of ammonia-powered vessels [32]. Other relevant documentation published in 2021 includes certification and notation class rule sets, e.g., by

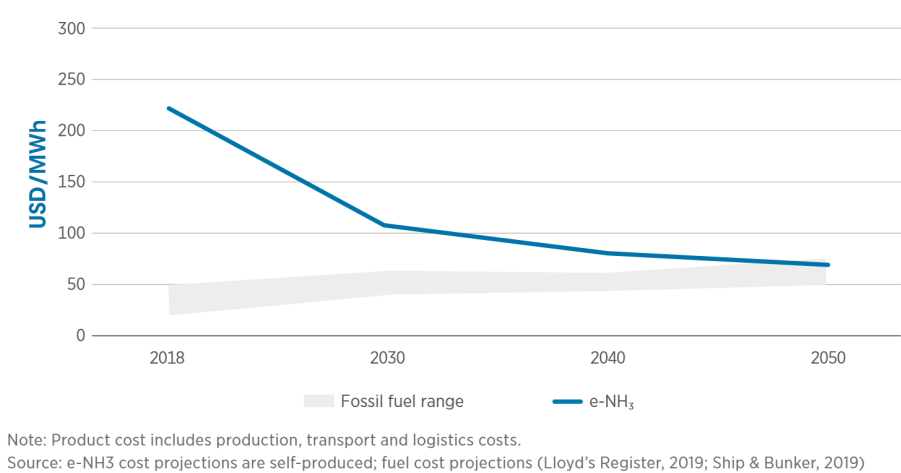


Fig. 6. Production cost comparison and forecast projection between green ammonia (e-NH₃) and maritime fossil fuels [31]

Bureau Veritas (“NR671 ammonia-fueled ships - tentative rules”) [33], RINA (“Ammonia as fuel” and class notation “Ammonia Ready”) [34], DNV (new notation covering ammonia as fuel, “Gas fueled ammonia”) [35], and Korean Register (“Guidelines for Ships Using Ammonia as Fuels”) [36].

These guidance documents are in line with safety standards such as the “International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low Flashpoint Fuels” (also known as the IGF Code) by the International Maritime Organization (IMO). It is also in line with other IMO efforts to promote sustainable development, such as the 1973 “International Convention for the Prevention of Pollution from Ships” (“MARPOL Convention”) and the sectoral GHG emissions reduction targets.

Path Forward

In evaluating the potential for zero and low-carbon ammonia for shipping fuel, a number of notable advantages and opportunities are evident:

- **Established production of carbon neutral or low-carbon ammonia with broad benefits:** The production of fossil fuel-derived ammonia in the chemicals sector was responsible for around 406 Mt CO₂/yr in CO₂ emissions in 2018, larger than that of methanol production (at 211 Mt CO₂/yr) and of other high-value chemicals production (at 258 Mt CO₂/yr) [22]. The wide adoption of ammonia as a shipping fuel will require extensive deployment of renewable and low-carbon hydrogen production, or the environmental benefits from the adoption of ammonia by the maritime transport sector will not be realized. Nonetheless, such benefits extend beyond decarbonization as the replacement of heavy fuel oil with ammonia is broadly beneficial to the marine environment (Table 3) [37, 38].

- **Infrastructure and propulsion technology retrofits:** The relative ease of retrofitting existing shipping-associated infrastructure for ammonia is a further opportunity, particularly when compared with the requirements for hydrogen infrastructure. This is due to scale (i.e., ammonia shipping infrastructure is more widely developed than that of hydrogen bulk shipping, in particular liquid hydrogen), technical (e.g., infrastructure for maritime shipping use of liquified petroleum gas, LPG, is similar to that needed for ammonia and may more readily be converted) and regulatory (i.e., although ammonia is considered a toxic chemical, safety regulatory frameworks are already in place for its use in the maritime transport sector, while equivalent regulations for hydrogen use are still being developed) [23, 39].

- **Safety, performance and regulatory aspects:** Regarding challenges for use of ammonia as a shipping fuel, use in engines and for power production in general requires attention. Ammonia use in compression ignition engines is hindered by higher compression ratio requirements for ignition than current fuel oil. Overcoming this constraint is possible via use of ammonia with spark ignition engines or use of a pilot fuel with a lower ignition point. While the former is less desirable from a technological perspective due to inherent reliability issues with ammonia flammability characteristics, the latter is technologically achievable via in situ ammonia cracking for hydrogen production (which has a much wider ignition range and thus fits the role of a pilot fuel) [40]. Emerging technologies for use of ammonia to generate power include solid oxide fuel cells (SOFC) and direct combustion in gas/steam turbines, but energy efficiency yields (both work and thermal efficiency) are yet to match those of current combustion engines [41].

In order to realize these benefits and opportunities, however, concerted actions are needed, particularly:

- **Continued investments in R&D:** Stakeholders in the shipping industry must commit to an ongoing effort to support R&D efforts on the development of renewable and low-carbon ammonia production systems. This effort is directly aligned with the development of the hydrogen economy, as whether electricity-based ammonia or fossil-based ammonia coupled with CCS are pursued, both pathways share multiple technologies with hydrogen production as an energy vector. In addition, further developments for ammonia-based fuel use can have direct implications in the development of use cases in stationary applications, such as grid-balancing and power systems. Thus, research efforts typically needed to bring low- and mid-TRL technologies to market should be targeted, and include topics in the scaling up of

Table 3

Percentage reduction of broader environmental impacts when using ammonia or hydrogen fuel, in impact per ton.km relative to conventional Heavy Fuel Oil [37]

Vessel type	Fuel	Energy source for fuel production	Marine sediment ecotoxicity	Marine aquatic ecotoxicity	Acidification	Abiotic depletion	Ozone layer depletion	Abiotic depletion
Freight ship	NH ₃	Biomass	68%	69%	55%	63%	90%	63%
		Geothermal/municipal waste	73%	77%	83%	64%	90%	64%
		Hydropower	72%	75%	82%	60%	89%	60%
		Wind	67%	69%	82%	56%	87%	56%
	H ₂	Biomass	80%	80%	75%	83%	94%	83%
		Geothermal/municipal waste	80%	86%	96%	85%	94%	85%
		Hydropower	82%	84%	95%	81%	93%	81%
		Wind	78%	80%	94%	76%	93%	76%
Tanker	NH ₃	Biomass	74%	74%	77%	53%	85%	53%
		Geothermal/municipal waste	77%	77%	90%	54%	85%	54%
		Hydropower	76%	76%	90%	55%	83%	55%
		Wind	74%	74%	89%	49%	81%	49%
	H ₂	Biomass	77%	78%	86%	70%	88%	70%
		Geothermal/municipal waste	79%	80%	96%	71%	88%	71%
		Hydropower	78%	79%	96%	68%	90%	68%
		Wind	75%	77%	96%	61%	90%	61%

technology pathways, design and implementation of transmission, distribution, and storage systems, as well as business models and policy and regulatory drivers to enable ammonia adoption in reasonable timeframes. Furthermore, potential synergistic opportunities with other end-use sectors, such as agriculture, terrestrial transport and chemicals industry must also be investigated, as industrial clusters can provide de-risking opportunities for new investments in ammonia projects [18].

- **Capital requirements for fleet replacements and technology investments:** In order to achieve wider adoption of ammonia use as a shipping fuel, current seagoing vessels will need to undergo retrofits or be replaced by ships powered by propulsion systems capable of dual-fuel use (i.e., blending of fuels for simultaneous combustion) or adapted ammonia use. Recent scenarios investigated by DNV put the total investment in the 250–800 billion dollars range, with peak investment as high as 60 billion \$/yr, between now and 2050 [17]. Furthermore, upstream investments would be necessary to ensure up to 8 TW of renewable energy production capacity, or 750 Mt CO₂/yr of CCS, for the production of sufficient green and blue ammonia, respectively, by the year 2050. In total, up to 2.4 trillion dollars might be needed to achieve net zero goals by 2050 for complete decarbonization of the maritime sector, with 0.6 trillion dollars for ship efficiency interventions (e.g., drag reduction, exhaust treatment and power systems not including engine retrofits), 0.1 trillion dollars for operational efficiency interventions (in particular via digitalization and big data analytics), and 1.7 trillion invested in alternative shipping fuels (mainly hydrogen and ammonia production, storage and transmission infrastructure; bunkering, onboard storage and engines and propulsion systems) [42]. Without increased efforts to develop and implement mechanisms to enable access to capital markets and infrastructure investment opportunities, the transition to ammonia as a decarbonized shipping fuel may not be possible given the large sums required.

- **Policy support and consumer expectations:** Clear and harmonized policy frameworks are necessary to support efforts by shipping companies to pursue emissions reductions via technology investments and

adoption of low- and zero-carbon fuels. In particular, the establishment of appropriate carbon pricing mechanisms that avoid leakage across borders is paramount, as economic incentives for decision-makers are often an important nudge factor to overcome organizational inertia and unwillingness to innovate [43]. In addition, international companies whose movement of goods depend heavily on the international maritime shipping industry may also push their logistics providers to accelerate the adoption of net zero or low-carbon initiatives. Global companies such as Amazon, Ikea, Unilever and six others have voluntarily pledged in October 2021 to only use cargo vessels powered by zero-carbon fuel by 2040 [44]. This type of “corporate activism” is a reflection of a larger trend of Environmental, Social, and Governance (ESG) considerations informing business practices and investments, as companies re-align their fiduciary obligations with wider (and previously ignored or underrepresented) impacts of externalities [45].

Should these actions be taken toward enabling low and zero-carbon ammonia shipping fuel and the noted opportunities and benefits realized, a major advance will have been made for one of the notoriously “hard-to-decarbonize” sectors. Already a substantial number of announcements about low and zero-carbon ammonia shipping fuel have been made by industrial stakeholders in 2021, ranging from feasibility studies to pilot and demonstration scale initiatives. While not all these projects target ammonia for use as a shipping fuel, they provide the essential scale-up of low-carbon ammonia production that is required to reduce costs for shipping fuel applications. Notable projects from shipbuilding companies are pursuing the use of ammonia-fueled propulsion systems in Japan (e.g., Mitsubishi Heavy Industries [46], Nihon Shipyard [47] and Nippon Yusen Kaisha [48]) and Korea (e.g., Hyundai Heavy Industries [49] and Samsung Heavy Industries [50]), developed in partnership with major industrial stakeholders in European countries (e.g., A.P. Møller – Mærsk, Wärtsilä, MAN Energy Solutions, ECONNECT Energy) and also in the chemicals sector (e.g., Yara International [51]).

Concluding remarks

The inherent advantages of low-carbon and carbon-free fuels for the decarbonization of the maritime transport sector will only be achieved if low-carbon production pathways are used and full value-chain emissions are considered. Both hydrogen and ammonia seem poised for adoption as low-carbon fuels as production costs are driven down by technology innovations, wider industrial adoption and captive market demand and policy mechanisms that support harmonized pricing of CO₂ emissions are adopted. In the maritime transport sector, ammonia appears to have an advantage over other low-carbon fuel options, as ammonia has good gravimetric and volumetric energy density and is largely compatible with existing shipping infrastructure.

While industrial efforts around the development of ammonia as a shipping fuel have surged in 2021, continued support for the development of ammonia production systems (both blue and green) and technology pathways is required. Alignment of the sector with other industrial activities where ammonia is relevant, as well as applications where it is used as a primary feedstock, may enable faster development of infrastructure while also serving to de-risk project investments. Finally, while regulatory efforts for use of ammonia as a shipping fuel are moving ahead, the maritime transport industry through its international representation and trade bodies, must ensure that its sectoral goals towards climate change mitigation move in tandem with ambitious climate change mitigation global targets towards at the global level.

REFERENCES

- [1] OECD, Ocean shipping and shipbuilding, (n.d.). <https://www.oecd.org/ocean/topics/ocean-shipping/>
- [2] UNCTAD, Review of Maritime Transport 2020, United Nations, New York, 2020.
- [3] IMO, Fourth IMO GHG Study, International Maritime Organization, 2020.

- [4] IEA, Energy Technology Perspectives 2020, International Energy Agency, Paris, 2020.
- [5] IATA, Net-Zero Carbon Emissions by 2050, (n.d.). <https://www.iata.org/en/pressroom/2021-releases/2021-10-04-03/>
- [6] International Transport Forum, Navigating Towards Cleaner Maritime Shipping: Lessons From the Nordic Region, OCED, Paris, 2020. <https://doi.org/10.1787/ab3d3fbc-en>
- [7] IMO, Initial IMO GHG Strategy, (n.d.). <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx>
- [8] IEA, Net Zero by 2050, International Energy Agency, Paris, 2021. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- [9] CONCAWE, A review of the options for decarbonising maritime transport by 2050 (Concawe Review 29.2), (2021). <https://www.concawe.eu/publication/a-review-of-the-options-for-decarbonising-maritime-transport-by-2050/>
- [10] IEA, Global Hydrogen Review 2021, International Energy Agency, Paris, 2021.
- [11] **I. Staffell**, The Energy and Fuel Data Sheet, (2011). https://www.claverton-energy.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/08/the_energy_and_fuel_data_sheet1.pdf
- [12] ETC, Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy, Energy Transitions Commission, 2021. <https://www.energy-transitions.org/publications/making-clean-hydrogen-possible/>
- [13] IEA, ETP Clean Energy Technology Guide, IEA. (2020). <https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide>
- [14] FCBI Energy, Methanol as a Marine Fuel Report, Methanol Institute, 2015. <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2018/03/FCBI-Methanol-Marine-Fuel-Report-Final-English.pdf>
- [15] **J. Markowski, I. Pielecha**, The potential of fuel cells as a drive source of maritime transport, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 214 (2019) 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012019>.
- [16] **H. Xing, C. Stuart, S. Spence, H. Chen**, Fuel cell power systems for maritime applications: Progress and perspectives, Sustainability. 13 (2021) 1213.
- [17] DNV, Maritime Forecast to 2050, DNV, Høvik, Norway, 2021.
- [18] EPRI, Technology Insights Brief: Renewable Ammonia Generation, Transport, and Utilization in the Transportation Sector, (2019). <https://www.epri.com/research/products/000000003002015353>
- [19] **P. Dimitriou, R. Javaid**, A review of ammonia as a compression ignition engine fuel, Int. J. Hydrog. Energy. 45 (2020) 7098–7118. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.209>
- [20] **Saudi Aramco, IEEJ, SABIC**, World's first blue ammonia shipment opens new route to a sustainable future, (2020). <https://eneken.ieej.or.jp/data/9135.pdf>
- [21] DFDS, Green Ammonia | Sustainable fuels, DFDS AS. (n.d.). <https://www.dfds.com/en/about/fuels/green-ammonia>
- [22] IEA, Chemicals, (2020). <https://www.iea.org/reports/chemicals>.
- [23] **J. Hansson, S. Brynolf, E. Fridell, M. Lehtveer**, The Potential Role of Ammonia as Marine Fuel—Based on Energy Systems Modeling and Multi-Criteria Decision Analysis, Sustainability. 12 (2020) 3265. <https://doi.org/10.3390/su12083265>
- [24] **N. Lindstrand**, The case for two-stroke ammonia engines, MAN Energy Solut. (n.d.). <https://www.man-es.com/discover/two-stroke-ammonia-engine>
- [25] **J. Burgess**, INTERVIEW: CMB targets ammonia dual-fuel ships from 2024, Antwerp hydrogen expansion, SP Glob. (2021). <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/petrochemicals/063021-interview-cmb-targets-ammonia-dual-fuel-ships-from-2024-antwerp-hydrogen-expansion>
- [26] **M. Prussi, N. Scarlat, M. Acciaro, V. Kosmas**, Potential and limiting factors in the use of alternative fuels in the European maritime sector, J. Clean. Prod. 291 (2021) 125849. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125849>
- [27] **B. Shiozawa**, The Cost of CO₂-free Ammonia, Ammon. Energy Assoc. (n.d.). [https://www.ammoniaenergy.org/articles/the-cost-of-co₂-free-ammonia/](https://www.ammoniaenergy.org/articles/the-cost-of-co2-free-ammonia/)

- [28] **R. Michael Nayak-Luke, R. Bañares-Alcántara**, Techno-economic viability of islanded green ammonia as a carbon-free energy vector and as a substitute for conventional production, *Energy Environ. Sci.* 13 (2020) 2957–2966. <https://doi.org/10.1039/D0EE01707H>
- [29] World Bunker Prices, Ship Bunker. (n.d.). <https://shipandbunker.com/prices>
- [30] Business Insider, Crude Oil Price Today | BRENT OIL PRICE CHART | OIL PRICE PER BARREL | Markets Insider, Markets.Businessinsider.Com. (n.d.). <https://markets.businessinsider.com/commodities/oil-price>
- [31] IRENA, Navigating the way to a renewable future: Solutions to decarbonise shipping, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2019.
- [32] ABS, Guide for Ammonia Fueled Vessels 2021, (2021). https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/325_guide_ammonia_fueled_vessels/ammonia-fueled-vessels-sept21.pdf
- [33] **Bureau Veritas**, NR671 ammonia-fuelled ships - tentative rules, Mar. Offshore. (n.d.). <https://marine-offshore.bureauveritas.com/nr671-ammonia-fuelled-ships-tentative-rules>
- [34] RINA, RINA publishes new rules for the use of “ammonia as a fuel” and the class notation “Ammonia Ready,” (n.d.). <https://www.rina.org/en/media/news/2021/05/13/ammonia-fuel-ships>
- [35] DNV, Rules for classification of ships - July 2021 edition, DNV. (n.d.). <https://www.dnv.com/news/rules-for-classification-of-ships-july-2021-edition-203529>
- [36] Korean Register, [기술 규칙 회보] Establishment of the “Guidelines for Ships Using Ammonia as Fuels,” (2021). http://www.krs.co.kr/sub/eng_board_read.aspx?no=13835&s_code=0401080000&b_code=006078000
- [37] **O. Elishav, B. Mosevitzky Lis, E.M. Miller, D.J. Arent, A. Valera-Medina, A. Grinberg Dana, G.E. Shter, G.S. Grader**, Progress and Prospective of Nitrogen-Based Alternative Fuels, *Chem. Rev.* 120 (2020) 5352–5436. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00538>
- [38] **Y. Bicer, I. Dincer, G. Vezina, F. Raso**, Impact Assessment and Environmental Evaluation of Various Ammonia Production Processes, *Environ. Manage.* 59 (2017) 842–855. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0831-6>
- [39] **R.H. Dolan, J.E. Anderson, T.J. Wallington**, Outlook for ammonia as a sustainable transportation fuel, *Sustain. Energy Fuels*. 5 (2021) 4830–4841. <https://doi.org/10.1039/D1SE00979F>
- [40] **A. Valera-Medina, H. Xiao, M. Owen-Jones, W.I.F. David, P.J. Bowen**, Ammonia for power, *Prog. Energy Combust. Sci.* 69 (2018) 63–102. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.07.001>
- [41] **S. Giddey, S.P.S. Badwal, C. Munnings, M. Dolan**, Ammonia as a Renewable Energy Transportation Media, *ACS Sustain. Chem. Eng.* 5 (2017) 10231–10239. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02219>
- [42] Global Shipping’s Net-Zero Transformation Challenge, BCG Glob. (2021). <https://www.bcg.com/publications/2021/global-zero-carbon-shipping-transformation-challenge>
- [43] DNV, Pathway to Net Zero Emissions, DNV, Høvik, Norway, 2021. <https://eto.dnv.com/2021/about-pathway-to-net-zero>
- [44] **D. Thomas**, Amazon, Ikea and Unilever pledge zero-carbon shipping by 2040, BBC News. (2021). <https://www.bbc.com/news/business-58970877>
- [45] **S.L. Gillan, A. Koch, L.T. Starks**, Firms and social responsibility: A review of ESG and CSR research in corporate finance, *J. Corp. Finance*. 66 (2021) 101889. <https://doi.org/10.1016/j.jcorpfin.2021.101889>
- [46] Mitsubishi Heavy Industries, Project Launched to Probe Conversion of Existing Ships from Fossil-based Fuels to Decarbonized Energy Sources, Mitsubishi Heavy Ind. Ltd. (2021). <https://www.mhi.com/news/210520.html>
- [47] **N. Kawasaki, K. Shimada**, Japan shipbuilding pins comeback hopes on zero-emissions vessels, Nikkei Asia. (2021). <https://asia.nikkei.com/Spotlight/Environment/Climate-Change/Japan-shipbuilding-pins-comeback-hopes-on-zero-emissions-vessels>
- [48] NYK Line, Agreement Reached with Yara International for Joint Study of Ammonia-Fueled Ammonia Gas Carrier, (n.d.). https://www.nyk.com/english/news/2021/20210602_01.html

[49] Bureau Veritas, HHI & KSOE receive Approval in Principle for Ammonia Carrier with Ammonia Fuel Propulsion, Mar. Offshore. (2021). <https://marine-offshore.bureauveritas.com/newsroom/hhi-ksoe-receive-approval-principle-ammonia-carrier-ammonia-fuel-propulsion>

[50] Wärtsilä and SHI agree to collaborate on ammonia fuelled engines for future newbuilds, Wartsila.Com. (n.d.). <https://www.wartsila.com/media/news/22-09-2021-wartsila-and-shi-agree-to-collaborate-on-ammonia-fuelled-engines-for-future-newbuilds-2978445>

[51] Yara International, Yara, JERA and Idemitsu Kosan explore clean ammonia bunkering and distribution collaboration in Japan, Yara International. (2021). <https://www.yara.com/corporate-releases/yara-jera-and-idemitsu-kosan-explore-clean-ammonia-bunkering-and-distribution-collaboration-in-japan/>

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Steven GRIFFITHS – *Senior Vice President, Research and Development and Professor of Practice Khalifa University of Science and Technology.*

Joao URATANI – *Research Fellow, Khalifa University of Science and Technology.*

Обзорная статья

УДК 579.69

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28404>



А.М. Бозиева, Е.В. Заднепровская , С.И. Аллахвердиев

Институт Физиологии Растений им. К.А. Тимирязева РАН,
Москва, Россия

 zadneprovskaya@ifr.moscow

ПОЛУЧЕНИЕ БИОВОДОРОДА: ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Аннотация. Рост численности населения планеты, увеличение спроса на энергию, истощение запасов ископаемого топлива и пагубное влияние продуктов их сгорания на экологическое состояние окружающей среды, а также на глобальное изменение климата являются не только актуальными проблемами современности, но и несомненно мощным стимулом к поиску альтернативных источников энергии. Молекулярный водород, как известно, является энергоносителем с высокой удельной теплотой сгорания, а также нулевым углеродным следом, поскольку в результате реакции окисления водорода образуется вода. H₂, продуцируемый микроорганизмами (к примеру, цианобактериями, микроводорослями и бактериями) получил название «биоводород». В данном обзоре рассмотрены современные достижения науки в области изучения водородной биоэнергетики, а также пути повышения производительности выделения биоводорода.

Ключевые слова: биоводород, биофототиз, цианобактерии, микроводоросли, фотосинтез.

Благодарности: Грант № 19-14-00118 (Исследование путей создания мимикрирующих фотосинтез биогибридных систем преобразования солнечной энергии в виды, используемые в экономике), № 22-44-08001 (Производство чистой энергии на основе фотосинтетических микроорганизмов – перспективы молекулярных механизмов и инженерные стратегии) Российского научного фонда (РНФ).

Для цитирования:

Бозиева А.М., Заднепровская Е.В., Аллахвердиев С.И. Получение биоводорода: последние достижения и современное состояние // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 4. С. 59–78. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28404>



A.M. Bozieva, E.V. Zadneprovskaya ✉, *S.I. Allakhverdiev*

Timiryazev Institute of Plant Physiology, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

✉ zadneprovskaya@ifr.moscow

BIOHYDROGEN PRODUCTION: RECENT ACHIEVEMENTS AND STATE OF THE ART

Abstract. The growing population of the planet, the increase in demand for energy, the depletion of fossil fuels and the detrimental effect of their combustion products on the ecological state of the biosphere, as well as on global climate change, are not only urgent problems of our time, but also a powerful incentive to search for alternative energy sources. Molecular hydrogen is an energy carrier with a high specific heat of combustion and a zero carbon emission, since water is formed as a result of the oxidation of hydrogen. H_2 produced by microorganisms is called “biohydrogen”. This review considers the modern achievements of science in the field of studying hydrogen bioenergy.

Keywords: biohydrogen, biophotolysis, cyanobacteria, microalgae, photosynthesis.

Acknowledgements: This work was supported by grants from the Russian Science Foundation (№: 19-14-00118; №: 22-44-08001).

Citation:

A.M. Bozieva, E.V. Zadneprovskaya, S.I. Allakhverdiev, Biohydrogen production: recent achievements and state of the art, *Global Energy*, 28 (04) (2022) 59–78, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28404>

Введение. В настоящее время существует большое количество причин, требующих ускорения исследований в области разработки биотоплива, среди которых и рост населения планеты, и ограниченный характер запасов ископаемого топлива, а также отрицательное воздействие продуктов его сгорания на климат [1–3]. Наиболее распространенным, доступным и возобновляемым источником энергии для устойчивого производства топлива является солнечная энергия, эффективное использование которой достижимо в результате разработки экономичных систем биоконверсии, позволяющих преобразовывать солнечную энергию в химическую, сохраняющуюся в последующем в виде топлива (например, как H_2) [4]. Наиболее привлекательны в этом отношении процессы, способные улавливать большие объемы свободной энергии, доступной в годовом солнечном потоке, и преобразовывать ее в H_2 [3, 5]. Водород является энергоносителем с высокой удельной теплотой сгорания и нулевым углеродным следом и, поскольку в результате окисления водорода образуется вода, его можно использовать как экологически чистый источник энергии. Газообразный H_2 является одним из самых универсальных, эффективных и устойчивых источников энергии. Среди способов получения водорода биологический путь является наиболее многообещающим [6–15]. Для обозначения водорода, полученного биологическим путем, принято использовать термин «биоводород» [1]. Метаболизм биоводорода фотосинтезирующими организмами впервые был описан для зеленых микроводорослей [16, 17], а вскоре после этого [18] для фотосинтезирующих бактерий. В настоящее время известно, что молекулярный водород способны выделять микроорганизмы различных групп: зеленые микроводоросли, цианобактерии, анаэробные фотосинтезирующие бактерии и анаэробные ферментативные бактерии [13, 19–21]. В соответствии с этим, биологические процессы получения водорода классифицируются

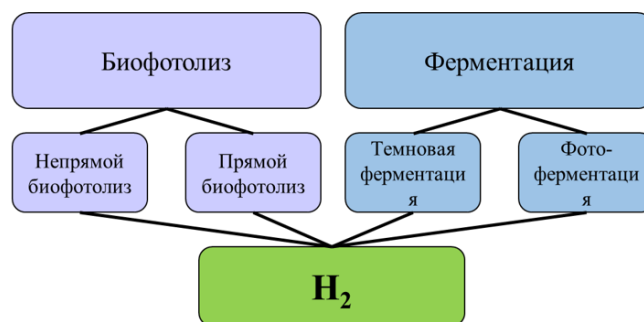


Рис. 1. Возможные пути синтеза молекулярного водорода в микроорганизмах (модифицировано по [23])

Fig. 1. Possible pathways for the synthesis of molecular hydrogen in microorganisms (modified according to [23])

следующим образом: биофотоллиз воды с использованием микроводорослей и цианобактерий; фоторазложение органических соединений фотосинтезирующими бактериями; ферментативное производство водорода из органических соединений; производство водорода с использованием фотосинтеза и ферментации бактерий (рис. 1) [22].

В рамках данного обзора будут рассмотрены механизмы получения биоводорода с помощью цианобактерий и микроводорослей, а также приведены результаты недавних исследований в этой области.

Цианобактерии

Цианобактерии — древнейшая группа фотосинтезирующих организмов, одна из крупнейших и наиболее важных групп прокариот на Земле. Они способны осуществлять кислородный фотосинтез и дыхание одновременно в одном отсеке клетки, а также многие цианобактерии способны фиксировать азот. Эти особенности позволяют им выживать в самых разных местообитаниях [24]. Цианобактерии имеют сходство с организмами эукариотического мира, обладающими двумя фотосистемами [25, 26], и являются одной из групп микроорганизмов, пригодных для фото-биологического выделения водорода [27, 28]. Цианобактерии могут напрямую преобразовывать солнечную энергию и воду в биоводород; это представляется возможным за счет наличия специальных ферментов, способных использовать восстановитель, полученный в результате расщепления воды, для получения водорода.

Микроводоросли

Микроводоросли — группа одноклеточных фотосинтезирующих микроорганизмов, которые являются источниками возобновляемого биотоплива благодаря тому, что они накапливают в клетках жирные кислоты, крахмал и другие ценные соединения [29]. У микроводорослей производство H_2 является результатом объединенной работы фотосинтетической цепи переноса электронов и пластидиальной $[FeFe]$ — гидрогеназы [30].

Ферменты, вовлеченные в водородный метаболизм

В водородный метаболизм у цианобактерий вовлечены 2 типа ферментов — нитрогеназы и гидрогеназы [1, 26, 28, 31–34]. Нитрогеназы катализируют образование водорода одновременно с восстановлением азота до аммиака, фиксация азота и образование молекулярного водорода у цианобактерий являются взаимосвязанными процессами. Нитрогеназа, в отличие от гидрогеназы, катализирует необратимый процесс, который считается более перспективным для использования в производстве водорода [26, 28]. У всех N_2 -фиксирующих цианобактерий присутствует также и поглощающая гидрогеназа, а некоторые штаммы содержат также и двунаправленную гидрогеназу [32, 35, 36]. Поглощающая гидрогеназа перерабатывает H_2 , выделившийся во время фиксации N_2 , и, таким образом, уменьшает потери энергии во время катализа нитрогеназы [21,

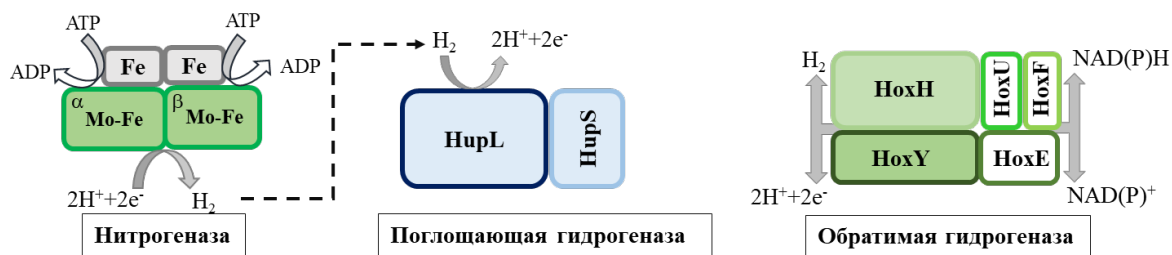


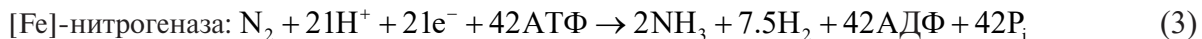
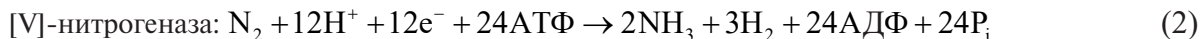
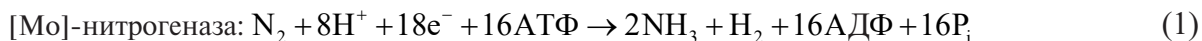
Рис. 2. Ферменты, вовлеченные в водородный метаболизм у цианобактерий (Модифицировано по [32])

Fig. 2. Enzymes involved in hydrogen metabolism in cyanobacteria (Modified according to [32])

34, 37]. Не фиксирующие азот штаммы обладают только двунаправленным ферментом [35, 36]. Двунаправленная гидрогеназа катализирует обратимое восстановление водорода из протонов и электронов. Гидрогеназы интегрированы в клеточную сеть таким образом, что они могут утилизировать избыток восстановителей для получения водорода [31].

Нитрогеназа является двухкомпонентным металлоферментным комплексом (рис. 2) [36].

Существует несколько типов нитрогеназ отличающихся содержанием различных металлов (Mo, V, Fe) в своем активном центре. Процессы, катализируемые этими ферментами, описываются реакциями (1-3) [36, 38–40]:



Нитрогеназы кодируются *nifHDK*-генами.

Обратимая (двунаправленная) гидрогеназа – сложный гетеропентамерный комплекс, состоящий из 2 структурных фрагментов: гидрогеназы (большая и малая субъединицы: HoxH, HoxY), и диафоразной части (субъединицы Hox U, E, F) (рис. 2) [36]. Реакция, катализируемая гидрогеназой имеет следующий вид:



Направление реакции зависит от окислительно-восстановительного потенциала компонентов, способных взаимодействовать с ферментом. В присутствии H_2 и акцепторов электронов, гидрогеназа катализирует поглощение H_2 , в присутствии донора электронов с низким потенциалом, фермент использует протоны из воды в качестве акцепторов электронов и катализирует выделение H_2 [31]. Двунаправленная гидрогеназа цианобактерий кодируется генами *HoxEFUYH* [36].

Поглощающая гидрогеназа – гетеродимерный фермент, состоящий из большой субъединицы, содержащей активный центр (HupL), и малой субъединицы (HupS) (рис. 2) [32, 41]. Основная функция поглощающей гидрогеназы заключается в энергодающем переносе H_2 в пул убихинона/пластохинона. Данный класс гидрогеназ кодируется генами *HupSL* [1].

По строению активного центра выделяют три основных класса гидрогеназ: [FeFe] – гидрогеназы, [NiFe] – гидрогеназы, Hmd – гидрогеназы [31, 42–44]. Для микроводорослей характерно наличие первого типа ферментов. [FeFe] – гидрогеназа имеет уникальный активный центр (H-кластер), активность которого примерно в 100 раз выше, чем у других гидрогеназ [45]. Из-

вестно, что фермент, [FeFe] – гидрогеназа микроводорослей, кодируется генами *HydA1* и *HydA2* и локализуется в хлоропластах [46–48].

Особенностью всех типов ферментов, участвующих в процессе выделения водорода, является их высокая чувствительность к кислороду [49, 50]. Более того, известно, что гидрогеназы зеленых микроводорослей необратимо ингибируются под действием кислорода, тогда как [NiFe]-гидрогеназы, характерные для цианобактерий, более устойчивы к O_2 , а их ингибирование имеет обратимый характер [51]. Таким образом, наличие кислорода в среде инактивирует процесс производства H_2 [52, 53].

Кроме того, [NiFe]-гидрогеназы синтезируются конститутивно, в то время как экспрессия генов [FeFe]-гидрогеназ требует предварительной темновой адаптации в анаэробных условиях [1, 54].

Механизмы выделения био H_2

Процесс фотосинтеза представляет собой сложную цепь окислительно-восстановительных реакций, протекающих в тилакоидных мембранах хлоропластов. Последовательный перенос электронов приводит к тому, что восстановленный ферредоксин (Фд) передает электроны далее для восстановления НАДФ и синтеза АТФ. В случае же фотобиологического производства водорода ферредоксин отдает электроны на специальные ферменты, которые и участвуют в метаболизме водорода [55].

Цианобактерии и микроводоросли могут выделять биоводород путем прямого и непрямого биофотоллиза [56]. В ходе прямого биофотоллиза восстановитель, образующийся в результате фотосинтеза (ферредоксин или НАД(Ф)Н) переносит под действием света электроны на гидрогеназу, и приводит к синтезу молекулярного водорода [2, 13, 56–59] (5):



При непрямом биофотоллизе электроны, образующиеся в результате расщепления воды, сначала поступают для синтеза запасных углеводов (крахмал, гликоген), а затем эти органические запасы служат донорами электронов для образования H_2 [8, 60–62]. Преимуществом непрямого биофотоллиза является возможность использования альтернативных источников углерода в качестве доноров протонов и электронов для генерации водорода [63].

Стратегии, используемые для повышения продуктивности процесса выделения H_2

Производство водорода биологическим путем сталкивается с рядом трудностей, среди которых: низкая эффективность и продуктивность процесса, а также чувствительность ферментов, катализирующих выделение водорода, к содержанию кислорода в окружающей среде [27, 64]. Для преодоления этих сложностей и получения биоводорода в промышленных масштабах в настоящее время используется множество подходов, которые можно объединить в 3 большие группы: метаболические, генетические и технические подходы. Потенциал образования H_2 у зеленых микроводорослей и цианобактерий зависит от способности конкретного штамма синтезировать ферменты, необходимые для метаболизма водорода, и условий культивирования. Результаты анализа некоторых данных по эффективности выделения H_2 штаммами цианобактерий и микроводорослей представлены в табл. 1.

Метаболические подходы направлены на улучшение производительности процесса выделения H_2 посредством регуляции внешних факторов: интенсивности освещения [71], pH среды [88, 89], температуры культивирования [89], газового состава среды [71, 74, 77] и питательных веществ [90].

Также к метаболическим подходам относится применение ингибиторов фотосинтетической активности с целью повышения эффективности фотовыделения водорода (кислород, выделяю-

Таблица 1

Сравнение скорости выделения H_2
у некоторых штаммов цианобактерий и микроводорослей

Table 1

Comparison of H_2 release rates in some strains of cyanobacteria and microalgae

Вид	Максимальная скорость выделения H_2	Источник
Цианобактерии		
<i>Desertifilum</i> sp. IPPAS B-1220	0.348 $\mu\text{моль } H_2 / \text{мг Хл/ч}$	[58]
<i>Calothrix</i> 336/3	48 $\mu\text{моль } H_2 / \text{мг Хл/ч}$	[65]
<i>Cyanothece</i> sp. ATCC 51142	465 $\mu\text{моль } H_2 / \text{мг Хл/ч}$	[66]
<i>Synechocystis</i> sp. PCC6803-GT	3.26 $\mu\text{моль } H_2 / \text{мл/ч}$	[67]
<i>Cyanothece</i> sp. strain ATCC 51142	300 $\mu\text{моль } H_2 / \text{мг Хл/ч}$	[68]
<i>Oscillatoria</i> sp. Miami BG7	260 $\mu\text{моль } H_2 / \text{мг Хл/ч}$	[69]
<i>Anabaena siamensis</i> TISTR 8012	30 $\mu\text{моль } H_2 / \text{мг Хл/ч}$	[70]
<i>Anabaena</i> sp. PCC 7120	62.6 $\mu\text{моль } H_2 / \text{мг Хл/ч}$	[71]
<i>Synechocystis</i> sp. PCC 6803	40.6 $\mu\text{моль } H_2 / \text{мг Хл/ч}$	[72]
<i>Anabaena cylindrica</i> B629	49.3 $\mu\text{моль } H_2 / \text{мг Хл/ч}$	[73]
<i>Nostoc</i> sp. PCC 7422	100 $\mu\text{моль } H_2 / \text{мг Хл/ч}$	[74]
<i>Anabaena siamensis</i> TISTR 8012	22 $\mu\text{моль } H_2 / \text{мг Хл/ч}$	[75]
<i>Aphanothece halophytica</i>	13.80 $\mu\text{моль } H_2 / \text{мг Хл/ч}$	[76]
Микроводоросли		
<i>C. reinhardtii</i> CC-4147 FUD7 mt+	5.3 $\mu\text{моль } H_2 / \text{мг Хл/ч}$	[77]
<i>C. reinhardtii</i> Stm6	~40 $\mu\text{моль } H_2 / \text{мг Хл/ч}$	[78]
<i>C. reinhardtii</i> 137+	0.73 $\mu\text{моль } H_2 / \text{мг Хл/ч}$	[79]
<i>C. reinhardtii</i> CC-124	21.65 $\mu\text{моль } H_2 / \text{мг Хл/ч}$	[80]
<i>C. reinhardtii</i> CC-4533	~40 $\mu\text{моль } H_2 / \text{мг Хл}$	[81]
<i>C. reinhardtii</i> flv 208	~60 $\mu\text{моль } H_2 / \text{мг Хл}$	[81]
<i>C. reinhardtii</i> CC-124	35 $\mu\text{моль } H_2 / \text{мл газа}$	[82]
<i>Chlorella</i> sp.	10.31 мл/Л	[83]
<i>Chlorella</i> sp. IOAC707S	20 мл/Л	[84]
<i>C. reinhardtii</i> D239-40	490 мл/Л	[85]
<i>C. pyrenoidosa</i>	44 мл/Л	[86]
<i>Parachlorella kessleri</i> RA-002	2,20 мМ/Л	[87]

щийся в процессе фотосинтеза подавляет действие водородных ферментов [91]). К настоящему времени исследовано влияние на водородный метаболизм следующих ингибиторов: DCMU [58, 75], СССР [87, 92], KCN [75, 90, 93], РСР [93] и другие.

Помимо вышеперечисленных способов часто применяется создание стрессовых условий — серное [77–79], азотное [76, 82, 94, 95], фосфорное [84] и магниевое [79] голодания, а также солевой стресс [76].

Показано, что у микроводорослей наиболее эффективное выделение биоводорода отмечается в условиях дефицита серы, который ингибирует активность ФС2 и скорость производства кислорода. Это приводит к тому, что процессы потребления кислорода начинают доминировать над его выделением, и происходит активация гидрогеназ в анаэробных условиях [96]. Однако Волгушева

и др. (2017) в своих исследованиях показали, что клетки *Chlamydomonas reinhardtii*, лишенные Mg, демонстрировали более пролонгированное выделение водорода. Это связано с тем, что дефицит магния оказывает менее вредное воздействие на жизнеспособность и метаболическую активность клеток, по сравнению с голоданием по сере [79].

Генетические подходы к повышению эффективности выделения биоводорода включают исследования по разработке O_2 -толерантной гидрогеназы для устойчивого производства био H_2 [97], а также исследования, связанные с поиском способов переключения потока электронов на гидрогеназу. В исследовании Eilenberg с соавт. (2016) показан двойной эффект мутанта *C. reinhardtii*, в котором комплекс Фд и гидрогеназы показал более высокую толерантность в отношении к O_2 , а также большую продукцию H_2 , в связи с тем, что поток электронов от ФС2 шел непосредственно на комплекс Фд и гидрогеназы [80]. Подобные результаты были получены при исследовании мутанта *C. reinhardtii* по белку D1, в котором была произведена двойная аминокислотная замена [98]. Точно так же мутанты *C. reinhardtii*, нокаутированные по белку ФНР (ферредоксин-НАДФ-редуктаза), показали более высокую фотопroduкцию водорода, чем дикие типы [81].

Другим генетическим подходом является разработка укороченных антенных комплексов [99–102]. В мутантах с усеченными антеннами скорость фотосинтеза достигает насыщения при гораздо более высокой интенсивности света. В исследованиях Kosourov et al. (2011) показано, что усечение светособирающих антенн в клетках водорослей не только улучшает продуктивность фотосинтеза, но и увеличивает эффективность фотопroduкции H_2 при высокой интенсивности света в течение длительного времени. Так, мутант *C. reinhardtii tla1* (CC-4169) демонстрировал в 6 раз более высокую скорость выделения водорода при интенсивном свете по сравнению с родительским штаммом [101].

Создание искусственных микроРНК (amiRNAs) является одной из новейших методик повышения уровня био H_2 . Последние исследования позволили отметить, что при серном голодании у *C. reinhardtii* сверхэкспрессируются некоторые эндогенные микроРНК. Эти наблюдения привели к разработке нескольких искусственных микроРНК (amiRNAs) для увеличения выхода водорода путем стимуляции более быстрого потребления кислорода или подавления экспрессии гена *psbA*, который кодирует белок D1, связанный с ФС2 [103, 104].

Таким образом, методы генетической инженерии позволяют устранять конкурирующие пути и направлять поток электронов в сторону синтеза H_2 .

Технические подходы заключаются в масштабировании культивирования микроводорослей в биореакторах особого типа, снижающих затраты на производство [105]. В настоящее время уже создано множество фотобиореакторов закрытого типа (вертикальные колонные, трубчатые, плоскостельные и т. д.). Однако, разработка подходящего фотобиореактора для производства водорода микроорганизмами все еще остается сложной и актуальной задачей [106, 107]. При создании «идеального» фотобиореактора необходимо учитывать следующие параметры: фотобиореактор должен быть закрытой системой, во избежание потерь произведенного водорода; конструкция должна обеспечивать удобство и простоту стерилизации; а также обеспечивать высокое соотношение освещаемой поверхности к объему культуры.

Другим не менее актуальным способом повышения скорости выделения биоводорода является иммобилизация клеток на различных носителях. Таким путем достигаются защита микроорганизмов от неблагоприятных воздействий и постоянство условий культивирования [53, 72, 77].

Заключение

Подводя итог, можно утверждать, что истощение ископаемого топлива значительно стимулировало интерес во всем мире к разработке устойчивых источников энергии. Цианобактерии и микроводоросли рассматриваются в качестве потенциальных производителей биоводорода, однако стоимость производства и низкая эффективность процесса снижают конкурентоспособ-

ность биоH₂. Тем не менее, производство водорода может быть ускорено благодаря последним технологическим достижениям в области метаболической и генной инженерии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Tsygankov A.A.** Biological generation of hydrogen, *Russian Journal of General Chemistry*. 77 (2007a) 685–93.
- [2] **Hallenbeck P.C.** Hydrogen production by cyanobacteria, *Microbial technologies in advanced biofuels production*. (2012) 15–28.
- [3] **Hallenbeck P.C., Lazaro C.Z., Sagir E.** Photosynthesis and hydrogen from photosynthetic microorganisms. *Microalgal Hydrogen Production: Achievements and Perspectives*. Seibert M. and Torzillo G (eds.). European Society for Photobiology. Chapter 1 (2018) 3–30.
- [4] **Allakhverdiev S.I., Kreslavski V.D., Thavasi V., Zharmukhamedov S.K., Klimov V.V., Nagata T., Nishihara H., Ramakrishna S.** Hydrogen photoproduction by use of photosynthetic organisms and biomimetic systems, *Photochemical and Photobiological Sciences*. 8 (2) (2009) 148–56.
- [5] **Ghirardi M.L., Dubini A., Yu J., Maness P-Ch.** Photobiological hydrogen-producing systems, *Chemical Society Reviews*. 38 (2009) 52–61.
- [6] **Allakhverdiev S.I., Kreslavski V.D., Thavasi V., Zharmukhamedov S.K., Klimov V.V., Ramakrishna S. et al.** Photosynthetic energy conversion: hydrogen photoproduction by natural and biomimetic systems. Mukherjee A., (ed.) *Biomimetics, learning from nature*. Croatia: In-Tech, Vukovar; (2010) 49–76.
- [7] **Allakhverdiev S.I., Thavasi V., Kreslavski V.D., Zharmukhamedov S.K., Klimov V.V., Ramakrishna S. et al.** Photosynthetic hydrogen production, *Photochemical and Photobiological Sciences*. 11 (2011) 101–13.
- [8] **Antal T.K., Krendeleva T.E., Pashchenko V.Z., Rubin A.B., Stensjo K., Tyystjarvi E. et al.** Photosynthetic hydrogen production: mechanisms and approaches. Azbar N., Levin D. (eds.) *State of the art and progress in production of biohydrogen*. Canada: Bentham Science Publishers; (2011) 25–53.
- [9] **Veziroglu N.T.** Foreword. Azbar N., Levin, D. (eds.) *State of the art and progress in production of biohydrogen*. Canada: Bentham Science Publishers; (2011) 25–53.
- [10] **Melis A., Happe T.** Hydrogen production: green algae as a source of energy, *Plant Physiology*. 127 (2001) 740–8.
- [11] **Appel J.** The physiology and functional genomics of cyanobacterial hydrogenases and approaches towards biohydrogen production. Burnap R.L., Vermaas W.F.J., Govindjee, Sharkey T.D. (eds.) *Functional genomics and evolution of photosynthetic systems, advances in photosynthesis and respiration*. Dordrecht, The Netherlands: Springer. (2012) 357–81.
- [12] **Homann P.H.** Hydrogen metabolism of green algae: discovery and early research—a tribute to Hans Gaffron and his coworkers. Govindjee, Beatty J.T., Gest H., Allen J.F. (eds.) *Discoveries in photosynthesis, advances in photosynthesis and respiration*, Dordrecht, The Netherlands: Springer. 20 (2005) 119–29.
- [13] **Khetkorn W., Rastogi R.P., Incharoensakdi A., Lindblad P., Madamwar D., Pandey A., Larroche C.** Microalgal hydrogen production – A review, *Bioresource Technology*. 243 (2017) 1194–206.
- [14] **Aziz M.** Integrated hydrogen production and power generation from microalgae, *International Journal of Hydrogen Energy*. 41 (2016) 104–112.
- [15] **Hosseini S.E., Wahid M.A.** Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 57 (2016) 850–66.
- [16] **Gaffron H.** Reduction of CO₂ with H₂ in green plants, *Nature*. 143 (1939) 204–5.
- [17] **Gaffron H., Rubin J.** Fermentative and photochemical production of hydrogen in algae, *Journal of General Physiology*. 26 (1942) 219–40.

- [18] **Gest H., Kamen M.D.** Studies on the metabolism of photosynthetic bacteria IV. Photochemical production of molecular hydrogen by growing cultures of photosynthetic bacteria, *Journal of Bacteriology*. 58 (1949) 239–45.
- [19] **Dutta D., De D., Chaudhuri S., Bhattacharya S.K.** Hydrogen production by Cyanobacteria, *Microbial Cell Factories*. 4 (2005) 36.
- [20] **Islam R., Cicek N., Sparling R., Levin D.** Effect of substrate loading on hydrogen production during anaerobic fermentation by *Clostridium thermocellum* 27405, *Applied Microbiology and Biotechnology*. 72 (2006) 576–83.
- [21] **Levin D.B., Carere C.R., Cicek N., Sparling R.** Challenges for biohydrogen production via direct lignocellulose fermentation, *International Journal of Hydrogen Energy*. 34 (2009) 7390–403.
- [22] **Das D., Veziroglu T.N.** Hydrogen production by biological processes: a survey of literature, *International Journal of Hydrogen Energy*, 26 (1) (2001) 13–28.
- [23] **Limongi A.R., Viviano E., Luca M.D., Radice R.P., Bianco G., Martelli G.** Biohydrogen from Microalgae: Production and Applications, *Applied Sciences*. 11 (2021) 1616.
- [24] **Vermaas W.Fj.** Photosynthesis and respiration in cyanobacteria. J.W. Sons (eds). *Encyclopedia of life sciences*. (2001) 1–7.
- [25] **Rexroth S., Weigand K., Rögner M.** Cyanobacterial design cell for the production of hydrogen from water. Rögner M. (ed.) *Biohydrogen*. Walter de Gruyter GmbH: Berlin, Germany. (2015) 1–14.
- [26] **Khanna N., Lindblad P.** Cyanobacterial hydrogenases and hydrogen metabolism revisited: Recent progress and future prospects, *International Journal of Molecular Sciences*. 16 (5) (2015) 10537–61.
- [27] **Nagarajan D., Lee D.J., Kondo A., Chang J.S.** Recent insights into biohydrogen production by microalgae – from biophotolysis to dark fermentation, *Bioresource Technology*. 227 (2017) 373–87.
- [28] **Sadvakasova A.K., Kossalbayev B.D., Zayadan B.K., Bolatkhan K., Alwasel S., Najafpour M.M., Tomo T., Allakhverdiev S.I.** Bioprocesses of hydrogen production by cyanobacteria cells and possible ways to increase their productivity, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 133 (2020) 110054.
- [29] **Hu Q., Sommerfeld M., Jarvis E., Ghirardi M., Posewitz M., Seibert M., Darzins A.** Microalgal Triacylglycerols as Feedstocks for Biofuel Production: Perspectives and Advances, *Plant Journal*. 54 (2008) 621–639.
- [30] **Vogt S., Lyon E.J., Shima S., Thauer R.K.** The exchange activities of [Fe] hydrogenase (iron-sulfur-cluster-free hydrogenase) from methanogenic archaea in comparison with the exchange activities of [FeFe] and [NiFe] hydrogenases, *Journal of Biological Inorganic Chemistry*. 13 (2008) 97–106.
- [31] **Vignais P.M., Billoud B.** Occurrence, classification, and biological function of hydrogenases: An overview, *Chemical Reviews*. 107 (10) (2007) 4206–72.
- [32] **Tamagnini P., Leitao E., Oliveira P., Ferreira D., Pinto F.A.L., Harris D.J., Heidorn T., Lindblad P.** Cyanobacterial hydrogenase diversity, regulation and application, *FEMS Microbiology Reviews*. 31 (2007) 692–720.
- [33] **Wegelius A., Khanna N., Esmieu Ch., Barone G.D., Pinto F., Tamagnini P., Berggren G., Lindblad P.** Generation of a functional, semisynthetic [FeFe]-hydrogenase in a photosynthetic microorganism, *Energy and Environmental Science*. Open access. (2018).
- [34] **Mishra A.K., Kaushik M.S., Tiwari D.N.** Nitrogenase and hydrogenase: enzymes for nitrogen fixation and hydrogen production in cyanobacteria, *Cyanobacteria*. 8 (2019) 173–91.
- [35] **Schutz K., Happe T., Troshina O., Lindblad P., Leitao E., Oliveira P., Tamagnini P.** Cyanobacterial H₂ production — a comparative analysis. *Planta* 218 (2004) 350–9.
- [36] **Tsygankov A.A.** Nitrogen-fixing cyanobacteria: A review, *Applied Biochemistry and Microbiology*. 43 (2007b) 250–9.
- [37] **Bothe H., Schmitz O., Yates M.G., Newton W.E.** Nitrogen fixation and hydrogen metabolism in cyanobacteria, *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 74 (4) (2010), 529–51.
- [38] **Hoffman B.M., Dean D.R., Seefeldt L.C.** Climbing nitrogenase: toward a mechanism of enzymatic nitrogen fixation, *Accounts of Chemical Research*. 42 (5) (2009) 609–19.

- [39] **Golding A.-L., Dong Zh.** Hydrogen production by nitrogenase as a potential crop rotation benefit, *Environmental Chemistry Letters*. 8 (2010) 101–21.
- [40] **Khetkorn W., Khanna N., Incharoensakdi A., Lindblad P.** Metabolic and genetic engineering of cyanobacteria for enhanced hydrogen production, *Biofuels*. 4 (2013) 535–61.
- [41] **Tamagnini P., Leitao E., Oxelfelt F.** Uptake hydrogenase in cyanobacteria: novel input from non-heterocystous strains, *Biochemical Society Transactions* (2005) 67–9.
- [42] **Shima S., Thauer R.K.** A third type of hydrogenase catalyzing H_2 activation, *The Chemical Record*, 7 (2007) 37–46.
- [43] **Salomone-Stagni M., Vogt S., Shima S., Meyer-Klaucke W.** Extended X-ray absorption fine structure of the [Fe]-hydrogenase Hmd active site. *Journal of Physics: Conference Series*. 190 (2009) 012197.
- [44] **Abdullatypov A.V., Tsygankov A.A.** Modelirovanie prostranstvennoi struktury gidrogenazy HydSL purpurnoi sernoi bakterii *Thiocapsa roseopersicina* BBS, *Kompyuternye issledovaniya i modelirovanie*. 5 (4) (2013) 737–47.
- [45] **Jimenez-Llanos J., Ramirez-Carmona M., Rendon-Castrillon L., Ocampo-Lopez C.** Sustainable biohydrogen production by *Chlorella* sp. microalgae: A review. *International Journal of Hydrogen Energy* 45 (2020) 8310–28.
- [46] **Ghirardi M.L., Posewitz M.C., Maness P.-C., Dubini A., Yu J., Seibert M.** Hydrogenases and hydrogen photoproduction in oxygenic photosynthetic organisms, *Annual Review of Plant Biology*. 58 (2007) 71–91.
- [47] **Meyer J.** [FeFe] hydrogenases and their evolution: a genomic perspective, *Cellular and Molecular Life Sciences*. 64 (2007) 1063–84.
- [48] **Meuser J.E., D'Adamo S., Jinkerson R.E., Mus F., Yang W., Ghirardi M.L., Seibert M., Grossman A.R., Posewitz M.C.** Genetic disruption of both *Chlamydomonas reinhardtii* [FeFe]-hydrogenases: Insight into the role of HYDA2 in H_2 production, *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 417 (2012) 704–9.
- [49] **Vignais P.M., Colbeau A.** Molecular biology of microbial hydrogenases, *Current Issues in Molecular Biology*. 6 (2004) 159–88.
- [50] **Melis A., Seibert M., Ghirardi M.L.** Hydrogen fuel production by transgenic microalgae. Leon R., Galvan A., Fernandez E. (eds). *Transgenic microalgae as green cell factories*. (2007) 110–21.
- [51] **English C.M., Eckert C., Brown K., Seibert M., King P.W.** Recombinant and in vitro expression systems for hydrogenases: new frontiers in basic and applied studies for biological and synthetic H_2 production, *Dalton Transactions*. 45 (2009) 9970–8.
- [52] **Eroglu E., Melis A.** Photobiological hydrogen production: Recent advances and state of the art, *Biore-source Technology*. 102 (2011) 8403–13.
- [53] **Taikhao S., Phunpruch S.** Increasing hydrogen production efficiency of N_2 -fixing cyanobacterium *Anabaena siamensis* TISTR 8012 by cell immobilization, *Energy Procedia*. 138 (2017) 366–71.
- [54] **Ghirardi M.L.** Implementation of photobiological H_2 production: the O_2 sensitivity of hydrogenases, *Photosynthesis Research*. 125 (2015) 383–93.
- [55] **Eroglu E., Melis A.** Microalgal hydrogen production research, *International Journal of Hydrogen Energy*. 41 (2016) 12772–98.
- [56] **Bolatkhan K., Kossalbayev B.D., Zayadan B.K., Tomo T., Veziroglu T.N., Allakhverdiev S.I.** Hydrogen production from phototrophic microorganisms: Reality and perspectives, *International Journal of Hydrogen Energy*. 44 (2019) 5799–811.
- [57] **Touloupakis E., Torzillo G.** Photobiological hydrogen production, *Solar Hydrogen Production*. (2019) 511–25.
- [58] **Kossalbayev B.D., Tomo T., Zayadan B.K., Sadvakasova A.K., Bolatkhan K., Alwasel S., Allakhverdiev S.I.** Determination of the potential of cyanobacterial strains for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*. 45 (2020) 2627–39.

- [59] **Kamshybayeva G.K., Kossalbayev B.D., Sadvakasova A.K., Zayadan B.K., Bozieva A.M., Dunikov D.O., Alwasel S., Allakhverdiev S.I.** Strategies and economic feasibilities in cyanobacterial hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*. 47 (2022) 29661–84.
- [60] **Ananyev G., Carrieri D., Dismukes G.Ch.** Optimization of metabolic capacity and flux through environmental cues to maximize hydrogen production by the cyanobacterium “*Arthrospira (Spirulina) maxima*”, *Applied and environmental microbiology*. 74 (19) (2008) 6102–13.
- [61] **Taikhao S., Incharoensakdi A., Phunpruch S.** Dark fermentative hydrogen production by the unicellular halotolerant cyanobacterium *Aphanothece halophytica* grown in seawater, *Journal of Applied Physiology*. 27 (2014) 187–96.
- [62] **Singh H., Das D.** Biohydrogen from microalgae. *Handbook of Microalgae-Based Processes and Products*. (2020) 391–418.
- [63] **Mathews J., Wang G.** Metabolic pathway engineering for enhanced biohydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*. 34 (2009) 7404–16.
- [64] **Goswami R.K., Mehariya S., Obulisamy P.K., Verma P.** Advanced microalgae-based renewable biohydrogen production systems: A review, *Bioresource Technology*. 320 (A) (2021) 124301.
- [65] **Allahverdiyeva Y., Leino H., Saari L., Fewer D.P., Shunmugam S., Sivonen K., Aro E.-M.** Screening for biohydrogen production by cyanobacteria isolated from the Baltic Sea and Finnish lakes, *International Journal of Hydrogen Energy*. 35 (2010) 1117–27.
- [66] **Bandyopadhyay A., Stöckel J., Min H., Sherman L.A., Pakrasi H.B.** High rates of photobiological H_2 production by a cyanobacterium under aerobic conditions, *Nature Communications*. 1 (139) (2010).
- [67] **Chongsuksantikul A., Asami K., Yoshikawa S., Ohtaguchi K.** Hydrogen production by anaerobic dark metabolism in *Synechocystis* sp. strain PCC 6803-GT: effect of monosaccharide in nitrate free solution, *Journal of Biochemical Technology*. 5 (3) (2014) 735–42.
- [68] **Min H., Sherman L.A.** Hydrogen production by the unicellular, diazotrophic cyanobacterium *Cyanothece* sp. strain ATCC 51142 under conditions of continuous light, *Applied and Environmental Microbiology*. 76 (2010) 4293–301.
- [69] **Kumazawa T., Sato S., Kanenari D., Kunimatsu A., Hirose R., Matsuba S., Obara H., Suzuki M., Sato M., Onodera J.** Precursor of carthamin, a constituent of safflower, *Chemical Letters*. 23 (12) (1994).
- [70] **Khetkorn W., Lindblad P., Incharoensakdi A.** Inactivation of uptake hydrogenase leads to enhanced and sustained hydrogen production with high nitrogenase activity under high light exposure in the cyanobacterium *Anabaena siamensis* TISTR 8012, *Journal of Biological Engineering*. 6 (19) (2012a).
- [71] **Marques A.E., Barbosa A.E., Jotta J., Coelho M.C., Tamagnini P., Gouveia L.** Biohydrogen production by *Anabaena* sp. PCC 7120 wild-type and mutants under different conditions: Light, nickel, propane, carbon dioxide and nitrogen, *Biomass and Bioenergy*. 35 (2011) 4426–34.
- [72] **Touloupakis E., Rontogiannis G., Benavides A.M.S., Cicchi B., Ghanotakis D.F., Torzillo G.** Hydrogen production by immobilized *Synechocystis* sp. PCC 6803, *International Journal of Hydrogen Energy*. 41 (2016) 15181–6.
- [73] **Yeager Ch.M., Milliken Ch.E., Bagwell Ch.E., Staples L., Berseth P.A., Sessions H.T.** Evaluation of experimental conditions that influence hydrogen production among heterocystous cyanobacteria, *International Journal of Hydrogen Energy*. 36 (2011) 7487–99.
- [74] **Yoshino F., Ikeda H., Masukawa H., Sakurai H.** High photobiological hydrogen production activity of *Nostoc* sp. PCC 7422 uptake hydrogenase-deficient mutant with high nitrogenase activity, *Marine Biotechnology*. 9 (2007) 101–12.
- [75] **Khetkorn W., Baebprasert W., Lindblad P., Incharoensakdi A.** Redirecting the electron flow towards the nitrogenase and bidirectional Hox-hydrogenase by using specific inhibitors results in enhanced H_2 production in the cyanobacterium *Anabaena siamensis* TISTR 8012, *Bioresource Technology*. 118 (2012b) 265–71.
- [76] **Taikhao S., Junyapoon S., Incharoensakdi A., Phunpruch S.** Factors affecting biohydrogen production by unicellular halotolerant cyanobacterium *Aphanothece halophytica*, *Journal of Applied Phycology*. 25 (2013) 575–85.

- [77] Antal T.K., Matorin D.N., Kukarskikh G.P., Lambreva M.D., Tyystjarvi E., Krendeleva T.E., Tsygankov A.A., Rubin A.B. Pathways of hydrogen photoproduction by immobilized *Chlamydomonas reinhardtii* cells deprived of sulfur, *International Journal of Hydrogen Energy*. 39 (2014) 18194–203.
- [78] Volgusheva A.A., Styring S., Mamedov F. Increased photosystem II stability promotes H₂ production in sulfur-deprived *Chlamydomonas reinhardtii*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 110 (2013) 7223–28.
- [79] Volgusheva A.A., Jokel M., Allahverdiyeva Y., Kukarskikh G.P., Lukashev E.P., Lambreva M.D., Krendeleva T.E., Antal T.K. Comparative analyses of H₂ photoproduction in magnesium- and sulfur-starved *Chlamydomonas reinhardtii* cultures, *Physiologia Plantarum*. 161 (2017) 124–37.
- [80] Eilenberg H., Weiner I., Ben-Zvi O., Pundak C., Marmari A., Liran O., Wecker M.S., Milrad Y., Yacobi I. The dual effect of a ferredoxin-hydrogenase fusion protein in vivo: successful divergence of the photosynthetic electron flux towards hydrogen production and elevated oxygen tolerance, *Biotechnology for Biofuels*. 9 (2016) 182.
- [81] Jokel M., Nagy V., Tóth S.Z., Kosourov S., Allahverdiyeva Y. Elimination of the flavodiiron electron sink facilitates long-term H₂ photoproduction in green algae, *Biotechnology for Biofuels*. 12 (2019) 1–16.
- [82] Philipps G., Happe T., Hemschemeier A. Nitrogen deprivation results in photosynthetic hydrogen production in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Planta*. 235 (2011) 729–45.
- [83] Sengmee D., Cheirsilp B., Suksaroge T.T., Prasertsan P. Biophotolysis-based Hydrogen and Lipid Production by oleaginous microalgae using crude glycerol as exogenous carbon source, *International Journal of Hydrogen Energy*. (2017) 1970–6.
- [84] Batyrova K., Gavisheva A., Ivanova E., Liu J., Tsygankov A. Sustainable hydrogen photoproduction by phosphorus-deprived marine green microalgae *Chlorella* sp., *International Journal of Molecular Sciences*. 16 (2015) 2705–16.
- [85] Oncel S.S., Kose A., Faraloni C., Imamoglu E., Elibol M., Torzillo G., Sukan F.V. Biohydrogen production using mutant strains of *Chlamydomonas reinhardtii*: the effects of light intensity and illumination patterns, *Biochemical Engineering Journal*. 92 (2014) 47–2.
- [86] Mithuna S., Mubarakb M., Shaijac A., Suchitrad T.V. Experimental investigation of biohydrogen production from indigenous algae and *Chlorella Pyrenoidosa*, *International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)*. (2013) 334–37.
- [87] Manoyan J., Gabrielyan L., Kozel N., Trchounian A. Regulation of biohydrogen production by protonophores in novel green microalgae *Parachlorella kessleri*, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 199 (2019) 111597.
- [88] Alalayah W.M., Alhamed Y.A., Al-zahrani A., Edris G. Influence of culture parameters on biological hydrogen production using green algae *Chlorella vulgaris*. *Revista de Chimie*. 66 (2015) 788–91.
- [89] Rashid N., Lee K., Han J.I., Gross M. Hydrogen production by immobilized *Chlorella vulgaris*: optimizing pH, carbon source and light, *Bioprocess and Biosystems Engineering* 36 (2013) 867–72.
- [90] Burrows E.H., Chaplen F.W.R., Ely R.L. Optimization of media nutrient composition for increased photofermentative hydrogen production by *Synechocystis* sp. PCC 6803, *International Journal of Hydrogen Energy*. 33 (2008) 6092–9.
- [91] Sakurai H., Tsygankov A.A. Photobiological biohydrogen production, *Second and Third Generation of Feedstocks*. Chapter 16 (2019) 437–67.
- [92] Pansook S., Incharoensakdi A., Phunpruch S. Effects of the photosystem II inhibitors CCCP and DC-MU on hydrogen production by the unicellular halotolerant cyanobacterium *Aphanothece halophytica*, *The Scientific World Journal*. (2019) 1–10.
- [93] Appel J., Phunpruch S., Steinmüller K., Schulz R. The bidirectional hydrogenase of *Synechocystis* sp. PCC 6803 works as an electron valve during photosynthesis, *Archives of Microbiology*. 173 (2000) 333–338.
- [94] McNeely K., Kumaraswamy G.K., Guerraa T., Bennettea N., Ananyev G., Dismukes G.Ch. Metabolic switching of central carbon metabolism in response to nitrate: Application to autofermentative hydrogen production in cyanobacteria, *Journal of Biotechnology*. 182–183 (2014) 83–91.

- [95] Papazi A., Korelidou A., Andronis E., Parasyri A., Stamatis N., Kotzabasis K. Bioenergetic reprogramming plasticity under nitrogen depletion by the unicellular green alga *Scenedesmus obliquus*, *Planta*. 247 (2017) 679–92.
- [96] Vargas S.R., Zaiat M., do Carmo Calijuri M. Influence of culture age, ammonium and organic carbon in hydrogen production and nutrient removal by *Anabaena* sp. in nitrogen-limited cultures, *International Journal of Hydrogen Energy*. 45, (2020) 30222–31.
- [97] Masukawa H., Kitashima M., Inoue K., Sakurai H., Hausinger R.P. Genetic engineering of cyanobacteria to enhance biohydrogen production from sunlight and water, *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. 41 (2012) 169–73.
- [98] Torzillo G., Scoma A., Faraloni C., Ena A., Johanningmeier U. Increased hydrogen photoproduction by means of a sulfur-deprived *Chlamydomonas reinhardtii* D1 protein mutant, *International Journal of Hydrogen Energy*. 34 (2009) 4529–36.
- [99] Polle J.E.W., Kanakagiri S., Jin E., Masuda T., Melis A. Truncated chlorophyll antenna size of the photosystems – a practical method to improve microalgal productivity and hydrogen production in mass culture, *International Journal of Hydrogen Energy*. 27 (2002) 1257–64.
- [100] Melis A. Solar energy conversion efficiencies in photosynthesis: Minimizing the chlorophyll antennae to maximize efficiency, *Plant Science*. 177 (2009) 272–80.
- [101] Kosourov S.N., Ghirardi M.L., Seibert M.A. A truncated antenna mutant of *Chlamydomonas reinhardtii* can produce more hydrogen than the parental strain, *International Journal of Hydrogen Energy*. 36 (2011) 2044–8.
- [102] Sakurai H., Masukawa H., Kitashima M., Inoue K. Photobiological hydrogen production: Bioenergetics and challenges for its practical application, *Journal of Photochemistry and Photobiology*. 17 (2013) 1–25.
- [103] Li H., Zhang L., Shu L., Zhuang X., Liu Y., Chen J., Hu Z. Sustainable photosynthetic H₂-production mediated by artificial miRNA silencing of OEE2 gene in green alga *Chlamydomonas reinhardtii*, *International Journal of Hydrogen Energy*. 40 (2015) 5609–16.
- [104] Li H., Liu Y., Wang Y., Chen M., Zhuang X., Wang C., Wang J., Hu Z. Improved photobio-H₂ production regulated by artificial miRNA targeting psbA in green microalga *Chlamydomonas reinhardtii*, *Biotechnology for Biofuels*. 11 (2018) 36.
- [105] Skjånes K., Andersen U., Heidorn T., Borgvang S.A. Design and construction of a photobioreactor for hydrogen production, including status in the field, *Journal of Applied Phycology*. 28 (2016) 2205–23.
- [106] Sevda S., Bhattacharya S., Abu Reesh I.M., Bhuvanesh S., Sreekrishnan T.R. Challenges in the design and operation of an efficient photobioreactor for microalgae cultivation and hydrogen production, *Biohydrogen Production: Sustainability of Current Technology and Future Perspective*. (2017) 147–62.
- [107] Kroumov A.D., Scheufele F.B., Trigueros D.E.G., Modenes A.N., Zaharieva M., Najdenski H. Modeling and technoeconomic analysis of algae for bioenergy and coproducts, *Algal Green Chemistry: Recent Progress in Biotechnology*. (2017) 201–41.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БОЗИЕВА Айшат Магомедовна – младший научный сотрудник, аспирант, *Институт Физиологии Растений им. К.А. Тимирязева РАН, без степени.*

E-mail: ayshat2696@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6713-8819>

ЗАДНЕПРОВСКАЯ Елена Вадимовна – младший научный сотрудник, аспирант, *Институт Физиологии Растений им. К.А. Тимирязева РАН, без степени.*

E-mail: zadneprovskaya@ifr.moscow

АЛЛАХВЕРДИЕВ Сулейман Ифхан оглы — главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт Физиологии Растений им. К.А. Тимирязева РАН, д-р биол. наук.

E-mail: suleyman.allakhverdiev@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0452-232X>

REFERENCES

- [1] **A.A. Tsygankov**, Biological generation of hydrogen, *Russian Journal of General Chemistry*. 77 (2007a) 685–93.
- [2] **P.C. Hallenbeck**, Hydrogen production by cyanobacteria, *Microbial technologies in advanced biofuels production*. (2012) 15–28.
- [3] **P.C. Hallenbeck, C.Z. Lazaro, E. Sagir**, Photosynthesis and hydrogen from photosynthetic microorganisms. *Microalgal Hydrogen Production: Achievements and Perspectives*. Seibert M. and Torzillo G (eds.). European Society for Photobiology. Chapter 1 (2018) 3–30.
- [4] **S.I. Allakhverdiev, V.D. Kreslavski, V. Thavasi, S.K. Zharmukhamedov, V.V. Klimov, T. Nagata, H. Nishihara, S. Ramakrishna**, Hydrogen photoproduction by use of photosynthetic organisms and biomimetic systems, *Photochemical and Photobiological Sciences*. 8 (2) (2009) 148–56.
- [5] **M.L. Ghirardi, A. Dubini, J. Yu, P-Ch. Maness**, Photobiological hydrogen-producing systems, *Chemical Society Reviews*. 38 (2009) 52–61.
- [6] **S.I. Allakhverdiev, V.D. Kreslavski, V. Thavasi, S.K. Zharmukhamedov, V.V. Klimov, S. Ramakrishna et al.**, Photosynthetic energy conversion: hydrogen photoproduction by natural and biomimetic systems. Mukherjee A., (ed.) *Biomimetics, learning from nature*. Croatia: In-Tech, Vukovar; (2010) 49–76.
- [7] **S.I. Allakhverdiev, V. Thavasi, V.D. Kreslavski, S.K. Zharmukhamedov, V.V. Klimov, S. Ramakrishna et al.**, Photosynthetic hydrogen production, *Photochemical and Photobiological Sciences*. 11 (2011) 101–13.
- [8] **T.K. Antal, T.E. Krendelewa, V.Z. Pashchenko, A.B. Rubin, K. Stensjo, E. Tyystjarvi et al.**, Photosynthetic hydrogen production: mechanisms and approaches. Azbar N., Levin D. (eds.) *State of the art and progress in production of biohydrogen*. Canada: Bentham Science Publishers; (2011) 25–53.
- [9] **N.T. Veziroglu. Foreword**. Azbar N., Levin, D. (eds.), *State of the art and progress in production of biohydrogen*. Canada: Bentham Science Publishers; (2011) 25–53.
- [10] **A. Melis, T. Happe**, Hydrogen production: green algae as a source of energy, *Plant Physiology*. 127 (2001) 740–8.
- [11] **J. Appel**, The physiology and functional genomics of cyanobacterial hydrogenases and approaches towards biohydrogen production. Burnap R.L., Vermaas W.F.J., Govindjee, Sharkey T.D. (eds.) *Functional genomics and evolution of photosynthetic systems, advances in photosynthesis and respiration*. Dordrecht, The Netherlands: Springer. (2012) 357–81.
- [12] **P.H. Homann**, Hydrogen metabolism of green algae: discovery and early research—a tribute to Hans Gaffron and his coworkers. Govindjee, Beatty J.T., Gest H., Allen J.F. (eds.) *Discoveries in photosynthesis, advances in photosynthesis and respiration*, Dordrecht, The Netherlands: Springer. 20 (2005) 119–29.
- [13] **W. Khetkorn, R.P. Rastogi, A. Incharoensakdi, P. Lindblad, D. Madamwar, A. Pandey, C. Larroche**, Microalgal hydrogen production — A review, *Bioresource Technology*. 243 (2017) 1194–206.
- [14] **M. Aziz**, Integrated hydrogen production and power generation from microalgae, *International Journal of Hydrogen Energy*. 41 (2016) 104–112.
- [15] **S.E. Hosseini, M.A. Wahid**, Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 57 (2016) 850–66.
- [16] **H. Gaffron**, Reduction of CO₂ with H₂ in green plants, *Nature*. 143 (1939) 204–5.

- [17] **H. Gaffron, J. Rubin**, Fermentative and photochemical production of hydrogen in algae, *Journal of General Physiology*. 26 (1942) 219–40.
- [18] **H. Gest, M.D. Kamen**, Studies on the metabolism of photosynthetic bacteria IV. Photochemical production of molecular hydrogen by growing cultures of photosynthetic bacteria, *Journal of Bacteriology*. 58 (1949) 239–45.
- [19] **D. Dutta, D. De, S. Chaudhuri, S.K. Bhattacharya**, Hydrogen production by Cyanobacteria, *Microbial Cell Factories*. 4 (2005) 36.
- [20] **R. Islam, N. Cicek, R. Sparling, D. Levin**, Effect of substrate loading on hydrogen production during anaerobic fermentation by *Clostridium thermocellum* 27405, *Applied Microbiology and Biotechnology*. 72 (2006) 576–83.
- [21] **D.B. Levin, C.R. Carere, N. Cicek, R. Sparling**, Challenges for biohydrogen production via direct lignocellulose fermentation, *International Journal of Hydrogen Energy*. 34 (2009) 7390–403.
- [22] **D. Das, T.N. Veziroglu**, Hydrogen production by biological processes: a survey of literature, *International Journal of Hydrogen Energy*. 26 (1) (2001) 13–28.
- [23] **A.R. Limongi, E. Viviano, M.D. Luca, R.P. Radice, G. Bianco, G. Martelli**, Biohydrogen from Microalgae: Production and Applications, *Applied Sciences*. 11 (2021) 1616.
- [24] **W.Fj. Vermaas**, Photosynthesis and respiration in cyanobacteria. J.W. Sons (eds). *Encyclopedia of life sciences*. (2001) 1–7.
- [25] **S. Rexroth, K. Weigand, M. Rögner**, Cyanobacterial design cell for the production of hydrogen from water. Rögner M. (ed.) *Biohydrogen*. Walter de Gruyter GmbH: Berlin, Germany. (2015) 1–14.
- [26] **N. Khanna, P. Lindblad**, Cyanobacterial hydrogenases and hydrogen metabolism revisited: Recent progress and future prospects, *International Journal of Molecular Sciences*. 16 (5) (2015) 10537–61.
- [27] **D. Nagarajan, D.J. Lee, A. Kondo, J.S. Chang**, Recent insights into biohydrogen production by microalgae – from biophotolysis to dark fermentation, *Bioresource Technology*. 227 (2017) 373–87.
- [28] **A.K. Sadvakasova, B.D. Kossalbayev, B.K. Zayadan, K. Bolatkhan, S. Alwasel, M.M. Najafpour, T. Tomo, S.I. Allakhverdiev**, Bioprocesses of hydrogen production by cyanobacteria cells and possible ways to increase their productivity, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 133 (2020) 110054.
- [29] **Q. Hu, M. Sommerfeld, E. Jarvis, M. Ghirardi, M. Posewitz, M. Seibert, A. Darzins**, Microalgal Triacylglycerols as Feedstocks for Biofuel Production: Perspectives and Advances, *Plant Journal*. 54 (2008) 621–639.
- [30] **S. Vogt, E.J. Lyon, S. Shima, R.K. Thauer**, The exchange activities of [Fe] hydrogenase (iron-sulfur-cluster-free hydrogenase) from methanogenic archaea in comparison with the exchange activities of [FeFe] and [NiFe] hydrogenases, *Journal of Biological Inorganic Chemistry*. 13 (2008) 97–106.
- [31] **P.M. Vignais, B. Billoud**, Occurrence, classification, and biological function of hydrogenases: An overview, *Chemical Reviews*. 107(10) (2007) 4206–72.
- [32] **P. Tamagnini, E. Leita, P. Oliveira, D. Ferreira, F.A.L. Pinto, D.J. Harris, T. Heidorn, P. Lindblad**, Cyanobacterial hydrogenase diversity, regulation and application, *FEMS Microbiology Reviews*. 31 (2007) 692–720.
- [33] **A. Wegelius, N. Khanna, Ch. Esmieu, G.D. Barone, F. Pinto, P. Tamagnini, G. Berggren, P. Lindblad**, Generation of a functional, semisynthetic [FeFe]-hydrogenase in a photosynthetic microorganism, *Energy and Environmental Science*. Open access. (2018).
- [34] **A.K. Mishra, M.S. Kaushik, D.N. Tiwari**, Nitrogenase and hydrogenase: enzymes for nitrogen fixation and hydrogen production in cyanobacteria, *Cyanobacteria*. 8 (2019) 173–91.
- [35] **K. Schutz, T. Happe, O. Troshina, P. Lindblad, E. Leita, P. Oliveira, P. Tamagnini**, Cyanobacterial H₂ production — a comparative analysis. *Planta* 218 (2004) 350–9.
- [36] **A.A. Tsygankov**, Nitrogen-fixing cyanobacteria: A review, *Applied Biochemistry and Microbiology*. 43 (2007b) 250–9.
- [37] **H. Bothe, O. Schmitz, M.G. Yates, W.E. Newton**, Nitrogen fixation and hydrogen metabolism in cyanobacteria, *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 74 (4) (2010), 529–51.

- [38] **B.M. Hoffman, D.R. Dean, L.C. Seefeldt**, Climbing nitrogenase: toward a mechanism of enzymatic nitrogen fixation, *Accounts of Chemical Research*. 42 (5) (2009) 609–19.
- [39] **A-L. Golding, Zh. Dong**, Hydrogen production by nitrogenase as a potential crop rotation benefit, *Environmental Chemistry Letters*. 8 (2010) 101–21.
- [40] **W. Khetkorn, N. Khanna, A. Incharoensakdi, P. Lindblad**, Metabolic and genetic engineering of cyanobacteria for enhanced hydrogen production, *Biofuels*. 4 (2013) 535–61.
- [41] **P. Tamagnini, E. Leita, F. Oxelfelt**, Uptake hydrogenase in cyanobacteria: novel input from non-heterocystous strains, *Biochemical Society Transactions* (2005) 67–9.
- [42] **S. Shima, R.K. Thauer**, A third type of hydrogenase catalyzing H_2 activation, *The Chemical Record*, 7 (2007) 37–46.
- [43] **M. Salomone-Stagni, S. Vogt, S. Shima, W. Meyer-Klaucke**, Extended X-ray absorption fine structure of the [Fe]-hydrogenase Hmd active site. *Journal of Physics: Conference Series*. 190 (2009) 012197.
- [44] **A.V. Abdullatypov, A.A. Tsygankov**, Modelirovanie prostranstvennoi struktury gidrogenazy HydSL purpurnoi sernoi bakterii *Thiocapsa roseopersicina* BBS, *Kompyuternye issledovaniya i modelirovanie*. 5(4) (2013) 737–47.
- [45] **J. Jimenez-Llanos, M. Ramirez-Carmona, L. Rendon-Castrillon, C. Ocampo-Lopez**, Sustainable bi-hydrogen production by *Chlorella* sp. microalgae: A review. *International Journal of Hydrogen Energy* 45 (2020) 8310–28.
- [46] **M.L. Ghirardi, M.C. Posewitz, P.-C. Maness, A. Dubini, J. Yu, M. Seibert**, Hydrogenases and hydrogen photoproduction in oxygenic photosynthetic organisms, *Annual Review of Plant Biology*. 58 (2007) 71–91.
- [47] **J. Meyer**, [FeFe] hydrogenases and their evolution: a genomic perspective, *Cellular and Molecular Life Sciences*. 64 (2007) 1063–84.
- [48] **J.E. Meuser, S. D'Adamo, R.E. Jinkerson, F. Mus, W. Yang, M.L. Ghirardi, M. Seibert, A.R. Grossman, M.C. Posewitz**, Genetic disruption of both *Chlamydomonas reinhardtii* [FeFe]-hydrogenases: Insight into the role of HYDA2 in H_2 production, *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 417 (2012) 704–9.
- [49] **P.M. Vignais, A. Colbeau**, Molecular biology of microbial hydrogenases, *Current Issues in Molecular Biology*. 6 (2004) 159–88.
- [50] **A. Melis, M. Seibert, M.L. Ghirardi**, Hydrogen fuel production by transgenic microalgae. Leon R., Galvan A., Fernandez E. (eds). *Transgenic microalgae as green cell factories*. (2007) 110–21.
- [51] **C.M. English, C. Eckert, K. Brown, M. Seibert, P.W. King**, Recombinant and in vitro expression systems for hydrogenases: new frontiers in basic and applied studies for biological and synthetic H_2 production, *Dalton Transactions*. 45 (2009) 9970–8.
- [52] **E. Eroglu, A. Melis**, Photobiological hydrogen production: Recent advances and state of the art, *Biore-source Technology*. 102 (2011) 8403–13.
- [53] **S. Taikhao, S. Phunpruch**, Increasing hydrogen production efficiency of N_2 -fixing cyanobacterium *Anabaena siamensis* TISTR 8012 by cell immobilization, *Energy Procedia*. 138 (2017) 366–71.
- [54] **M.L. Ghirardi**, Implementation of photobiological H_2 production: the O_2 sensitivity of hydrogenases, *Photosynthesis Research*. 125 (2015) 383–93.
- [55] **E. Eroglu, A. Melis**, Microalgal hydrogen production research, *International Journal of Hydrogen Energy*. 41 (2016) 12772–98.
- [56] **K. Bolatkhan, B.D. Kossalbayev, B.K. Zayadan, T. Tomo, T.N. Veziroglu, S.I. Allakhverdiev**, Hydrogen production from phototrophic microorganisms: Reality and perspectives, *International Journal of Hydrogen Energy*. 44 (2019) 5799–811.
- [57] **E. Touloupakis, G. Torzillo**, Photobiological hydrogen production, *Solar Hydrogen Production*. (2019) 511–25.
- [58] **B.D. Kossalbayev, T. Tomo, B.K. Zayadan, A.K. Sadvakasova, K. Bolatkhan, S. Alwasel, S.I. Allakhverdiev**, Determination of the potential of cyanobacterial strains for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*. 45 (2020) 2627–39.

- [59] G.K. Kamshybayeva, B.D. Kossalbayev, A.K. Sadvakasova, B.K. Zayadan, A.M. Bozieva, D.O. Dunikov, S. Alwasel, S.I. Allakhverdiev, Strategies and economic feasibilities in cyanobacterial hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*. 47 (2022) 29661–84.
- [60] G. Ananyev, D. Carrieri, G. Ch. Dismukes, Optimization of metabolic capacity and flux through environmental cues to maximize hydrogen production by the cyanobacterium “*Arthrospira (Spirulina) maxima*”, *Applied and environmental microbiology*. 74 (19) (2008) 6102–13.
- [61] S. Taikhao, A. Incharoensakdi, S. Phunpruch, Dark fermentative hydrogen production by the unicellular halotolerant cyanobacterium *Aphanothece halophytica* grown in seawater, *Journal of Applied Physiology*. 27 (2014) 187–96.
- [62] H. Singh, D. Das, Biohydrogen from microalgae. *Handbook of Microalgae-Based Processes and Products*. (2020) 391–418.
- [63] J. Mathews, G. Wang, Metabolic pathway engineering for enhanced biohydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*. 34 (2009) 7404–16.
- [64] R.K. Goswami, S. Mehariya, P. K. Obulisamy, P. Verma, Advanced microalgae-based renewable biohydrogen production systems: A review, *Bioresource Technology*. 320(A) (2021) 124301.
- [65] Y. Allahverdiyeva, H. Leino, L. Saari, D.P. Fewer, S. Shunmugam, K. Sivonen, E.-M. Aro, Screening for biohydrogen production by cyanobacteria isolated from the Baltic Sea and Finnish lakes, *International Journal of Hydrogen Energy*. 35 (2010) 1117–27.
- [66] A. Bandyopadhyay, J. Stöckel, H. Min, L.A. Sherman, H.B. Pakrasi, High rates of photobiological H_2 production by a cyanobacterium under aerobic conditions, *Nature Communications*. 1 (139) (2010).
- [67] A. Chongsuksantikul, K. Asami, S. Yoshikawa, K. Ohtaguchi, Hydrogen production by anaerobic dark metabolism in *Synechocystis* sp. strain PCC 6803-GT: effect of monosaccharide in nitrate free solution, *Journal of Biochemical Technology*. 5(3) (2014) 735–42.
- [68] H. Min, L.A. Sherman, Hydrogen production by the unicellular, diazotrophic cyanobacterium *Cyanothece* sp. strain ATCC 51142 under conditions of continuous light, *Applied and Environmental Microbiology*. 76 (2010) 4293–301.
- [69] T. Kumazawa, S. Sato, D. Kanenari, A. Kunitatsu, R. Hirose, S. Matsuba, H. Obara, M. Suzuki, M. Sato, J. Onodera, Precursor of carthamin, a constituent of safflower, *Chemical Letters*. 23 (12) (1994).
- [70] W. Khetkorn, P. Lindblad, A. Incharoensakdi, Inactivation of uptake hydrogenase leads to enhanced and sustained hydrogen production with high nitrogenase activity under high light exposure in the cyanobacterium *Anabaena siamensis* TISTR 8012, *Journal of Biological Engineering*. 6 (19) (2012a).
- [71] A.E. Marques, A.E. Barbosa, J. Jotta, M.C. Coelho, P. Tamagnini, L. Gouveia, Biohydrogen production by *Anabaena* sp. PCC 7120 wild-type and mutants under different conditions: Light, nickel, propane, carbon dioxide and nitrogen, *Biomass and Bioenergy*. 35 (2011) 4426–34.
- [72] E. Touloupakis, G. Rontogiannis, A.M.S. Benavides, B. Cicchi, D.F. Ghanotakis, G. Torzillo, Hydrogen production by immobilized *Synechocystis* sp. PCC 6803, *International Journal of Hydrogen Energy*. 41 (2016) 15181–6.
- [73] Ch.M. Yeager, Ch.E. Milliken, Ch.E. Bagwell, L. Staples, P.A. Berseth, H.T. Sessions, Evaluation of experimental conditions that influence hydrogen production among heterocystous cyanobacteria, *International Journal of Hydrogen Energy*. 36 (2011) 7487–99.
- [74] F. Yoshino, H. Ikeda, H. Masukawa, H. Sakurai, High photobiological hydrogen production activity of *Nostoc* sp. PCC 7422 uptake hydrogenase-deficient mutant with high nitrogenase activity, *Marine Biotechnology*. 9 (2007) 101–12.
- [75] W. Khetkorn, W. Baebprasert, P. Lindblad, A. Incharoensakdi, Redirecting the electron flow towards the nitrogenase and bidirectional Hox-hydrogenase by using specific inhibitors results in enhanced H_2 production in the cyanobacterium *Anabaena siamensis* TISTR 8012, *Bioresource Technology*. 118 (2012b) 265–71.
- [76] S. Taikhao, S. Junyapoon, A. Incharoensakdi, S. Phunpruch, Factors affecting biohydrogen production by unicellular halotolerant cyanobacterium *Aphanothece halophytica*, *Journal of Applied Phycology*. 25 (2013) 575–85.

- [77] T.K. Antal, D.N. Matorin, G.P. Kukarskikh, M.D. Lambreva, E. Tyystjarvi, T.E. Krendeleva, A.A. Tsygankov, A.B. Rubin, Pathways of hydrogen photoproduction by immobilized *Chlamydomonas reinhardtii* cells deprived of sulfur, *International Journal of Hydrogen Energy*. 39 (2014) 18194–203.
- [78] A.A. Volgusheva, S. Styring, F. Mamedov, Increased photosystem II stability promotes H₂ production in sulfur-deprived *Chlamydomonas reinhardtii*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 110 (2013) 7223–28.
- [79] A.A. Volgusheva, M. Jokel, Y. Allahverdiyeva, G.P. Kukarskikh, E.P. Lukashev, M.D. Lambreva, T.E. Krendeleva, T.K. Antal, Comparative analyses of H₂ photoproduction in magnesium- and sulfur-starved *Chlamydomonas reinhardtii* cultures, *Physiologia Plantarum*. 161 (2017) 124–37.
- [80] H. Eilenberg, I. Weiner, O. Ben-Zvi, C. Pundak, A. Marmari, O. Liran, M.S. Wecker, Y. Milrad, I. Yacobi, The dual effect of a ferredoxin-hydrogenase fusion protein in vivo: successful divergence of the photosynthetic electron flux towards hydrogen production and elevated oxygen tolerance, *Biotechnology for Biofuels*. 9 (2016) 182.
- [81] M. Jokel, V. Nagy, S.Z. Tóth, S. Kosourov, Y. Allahverdiyeva, Elimination of the flavodiiron electron sink facilitates long-term H₂ photoproduction in green algae, *Biotechnology for Biofuels*. 12 (2019) 1–16.
- [82] G. Philipps, T. Happe, A. Hemschemeier, Nitrogen deprivation results in photosynthetic hydrogen production in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Planta*. 235 (2011) 729–45.
- [83] D. Sengmee, B. Cheirsilp, T.T. Suksaroge, P. Prasertsan, Biophotolysis-based Hydrogen and Lipid Production by oleaginous microalgae using crude glycerol as exogenous carbon source, *International Journal of Hydrogen Energy*. (2017) 1970–6.
- [84] K. Batyrova, A. Gavrisheva, E. Ivanova, J. Liu, A. Tsygankov, Sustainable hydrogen photoproduction by phosphorus-deprived marine green microalgae *Chlorella* sp., *International Journal of Molecular Sciences*. 16 (2015) 2705–16.
- [85] S.S. Oncel, A. Kose, C. Faraloni, E. Imamoglu, M. Elibol, G. Torzillo, F.V. Sukan, Biohydrogen production using mutant strains of *Chlamydomonas reinhardtii*: the effects of light intensity and illumination patterns, *Biochemical Engineering Journal*. 92 (2014) 47–2.
- [86] S. Mithuna, M. Mubarakb, A. Shaijac, T.V. Suchitrad, Experimental investigation of biohydrogen production from indigenous algae and *Chlorella Pyrenoidosa*, *International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)*. (2013) 334–37.
- [87] J. Manoyan, L. Gabrielyan, N. Kozel, A. Trchounian, Regulation of biohydrogen production by protonophores in novel green microalgae *Parachlorella kessleri*, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 199 (2019) 111597.
- [88] W.M. Alalayah, Y.A. Alhamed, A. Al-zahrani, G. Edris, Influence of culture parameters on biological hydrogen production using green algae *Chlorella vulgaris*. *Revista de Chimie*. 66 (2015) 788–91.
- [89] N. Rashid, K. Lee, J.I. Han, M. Gross, Hydrogen production by immobilized *Chlorella vulgaris*: optimizing pH, carbon source and light, *Bioprocess and Biosystems Engineering* 36 (2013) 867–72.
- [90] E.H. Burrows, F.W.R. Chaplen, R.L. Ely, Optimization of media nutrient composition for increased photofermentative hydrogen production by *Synechocystis* sp. PCC 6803, *International Journal of Hydrogen Energy*. 33 (2008) 6092–9.
- [91] H. Sakurai, A.A. Tsygankov, Photobiological biohydrogen production, *Second and Third Generation of Feedstocks*. Chapter 16 (2019) 437–67.
- [92] S. Pansook, A. Incharoensakdi, S. Phunpruch, Effects of the photosystem II inhibitors CCCP and DC-MU on hydrogen production by the unicellular halotolerant cyanobacterium *Aphanothece halophytica*, *The Scientific World Journal*. (2019) 1–10.
- [93] J. Appel, S. Phunpruch, K. Steinmüller, R. Schulz, The bidirectional hydrogenase of *Synechocystis* sp. PCC 6803 works as an electron valve during photosynthesis, *Archives of Microbiology*. 173 (2000) 333–338.
- [94] K. McNeely, G.K. Kumaraswamy, T. Guerraa, N. Bennettea, G. Ananyev, G. Ch. Dismukes, Metabolic switching of central carbon metabolism in response to nitrate: Application to autofermentative hydrogen production in cyanobacteria, *Journal of Biotechnology*. 182–183 (2014) 83–91.

- [95] A. Papazi, A. Korelidou, E. Andronis, A. Parasyri, N. Stamatis, K. Kotzabasis, Bioenergetic reprogramming plasticity under nitrogen depletion by the unicellular green alga *Scenedesmus obliquus*, *Planta*. 247 (2017) 679–92.
- [96] S.R. Vargas, M. Zaiat, M. do Carmo Calijuri, Influence of culture age, ammonium and organic carbon in hydrogen production and nutrient removal by *Anabaena* sp. in nitrogen-limited cultures, *International Journal of Hydrogen Energy*. 45, (2020) 30222–31.
- [97] H. Masukawa, M. Kitashima, K. Inoue, H. Sakurai, R.P. Hausinger, Genetic engineering of cyanobacteria to enhance biohydrogen production from sunlight and water, *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. 41 (2012) 169–73.
- [98] G. Torzillo, A. Scoma, C. Faraloni, A. Ena, U. Johanningmeier, Increased hydrogen photoproduction by means of a sulfur-deprived *Chlamydomonas reinhardtii* D1 protein mutant, *International Journal of Hydrogen Energy*. 34 (2009) 4529–36.
- [99] J.E.W. Polle, S. Kanakagiri, E. Jin, T. Masuda, A. Melis, Truncated chlorophyll antenna size of the photosystems – a practical method to improve microalgal productivity and hydrogen production in mass culture, *International Journal of Hydrogen Energy*. 27 (2002) 1257–64.
- [100] A. Melis, Solar energy conversion efficiencies in photosynthesis: Minimizing the chlorophyll antennae to maximize efficiency, *Plant Science*. 177 (2009) 272–80.
- [101] S.N. Kosourov, M.L. Ghirardi, M.A. Seibert, A truncated antenna mutant of *Chlamydomonas reinhardtii* can produce more hydrogen than the parental strain, *International Journal of Hydrogen Energy*. 36 (2011) 2044–8.
- [102] H. Sakurai, H. Masukawa, M. Kitashimac, K. Inoue, Photobiological hydrogen production: Bioenergetics and challenges for its practical application, *Journal of Photochemistry and Photobiology*. 17 (2013) 1–25.
- [103] H. Li, L. Zhang, L. Shu, X. Zhuang, Y. Liu, J. Chen, Z. Hu, Sustainable photosynthetic H₂-production mediated by artificial miRNA silencing of OEE2 gene in green alga *Chlamydomonas reinhardtii*, *International Journal of Hydrogen Energy*. 40 (2015) 5609–16.
- [104] H. Li, Y. Liu, Y. Wang, M. Chen, X. Zhuang, C. Wang, J. Wang, Z. Hu, Improved photobio-H₂ production regulated by artificial miRNA targeting psbA in green microalga *Chlamydomonas reinhardtii*, *Biotechnology for Biofuels*. 11 (2018) 36.
- [105] K. Skjånes, U. Andersen, T. Heidorn, S.A. Borgvang, Design and construction of a photobioreactor for hydrogen production, including status in the field, *Journal of Applied Phycology*. 28 (2016) 2205–23.
- [106] S. Seveda, S. Bhattacharya, I.M Abu Reesh, S. Bhuvanesh, T.R. Sreekrishnan, Challenges in the design and operation of an efficient photobioreactor for microalgae cultivation and hydrogen production, *Biohydrogen Production: Sustainability of Current Technology and Future Perspective*. (2017) 147–62.
- [107] A.D. Kroumov, F.B. Scheufele, D.E.G. Trigueros, A.N. Modenes, M. Zaharieva, H. Najdenski, Modeling and technoeconomic analysis of algae for bioenergy and coproducts, *Algal Green Chemistry: Recent Progress in Biotechnology*. (2017) 201–41.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Ayshat M. BOZIEVA – *Timiryazev Institute of Plant Physiology, Russian Academy of Sciences.*
E-mail: ayshat2696@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6713-8819>

Elena V. ZADNEPROVSKAYA – *Timiryazev Institute of Plant Physiology, Russian Academy of Sciences.*
E-mail: zadneprovskaya@ifr.moscow

Suleyman I. ALLAKHVERDIEV – *Timiryazev Institute of Plant Physiology, Russian Academy of Sciences.*

E-mail: suleyman.allakhverdiev@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0452-232X>

Поступила: 03.10.2022; Одобрена: 23.11.2022; Принята: 24.11.2022.

Submitted: 03.10.2022; Approved: 23.11.2022; Accepted: 24.11.2022.

Обзорная статья

УДК 621.396.93:614.8

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28405>



А.В. Федюхин¹, И.Г. Ахметова², С.А. Соловьев² ✉

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, Россия;

² Казанский государственный энергетический университет,
Казань, Россия

✉ solovev.sa@kgeu.ru

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Аннотация. Стратегия повышения эффективности и экологичности систем теплоснабжения должна базироваться на снижении потребления тепловой энергии конечным потребителем, а также снижении потерь при производстве и передаче тепловой энергии. Одно из актуальных направлений исследования — разработка теплоизоляционных материалов с высокими теплоизолирующими свойствами. Данная работа посвящена исследованию и сравнению свойств теплоизоляционных материалов, а также проблем, возникающих при их монтаже и эксплуатации. В качестве примера рассмотрена минеральная вата и аэрогель. Изучена перспектива замены высокотемпературной тепловой изоляции, широко применяющейся в промышленности, на современный материал, разработанный на базе аэрогеля. Температурный градиент по толщине теплоизоляции был рассчитан с помощью численного инструмента, разработанного в ANSYS. Результаты показывают, что аэрогель превосходит минеральную вату по всем ключевым теплофизическим характеристикам. В то же время единственным препятствием для широкого промышленного производства и использования аэрогеля в сегменте высокотемпературной теплоизоляции является его рыночная стоимость, которая все еще в несколько раз выше, чем у минеральной ваты при эквивалентных теплоизоляционных характеристиках.

Ключевые слова: высокотемпературная тепловая изоляция, аэрогель, теплопроводность, численное моделирование, эксперимент.

Благодарности: Данное исследование финансировалось Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-01262-22-01 от 28 января 2022 года (Дополнительное соглашение 075-03-2022-151/1 от 31 января 2022 года).

Для цитирования:

Федюхин А.В., Ахметова И.Г., Соловьев С.А. Анализ эффективности применения современных теплоизоляционных материалов для высокотемпературных трубопроводов // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 4. С. 79–89. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28405>



A.V. Fedyukhin¹, I.G. Akhmetova², S.A. Solovev² ✉

¹ National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Moscow, Russia;

² Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

✉ solovev.sa@kgeu.ru

EFFICIENCY ANALYSIS OF MODERN HEAT-INSULATING MATERIALS FOR HIGH-TEMPERATURE PIPELINES

Abstract. The strategy for improving the efficiency and environmental friendliness of heat supply systems should be based on reducing the consumption of thermal energy by the end consumer, as well as reducing losses in the production and transmission of thermal energy. One of the topical areas of research is the development of heat-insulating materials with high heat-insulating properties. This work is devoted to the study and comparison of the properties of heat-insulating materials, as well as the problems that arise during their installation and operation. Mineral wool and aerogel are considered as an example. The prospect of replacing high-temperature thermal insulation, which is widely used in industry, with a modern material developed on the basis of aerogel was studied. The temperature gradient across the thickness of the thermal insulation was calculated using a numerical tool developed in ANSYS. The results show that aerogel outperforms mineral wool in all key thermophysical characteristics. At the same time, the only obstacle to the widespread industrial production and use of aerogel in the high-temperature thermal insulation segment is its market value, which is still several times higher than that of mineral wool with equivalent thermal insulation characteristics.

Keywords: high-temperature thermal insulation, aerogel, thermal conductivity, numerical simulation, experiment.

Acknowledgements: This study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the state task No. 075-01262-22-01 of January 28, 2022 (Supplementary agreement 075-03-2022-151/1 of January 31, 2022).

Citation:

A.V. Fedyukhin, I.G. Akhmetova, S.A. Solovev, Efficiency analysis of modern heat-insulating materials for high-temperature pipelines, *Global Energy*, 28 (04) (2022) 79–89, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28405>

Введение. Тепловая изоляция трубопроводов и оборудования определяет техническую возможность и экономическую эффективность технологических процессов и находит широкое применение в энергетике, химической, нефтеперерабатывающей, металлургической, пищевой и многих других отраслях промышленности. Тепловая изоляция позволяет управлять технологическими процессами с заданными параметрами, помогает обеспечить безопасные условия труда на производстве, позволяет поддерживать необходимую температуру в изотермических резервуарах и снижать потери легкоиспаряющихся нефтепродуктов. Ключевым показателем ее эффективности является коэффициент теплопроводности материала, от которого зависит толщина теплоизоляционного слоя, соответственно, и нагрузка на изолируемый объект, его конструктивные характеристики и габаритные размеры. Расчетные значения коэффициента теплопроводности принимаются с учетом его зависимости от температуры, степени уплотнения теплоизоляционных материалов в конструкции, швов конструкции, наличия крепежных деталей. При выборе теплоизоляционного материала необходимо учитывать температуростойкость теплоизоляционных материалов, возможную линейную усадку, потери прочности и массы, степень выгорания свя-

зующего при нагреве, прочностные и деформационные характеристики изолируемого объекта, допустимые нагрузки на опоры и изолируемые поверхности и другие влияющие факторы. В части транспортировки тепловой энергии актуальной является задача разработки теплоизоляционных материалов с высокими теплоизолирующими и прочностными характеристиками. В данном вопросе в научно-технической литературе уделяется большое внимание суперизоляционным материалам, обладающим крайне низкой теплопроводностью.

Постановка задачи

Целью данной работы является анализ перспектив применения современных теплоизоляционных материалов на основе аэрогеля для изоляции высокотемпературного технологического оборудования с изучением технических и экономических аспектов.

Теплофизические характеристики аэрогеля

Основная доля потребления тепловой энергии промышленных предприятий приходится на водяной пар, расходуемый на технологические нужды производства. Для таких предприятий перспективными являются мероприятия, направленные на снижение тепловых потерь при транспортировке энергоносителей. Диапазон температур, в котором работают конструкции промышленной изоляции, составляет от -180 до 600°C . Для тепловой изоляции систем, транспортирующих высокотемпературные теплоносители, применяется промышленная тепловая изоляция, большая часть которой монтируется из волокнистых материалов (минераловатные и стекловолокнистые изделия) [1].

Эффективность систем транспортирования тепло- и энергоносителей с точки зрения уменьшения тепловых потерь зависит от эффективности используемых теплоизоляционных материалов [2, 3]. Порядок определения нормативных значений тепловых потерь через теплоизоляционные конструкции трубопроводов утвержден приказом Министерства Энергетики Российской Федерации от 30.12.2008 № 325¹. Величина фактических потерь тепловой энергии через теплоизоляционные конструкции не должна превышать нормативных значений.

Длительная эксплуатация в условиях высоких температур изменяет структуру теплоизоляционного материала, что приводит к увеличению эффективной теплопроводности теплоизоляционного слоя. Известно, что в случае с промышленной тепловой изоляцией величина фактических тепловых потерь по сравнению с нормативными может достигать от 20 до 60 % в зависимости от условий эксплуатации и особенностей температурных режимов.

С точки зрения уменьшения тепловых потерь и, как следствие, повышения эффективности систем транспортирования тепловой энергии, недостаточно выбрать теплоизоляционный материал с наименьшей теплопроводностью. При выборе оптимального теплоизоляционного материала, необходимо учитывать его способность длительное время сохранять заданные при проектировании нормативные значения величины тепловых потерь с учётом условий эксплуатации объекта.

Одним из самых перспективных материалов является наноструктурированный аэрогель на основе диоксида кремния ввиду своей наименьшей стоимости и простоты изготовления в сравнении с другими видами. Эффективность его использования обусловлена рядом уникальных свойств, которыми обладает этот материал. В первую очередь это низкий коэффициент теплопроводности, значение которого составляет около $0,015 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ при температуре 10°C . Объясняется это структурой аэрогеля: разветвлённая сеть из сферических кластеров диоксида кремния диаметром до 5 нм и пор между ними размерами до 100 нм, большую часть которой составляет воздух в статическом состоянии. Благодаря величине пор и колоссальной площади поверхности

¹ Российская Федерация. Приказ Министерства энергетики РФ от 30.12.2008. N325 (ред. от 10.08.2012) «Об утверждении порядка определения нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии, теплоносителя». Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902148459>. (дата обращения: 21.09.2022)

структуры затруднены не только смачивание и последующая фильтрация влаги внутрь кластеров, но и даже сорбция влаги поверхностью аэрогеля, то есть материал является гидрофобным [4, 5].

Аэрогель в основном используется в соединении с другими материалами, что позволяет улучшить его базовые свойства, например, для снижения передачи инфракрасного излучения может применяться титанат калия шесть [6]. Методы соединения компонентов композиционного материала с использованием аэрогеля условно можно разделить на два варианта: введение до сушки в сверхкритических условиях либо на стадии формирования геля, либо в гель, заполненный соответствующим растворителем, и введение армирующих компонентов после сушки в сверхкритических условиях в готовый аэрогель, получаемый чаще всего с применением технологии сверхкритических сред [7, 8].

Кремниевый аэрогель, как и все аэрогели, обладает высокой пористостью, которая приводит к уникальным физическим, тепловым, оптическим и акустическим свойствам, основные из которых представлены в табл. 1.

Физические свойства кремниевого аэрогеля

Таблица 1
Table 1

Physical properties of silicon aerogel

Свойство	Значение	Комментарий
Площадь поверхности	600–1000 м² /г	
Плотность	0.003–0.35 г/см³	в среднем ~ 0.1 г/см
Теплопроводность	13–16 мВт/м·К	
Содержание твердого в-ва	0.13–15 %	в среднем ~ 5 %
Средний диаметр пор	~ 20 нм	определено при помощи метода БЭТ
Показатель преломления	1,0 – 1,05	
Коэффициент температурного расширения	2,0 – 4,0·10 ⁶	определяется ультразвуковыми методами
Диэлектрическая постоянная	~ 1,1	при плотности = 0,1 г/см³
Скорость звука	100 м/с	при плотности = 0,7 г/см³

Для оценки долговременных характеристик материалов с использованием аэрогеля проводились лабораторные исследования по ускоренному старению материалов. Материалы испытывали следующие критические климатические нагрузки для получения результатов, аналогичным эксплуатации в стандартных условиях в течение 20 лет: солнечное излучение, то есть ультрафиолетовое, видимое и ближнее инфракрасное излучение; окружающее инфракрасное тепловое излучение; экстремальные температуры; температурные изменения/циклы; вода, влажность, относительная влажность воздуха, дождь (осадки); физические нагрузки, имитация снега и ветра; загрязнение, грязь и пыль; микроорганизмы, плесень и птичий помет. В результате экспериментов наибольшее увеличение теплопроводности показал теплоизоляционный гипс. При высоком уровне влажности теплопроводность 70 % об. у гипса, усиленного аэрогелем, увеличилась на 10% и достигла значения 0,035 Вт/м·К, теплопроводность сравнимая с теплопроводностью таких изоляционных материалов, как полиизоцианурат и пенополистирол. Интересно отметить, что более низкая пористость приводит к большей чувствительности аэрогеля к содержанию влаги [9]. Среди всех оцененных продуктов, усиленных аэрогелем, маты и древесноволокнистые плиты продемонстрировали превосходные характеристики как в несостаренных, так и в долгосрочных

условиях. Аморфный аэрогель SiO_2 , встроенный в стеклянную сетку после отжига до 250°C увеличил свою теплопроводность до $0,02 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ (с $0,017 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), а при отжиге при 70°C в течение 6 недель не показал изменений [10]. При воздействии продуктов горения при адиабатических температурах пламени более 2000 К происходит деградация материала по трем основным механизмам; потеря содержания стекловолокна, спекание структуры аэрогеля кремнезема и частичное плавление структуры аэрогеля кремнезема [11].

Автор статьи [12] провели исследования для определения целесообразности применения аэрогеля для тепловой изоляции зданий. В течение года тестировались небольшие лабораторные образцы со слоем аэрогеля толщиной 10 и 20 мм. Результаты исследований показали снижение энергопотребления на 23% для образца со слоем аэрогеля толщиной 10 мм, и 38% для образца со слоем аэрогеля толщиной 20 мм. Похожее исследование провели авторы работа [13], численно и экспериментально оценив эффективность применения аэрогелевой изоляции в зданиях. Авторы заменили традиционную стекловату в стенах здания и аргоновое стекло в стеклопакетах на аэрогель. Результаты исследований показали, что в целом годовое энергопотребление снизилось на 6%.

Технико-экономическое сравнение различных материалов

Основной задачей настоящего исследования являлось нахождение температуры на поверхности изоляции, а также визуализация температурного профиля. Для более объемного сравнения характеристик было принято решение провести расчеты в различных температурных условиях. Первая фаза эксперимента проводилась в условиях относительно низких температур, вторая фаза моделировала условия, близкие к экстремальным.

Согласно СП 41-103-2000 п.2.2.3 в случае использования тепловой изоляции, как средства, предохраняющего обслуживающий персонал от ожогов, температура поверхности не должна превышать 60°C для изолируемых объектов, расположенных на открытом воздухе, в рабочей или обслуживаемой зоне, либо 75°C для объектов, расположенных за пределами рабочей или обслуживаемой зоны. В соответствие с данной нормой, толщины тепловой изоляции для температурных режимов 300 и 600°C применялись равными: 20 и 60 мм для аэрогеля, 150 и 225 мм для минеральной ваты. Моделирование потока проводилось без пограничного слоя, так как в данном случае это практически не влияло на результат, но значительно ускорило вычисления.

В соответствии с СП 41-103-2000 приложение Б коэффициент теплопроводности для минеральной ваты рассчитывается по следующей формуле:

$$\lambda = 0,04500 + 0,00021 \cdot t. \quad (1)$$

Для задания коэффициента теплопроводности при моделировании опыта с аэрогелем, была использована информация, взятая с сайта производителя аэрогеля². Значение коэффициентов представлены в табл. 2.

На рис. 1 (а-г) представлены изображения температурных профилей на режимах 300 и 600°C , полученных в результате расчета.

Рис. 1 представлен для вида сверху и в сечении теплоизоляции. При этом температуры поверхности по-прежнему остаются на допустимом уровне, что позволяет судить о возможности замены широко используемой минеральной ваты на перспективный тип изоляции.

Экономический расчет проводился с учетом актуальной стоимости теплоизоляционных материалов на российском рынке на момент написания работы. Ключевым показателем в расчете является стоимость теплоизоляции за 1 м^3 (далее отмечается как P_1 , P_2 , P_3). Минеральная вата

² High temperature aerogel blankets with industry-leading protection against corrosion under insulation: [Электронный ресурс] // Aspen Aerogels. Режим доступа: <http://www.aerogel.com/product/pyrogel-xte/#specifications>. (дата обращения: 21.09.2022).

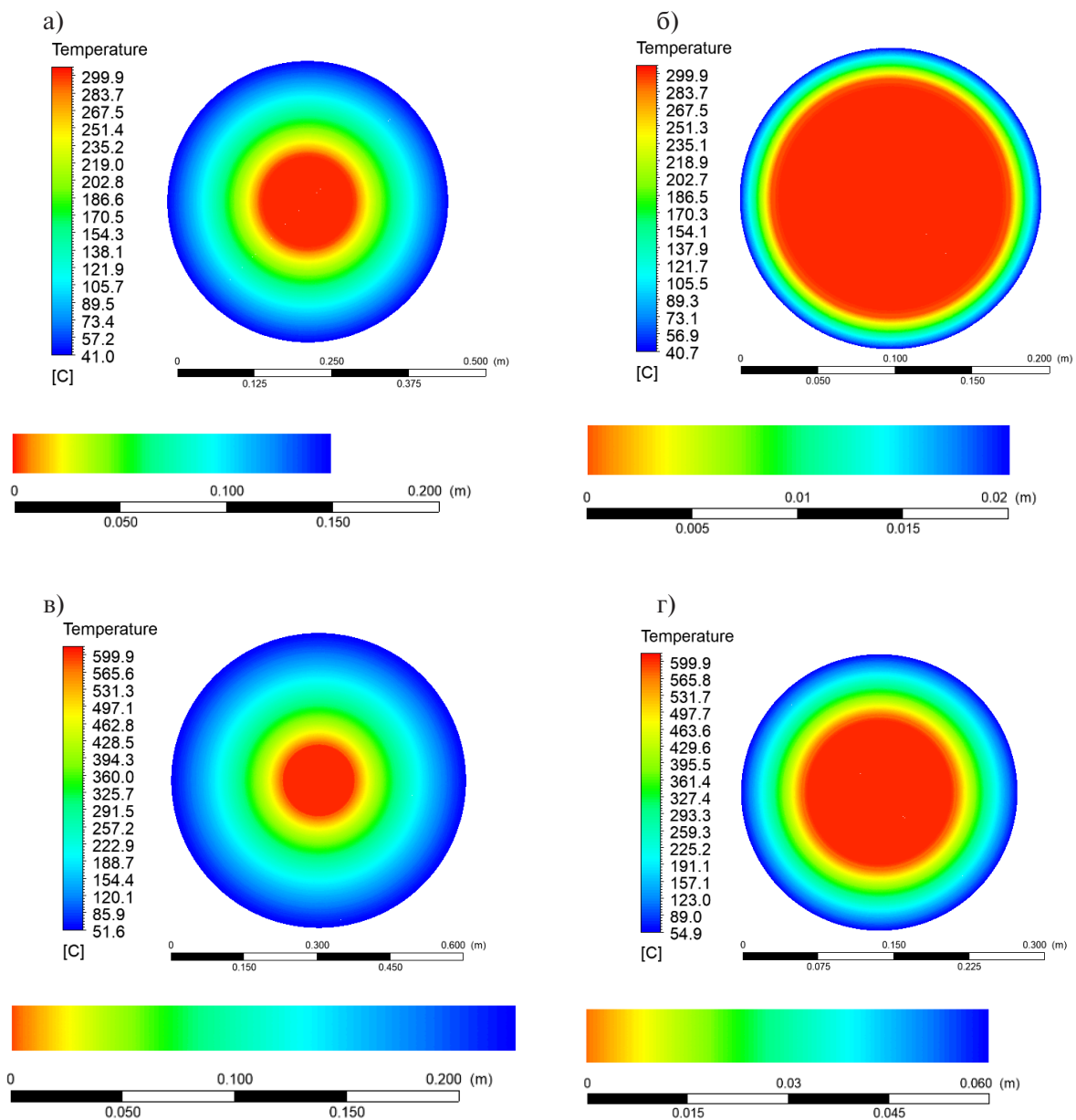


Рис. 1. Температурные профили: а) минеральной ваты при 300°C; б) аэрогеля при 300°C; в) минеральной ваты при 600°C; г) аэрогеля при 600°C
Fig. 1. Temperature profiles: a) mineral wool at 300°C; б) aerogel at 300°C; в) mineral wool at 600°C; г) aerogel at 600°C

марки URSA GEO M-25 с температурой применения до 350°C имеет цену за 1 м² листа толщиной 50мм – 234 руб. 63 коп.³, тогда:

$$P_1 = 234,63 \cdot 1000 / 50 = 4692 \text{ руб. 60 коп.} \quad (2)$$

Так как исследование проводилось для двух температурных режимов (300 и 600°C), для более высоких значений температуры необходимо подобрать изоляцию, которая способна работать в

³ Утеплитель Урса GEO M-25: [Электронный ресурс] // Строй Партнер. Режим доступа: https://st-par.ru/catalog/mineralnaya_vata/ursa-geo-m-25/. (дата обращения: 21.09.2022)

Таблица 2

Точное значение коэффициента теплопроводности аэрогеля при различных значениях температуры

Table 2

The exact value of the thermal conductivity of the aerogel at various temperatures

Температура, °С	0	100	200	300	400	500	600	700
λ , мВт/м·К	16,3	18,3	22,6	29,5	39,4	52,6	69,4	90,1

таких условиях, например, минеральная вату марки Rockwool Wired Mat 80 с температурой применения до 640°С. Цена за 1 м² толщиной 100 мм – 1094 руб. 40 коп.⁴:

$$P_2 = 1094,40 \cdot 1000 / 100 = 10944 \text{ руб. 00 коп.} \quad (3)$$

Аэрогель марки Aspen Aerogels Pyrogel XT с температурой применения до 650°С. Цена за 1 м² толщиной 10 мм – 3000 руб. 00 коп. [14]:

$$P_3 = 3000,00 \cdot 1000 / 10 = 300000 \text{ руб. 00 коп.} \quad (4)$$

Срок службы трубы, которую необходимо изолировать – 30 лет. Диаметр – 150 мм, длина – 1 км. Исходя из полученных ранее данных, выбираем для трубы диаметром 150 мм следующие толщины слоев изоляции: 300°С и 600°С – 20 и 60 мм для аэрогеля, 150 и 225 мм для минеральной ваты. Предусмотрим износ минеральной ваты с плановой заменой каждые 10 лет, соответственно получаем две дополнительных замены.

Формула для нахождения объема теплоизоляции, необходимого для изолирования трубы с соответствующими геометрическими размерами:

$$V = (\pi \cdot (r + x)^2 - \pi \cdot r^2) \cdot l, \quad (5)$$

где r – радиус трубы, м; x – толщина слоя изоляции, м; l – длина трубы, м.

Объем минеральной ваты при температуре поверхности 300°С:

$$V_1 = (\pi \cdot (0,075 + 0,150)^2 - \pi \cdot 0,075^2) \cdot 1000 = 141,372 \text{ м}^3. \quad (6)$$

Аналогичным образом получаем остальные значения. Объем минеральной ваты при температуре поверхности 600°С: $V_2 = 265,072 \text{ м}^3$; объем аэрогеля при температуре поверхности 300°С: $V_3 = 10,681 \text{ м}^3$; при 600°С: $V_4 = 39,584 \text{ м}^3$.

В среднем рыночная цена монтажа 1 м² теплоизоляции равняется 1000 руб. Тогда стоимость монтажа изоляции для трубы с соответствующими геометрическими размерами определяется по следующей формуле:

$$M = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l \cdot 1000, \quad (7)$$

где обозначения соответствуют формуле (5).

$$M = 2 \cdot \pi \cdot 0,075 \cdot 1000 \cdot 1000 = 471238 \text{ руб. 90 коп.} \quad (8)$$

⁴ Венторус [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://венторус.рф/catalog/tekhnicheskaya_izolyatsiya_rockwool/rockwool_wired_mat_80/. (дата обращения: 21.09.2022)

Так же необходимо учесть влияние инфляции на уровень цен в течение срока службы изоляции. По данным Центрального Банка Российской Федерации уровень инфляции за 2010 – 2020 года составил 91,10 % [15]. Предположим, что следующие 30 лет тенденция сохранится. В таком случае итоговая стоимость работ по изоляции объекта минеральной ватой, включая стоимость материала, определяется по следующей формуле:

$$P\Sigma = (P_i \cdot V_k + M) \cdot (1 + 1,911 + 1,911^2). \quad (9)$$

Для аэрогеля:

$$P\Sigma = P_3 \cdot V_k + M. \quad (10)$$

В табл. 3 представлены итоговые данные стоимости работ по изоляции трубопроводы длиной 1 км при сроке службы равном 30 лет. Предполагается, что износостойкость аэрогеля позволяет не проводить замену изоляции в течение 30 лет, в то время как минеральная вата требует замены каждый 10 лет. Для оценки влияния стоимости изолирования на рис. 2 представлено соотношение стоимости изоляции к стоимости работ по ее монтажу.

Таблица 3

Оценка стоимости изолирования трубопровода длиной 1 км

Table 3

Estimation of the cost of insulating a pipeline 1 km long

Материал и температура поверхности, °С	Стоимость монтажных работ, руб.	Стоимость материала, руб.	Итоговая стоимость, руб.
Минеральная вата, 300	3 092704	4 353856	7 446560
Аэрогель, 300	471239	3204300	3675539
Минеральная вата, 600	3 092704	19 038692	22 131396
Аэрогель, 600	471239	11875200	12346439

По результатам расчета можно заключить, что изоляция на основе аэрогеля практически в два раза выгоднее на долгосрочную перспективу, если принять во внимание тот факт, что его износостойкость соответствует паспортным характеристикам (не требует замены в течение 30 лет эксплуатации). Однако, данный тип изоляции требует качественного монтажа и обслуживания, в противном случае его замена обойдется значительно дороже, чем замена минеральной ваты.

Заключение

Одной из ключевых проблем высокотемпературной тепловой изоляции является ее устаревание, что существенно снижает важнейший показатель — коэффициент теплопроводности. Процесс старения в значительной степени ускоряется в результате несоблюдения норм, требований и правил как во время монтажа, так и в процессе эксплуатации тепловой изоляции, поскольку от сохранности ее первоначальных свойств напрямую зависит техническая и экономическая эффективность технологических процессов в энергетике и промышленности, а также безопасность персонала и сохранение надлежащих условий труда. Следовательно, вопросы производства эффективной тепловой изоляции, обладающей высокой износостойкостью и низкой теплопроводностью являются на сегодняшний день крайне актуальной задачей, которая требует всестороннего решения как с точки зрения выбора материала, так и толщины слоя и компоновки.

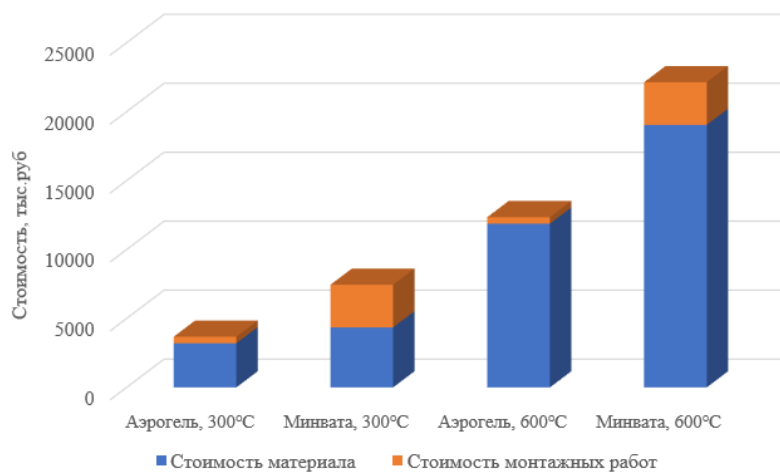


Рис. 2. Соотношение стоимости материала и стоимости монтажных работ при сроке службы трубопровода 30 лет

Fig. 2. The ratio of the cost of material and the cost of installation work with a pipeline service life of 30 years

На основании данных, представленных в настоящей статье, можно заключить, что аэрогель по многим теплофизическим характеристикам превосходит своих конкурентов, в первую очередь, минеральную вату. Тем не менее, необходимо отметить, что сложность и дороговизна изготовления этого вида тепловой изоляции, а также отсутствие промышленного производства в Российской Федерации значительно усложняет возможность его широкого применения.

Развитие теплоизоляционных материалов на основе аэрогеля является одним из ключевых направлений исследований, направленных на повышение энергоэффективности технологических процессов. В перспективе использование аэрогелей поможет избежать множества проблем, связанных со старением, разрушением и частой заменой тепловой изоляции, снизит нагрузку на теплоизоляционные конструкции и значительно повысит экономическую эффективность тепло-энергетических систем, сократив потери при производстве и передаче тепловой энергии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Guo J.F., Tang G.H., Feng J., Jiang Y.G., Feng J.Z. Non-silica fiber and enabled stratified fiber doping for high temperature aerogel insulation // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. T. 160. С. 120194.
- [2] Mozgova A. Testing heat supply networks for heat losses // E3S Web of Conferences. EDP Sciences. 2021. T. 274. С. 08003.
- [3] Yang J., Wu H., Xu X., Huang G., Xu T., Guo S., Liang Y. Numerical and experimental study on the thermal performance of aerogel insulating panels for building energy efficiency // Renewable Energy. 2019. T. 138. Pp. 445–457.
- [4] Макеева А.В., Виденков Н.В., Доброгорская Л.В., Семенов К.В., Федотов В.В. Инновационные материалы на основе аэрогеля в строительстве // Alfabuild. 2017. № 1. С. 89.
- [5] Li C., Chen Z., Dong W., Lin L., Zhu X., Liu Q., Zhang H. A review of silicon-based aerogel thermal insulation materials: Performance optimization through composition and microstructure // Journal of Non-Crystalline Solids. 2021. T. 553. С. 120517.
- [6] Yu Y. The research and development of heat insulation materials with low thermal-conductivity in high temperature // 2015 International Conference on Materials, Environmental and Biological Engineering. Atlantis Press. 2015. Pp. 868–871.

- [7] **Lazrag M., Lemaitre C., Castel C., Hannachi A., Barth D.** Aerogel production by supercritical drying of organogels: Experimental study and modelling investigation of drying kinetics // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2018. T. 140. Pp. 394–405.
- [8] **He F. et al.** Thermal conductivity of silica aerogel thermal insulation coatings // *International Journal of Thermophysics*. 2019. T. 40. № 10. Pp. 1–12.
- [9] **Chen Y., Li D., Xie X. Q., Gao Y. He Y. L.** Theoretical modeling and experimental validation for the effective thermal conductivity of moist silica aerogel // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. T. 147. C. 118842.
- [10] **Lakatos Á., Csarnovics I.** Influence of thermal annealing on structural properties of silica aerogel super insulation material // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. T. 142. № 1. Pp. 321–329.
- [11] **Pyo Y., Robertson T., Yun S., Hong Z.** Experimental evaluation of using silica aerogels as the thermal insulator for combustor liners // *Journal of the Global Power and Propulsion Society*. 2020. T. 4. Pp. 202–216.
- [12] **Elshazli M.T., Madaqiq M., Xing T., Ibrahim A., Johnson B., Yuan J.** Experimental study of using Aerogel insulation for residential buildings // *Advances in Building Energy Research*. 2021. Pp. 1–20.
- [13] **Golder S., Narayanan R., Hossain M.R., Islam M.R.** Experimental and CFD investigation on the application for aerogel insulation in buildings // *Energies*. 2021. T. 14. № 11. C. 3310.
- [14] **Pyrogel XT** — теплоизоляция для поверхностей со сверхвысокими температурами. Aerogel-Russia. Режим доступа: <http://www.aerogel-russia.ru/cat/pyrogel-xt.html>. (дата обращения: 21.09.2022)
- [15] **Инфляция на потребительском рынке.** Банк России: Центральный Банк Российской Федерации. Режим доступа: https://cbr.ru/statistics/ddkp/macro_sub/. (дата обращения: 21.09.2022)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФЕДЮХИН Александр Валерьевич — доцент Кафедры промышленных теплоэнергетических систем, Национальный исследовательский университет «МЭИ», канд. техн. наук.
E-mail: fediukhinav@mpei.ru

АХМЕТОВА Ирина Гареевна — проректор по развитию и инновациям, Казанский государственный энергетический университет, д-р техн. наук.
E-mail: irina_akhmetova@mail.ru

СОЛОВЬЕВ Сергей Анатольевич — доцент, Казанский государственный энергетический университет, канд. физ.-мат. наук.
E-mail: solovev.sa@kgeu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8428-3367>

REFERENCES

- [1] **J.F. Guo, G.H. Tang, J. Feng, Y.G. Jiang, J.Z. Feng,** Non-silica fiber and enabled stratified fiber doping for high temperature aerogel insulation // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. T. 160. S. 120194.
- [2] **A. Mozgova,** Testing heat supply networks for heat losses // *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences. 2021. T. 274. S. 08003.
- [3] **J. Yang, H. Wu, X. Xu, G. Huang, T. Xu, S. Guo, Y. Liang,** Numerical and experimental study on the thermal performance of aerogel insulating panels for building energy efficiency // *Renewable Energy*. 2019. T. 138. S. 445–457.
- [4] **A.V. Makeyeva, N.V. Videnkov, L.V. Dobrogorskaya, K.V. Semenov, V.V. Fedotov,** Innovatsionnyye materialy na osnove aerogelya v stroitelstve // *Alfabuild*. 2017. № 1. S. 89.

- [5] C. Li, Z. Chen, W. Dong, L. Lin, X. Zhu, Q. Liu, H. Zhang, A review of silicon-based aerogel thermal insulation materials: Performance optimization through composition and microstructure // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021. T. 553. S. 120517
- [6] Y. Yu, The research and development of heat insulation materials with low thermal-conductivity in high temperature // 2015 International Conference on Materials, Environmental and Biological Engineering. Atlantis Press. 2015. S. 868–871.
- [7] M. Lazrag, C. Lemaitre, C. Castel, A. Hannachi, D. Barth, Aerogel production by supercritical drying of organogels: Experimental study and modelling investigation of drying kinetics // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2018. T. 140. S. 394–405.
- [8] F. He, et al., Thermal conductivity of silica aerogel thermal insulation coatings // *International Journal of Thermophysics*. 2019. T. 40. № 10. S. 1–12.
- [9] Y. Chen, D. Li, X.Q. Xie, Y. Gao, Y.L. He, Theoretical modeling and experimental validation for the effective thermal conductivity of moist silica aerogel // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. T. 147. S. 118842.
- [10] Á. Lakatos, I. Csarnovics, Influence of thermal annealing on structural properties of silica aerogel super insulation material // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. T. 142. № 1. S. 321–329.
- [11] Y. Pyo, T. Robertson, S. Yun, Z. Hong, Experimental evaluation of using silica aerogels as the thermal insulator for combustor liners // *Journal of the Global Power and Propulsion Society*. 2020. T. 4. S. 202–216.
- [12] M.T. Elshazli, M. Madaq, T. Xing, A. Ibrahim, B. Johnson, J. Yuan, Experimental study of using Aerogel insulation for residential buildings // *Advances in Building Energy Research*. 2021. S. 1–20.
- [13] S. Golder, R. Narayanan, M.R. Hossain, M.R. Islam, Experimental and CFD investigation on the application for aerogel insulation in buildings // *Energies*. 2021. T. 14. № 11. S. 3310.
- [14] Pyrogel XT – teploizolyatsiya dlya poverkhnostey so sverkhvysokimi temperaturami. Aerogel-Russia. Rezhim dostupa: <http://www.aerogel-russia.ru/cat/pyrogel-xt.html>. (data obrashcheniya: 21.09.2022)
- [15] Influyatsiya na potrebitelskom rynke. Bank Rossii: Tsentralnyy Bank Rossiyskoy Federatsii. Rezhim dostupa: https://cbr.ru/statistics/ddkp/macro_sub/. (data obrashcheniya: 21.09.2022)

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Alexander V. FEDYUKHIN – *National Research University «Moscow Power Engineering Institute»*.
E-mail: fedyukhinav@mpei.ru

Irina G. AKHMETOVA – *Kazan State Power Engineering University*.
E-mail: irina_akhmetova@mail.ru

Sergei A. SOLOVEV – *Kazan State Power Engineering University*.
E-mail: solovev.sa@kgeu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8428-3367>

Поступила: 01.11.2022; Одобрена: 08.12.2022; Принята: 09.12.2022.
Submitted: 01.11.2022; Approved: 08.12.2022; Accepted: 09.12.2022.

Металлургия. Материаловедение Metallurgy. Material Science

Научная статья

УДК 621.791.722: 621.762.04

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28406>



Ю.А. Соколов ✉

ПАО "Электромеханика", Ржев, Россия

✉ s5577@inbox.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

Аннотация. В статье исследованы внутренние закономерности производственной системы электроннолучевой сварки (ЭЛС) с помощью теории иерархических систем, предлагающей различные способы декомпозиции сложной системы в виде иерархий страт, организации и сложности принятия решений. В статье рассматривается стратифицированное представление производственных систем электроннолучевой сварки. Приведенная иерархическая абстракция, состоящая из технологической, инструментальной, измерительной, информационной, алгоритмической и системной страт, представляет собой инструмент углубленного описания производственной системы, её элементов и связей. Стратифицированное представление ПС позволяет раскрыть взаимодействие разнородных по своей природе уровней и межуровневых связей, имеющих различные интерфейсы. Приведенная в статье иерархическая абстракция, состоящая из технологической, инструментальной, измерительной, информационной, алгоритмической, системной страт раскрывает содержание производственной системы ЭЛС, которая характеризуется последовательным вертикальным расположением подсистем, приоритетом действий подсистем верхнего уровня, зависимостью действий подсистем верхнего уровня от фактического исполнения нижними уровнями своих функций.

Ключевые слова: производственная система, структура, страты, оборудование, конструкция, процесс, электронный пучок, управление, измерение, алгоритмы.

Для цитирования:

Соколов Ю.А. Моделирование производственной системы электроннолучевой сварки // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 4. С. 90–109. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28406>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28406>

Y.A. Sokolov ✉

Public Joint Stock Company "Electromekhanika",
Rzhev, Russia

✉ s5577@inbox.ru

SIMULATION OF THE PRODUCTION SYSTEM OF ELECTRON BEAM WELDING

Abstract. The article explores the internal laws of the production system (PS) of electron beam welding (EBW) using the theory of hierarchical systems, which offers various ways of decomposition of a complex system in the form of hierarchies of strata, organization and complexity of decision making. The article considers a stratified representation of PSs for electron beam welding. The given hierarchical abstraction, consisting of technological, instrumental, measuring, informational, algorithmic and system strata, is a tool for in-depth description of the PS, its elements and relationships. The stratified representation of the PS allows revealing the interaction of inherently heterogeneous levels and inter-level connections that have different interfaces. The hierarchical abstraction given in the article, consisting of technological, instrumental, measuring, informational, algorithmic, system strata, reveals the content of the EBW PS, which is characterized by a consistent vertical arrangement of subsystems, the priority of the actions of the upper-level subsystems, the dependence of the actions of the upper-level subsystems on the actual execution by the lower levels of their functions.

Keywords: production system, structure, strata, equipment, design, process, electron beam, control, measurement, algorithms.

Citation:

Y.A. Sokolov, Simulation of the production system of electron beam welding, Global Energy, 28 (04) (2022) 90–109, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28406>

Введение. Сварочное производство, включающее систему технологической подготовки, совокупность основного и вспомогательного оборудования, технологический процесс (ТП), конечный продукт, можно рассматривать как сложную иерархическую производственную систему (ПС), к характерным особенностям которой относятся: многокритериальность оценок процессов, различная природа информационных связей между подсистемами и элементами; многообразие различных форм связей [1–3].

Для описания сложных систем М. Месарович в работе [4] предложил использовать различные уровни абстрагирования или страты, позволяющие детально раскрыть взаимодействие между элементами. Для каждого уровня абстрагирования характерны сосредоточение внимания на специфических аспектах ПС (технологическом, техническом, алгоритмическом, информационном, измерительном, организационном), оригинальный язык, семейство моделей, законы и принципы, позволяющих детально раскрыть взаимодействие элементов ПС в пределах и вне страты.

Целью статьи является исследование внутренних закономерностей производственной системы электроннолучевой сварки (ЭЛС) с помощью теории иерархических систем, предлагающей различные способы декомпозиции сложной системы в виде иерархий страт, организации и сложности принятия решений.

Технологическая страта

На технологической страте рассматриваются особенности физических процессов ЭЛС, основанной на явлении превращения кинетической энергии электронов в тепловую при их торможении в материале изделия [5–12]. В отличие от дуговых и плазменных источников энергии электронный нагрев осуществляется в самом материале изделия на некоторой глубине от поверхности.

ЭЛС характеризуются большим количеством явлений различной физической природы: формирование электронного пучка, нагрев и плавление материала, течение металла в ванне расплава, испарение материала и др. При небольших значениях удельной мощности пучка, $\sim 10^4$ Вт/см², тепло выделяется на поверхности металла, ванна расплава формируется в форме полусферы. При увеличении удельной мощности пучка до 10^6 Вт/см² усиливается перегрев поверхности ванны, возникает интенсивное испарение металла и паровой поток, поверхность расплава прогибается, образуя так называемый кратер и приближая зону выделения тепла к твердому металлу [13].

В начальный момент образования ванны расплава уменьшается её радиус, а вместе с этим увеличивается сила поверхностного натяжения, поэтому глубина проплавления в начальный момент растёт несколько медленнее. При дальнейшем углублении кратера радиус кривизны поверхности ванны расплава на его дне не меняется, следовательно, величина силы поверхностного натяжения перестает увеличиваться, но продолжает возрастать статическое давление, поскольку растет высота столба жидкого металла ванны. По мере углубления пучка уменьшается интенсивность его воздействия на дно кратера и на некоторой глубине наступает динамическое равновесие сил. Диаметр канала кратера примерно в 2..4 раза больше диаметра пучка. С началом движения пучка паровой канал и ванна расплава деформируются и приобретают вид, показанный на рис. 1 [13].

Перетекание металла с передней стенки кратера на заднюю осуществляется в основном за счет действия реакции пара и капиллярной силы. В движущейся ванне пучок воздействует в основном на переднюю стенку, на которой вследствие высокой температуры уменьшается сила поверхностного натяжения.

Структура (пространственное положение изделия и электронного пучка, тип соединения и форма разделки кромок, выбор технологических приемов сварки, предварительный прогрев кро-

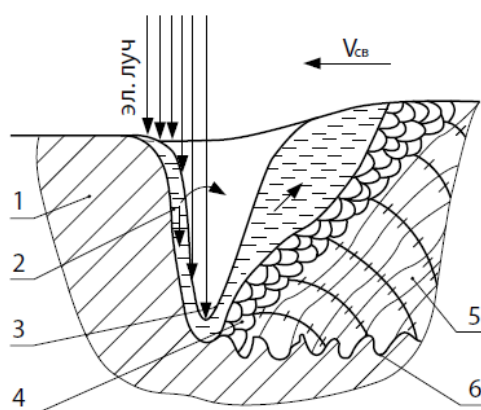


Рис. 1. Форма ванны жидкого металла и кратера при движении электронного пучка: 1 – основной металл, 2 – передняя стенка кратера, 3 – задняя стенка кратера, 4 – зона кристаллизации, 5 – металл шва, 6 – корневая пила (стрелками показано направление движения жидкого металла, $V_{св}$ – скорость сварки)

Fig. 1. The shape of the liquid metal pool and the crater during the movement of the electron beam:

1 – the base metal, 2 – the front wall of the crater, 3 – the rear wall of the crater, 4 – the crystallization zone, 5 – the weld metal, 6 – the root saw (the arrows show the direction of movement of the liquid metal, V_{sv} – welding speed)

мок, осцилляции пучка вдоль или поперек стыка и др.) и параметры (рабочее давление в рабочей камере и электронной пушке, ускоряющее напряжение, ток пучка, скорость сварки, ток фокусирующей линзы, рабочее расстояние от пушки до изделия, амплитуда и частота колебаний пучка, время импульса и паузы при импульсной сварке) технологического процесса оказывают определяющее влияние на качество сварного соединения. Технологические приёмы и поддержание оптимальных параметров режима сварки обеспечивает снижение образования дефектов сварных швов (трещины, неполное проплавление, поры, несплошности и т.д.).

Инструментальная стратегия

На инструментальной страте рассматривается техническое обеспечение для выполнения технологического процесса ЭЛС. Элементами подсистемы, соответствующей инструментальной стратегии, являются единицы специализированного и вспомогательного оборудования. На этом этапе определяются наиболее существенные технологические параметры сварки и состав технических средств, взаимодействия между ними.

Проектирование установки для реализации операции ЭЛС, как правило, осуществляется при помощи специальных инструментов: пакетов автоматизированного проектирования и инженерных расчётов, объектно-ориентированных языков моделирования. Объектно-ориентированный подход к проектированию подразумевает рассмотрение установки в виде совокупности объектов, взаимодействующих друг с другом и подчиненных общей цели функционирования. Выделяя совокупность объектов и отношений между ними, можно построить объектную модель установки и на её основе разработать программные средства.

Одним из инструментов для проектирования ПС электроннолучевой сварки является унифицированный язык моделирования UML (Unified Modelling Language), разработанный на базе методов Буча, Якобсона (Object-Oriented Software Engineering, OOSE) и Рамбо (Object Modeling Technique, OMT). Средства UML позволяют построить множество диаграмм для концентрации внимания на различных аспектах ПС [14–15]. К основным способам использования UML для моделирования ПС относятся: разработка диаграмм (графическое представление информации о моделируемой системе), обмен информацией (взаимопонимание всех специалистов, участвующих в проекте), спецификация систем (построение адекватных моделей с учётом специфических особенностей системы), генерация кода (формирование кода на языке программирования из модели), имитационное моделирование (построение моделей для получения информации об исследуемом объекте методом вычислительных экспериментов), верификация модели (проверка адекватности моделей, степени их соответствия исследуемому оригиналу) [14–15].

Для описания технологии ЭЛС, оборудования и управления процессом с различных точек зрения обычно используют модели классов, состояний и взаимодействий. Операция ЭЛС включает в себя множество переходов, для технической реализации которых необходимы различные механические узлы и программно-аппаратные средства.

Модель классов описывает группу объектов с одинаковыми атрибутами, операциями, типами отношений и семантикой. Некоторые объекты существуют в реальном мире (исходные материалы, оборудование, изделие и др.), другие являются сугубо концептуальными сущностями (алгоритмы, методики оптимизации и пр.). Модель состояний определяет состояния, в которых может находиться объект, свойства объекта и действующие на них ограничения, а также события, вызывающие переход объекта из одного состояния в другое (рис. 2). Сначала выявляются классы, которые могут находиться в разных состояниях, и выполняется запись состояния для каждого класса. Например, для описания класса «технологический процесс» можно выделить следующие состояния: получение разрежения в рабочей камере, настройка пучка на стык, взаимосвязанное перемещение пучка и изделия, сварка при заданном технологическом режиме, заварка кратера, напуск атмосферы и др.

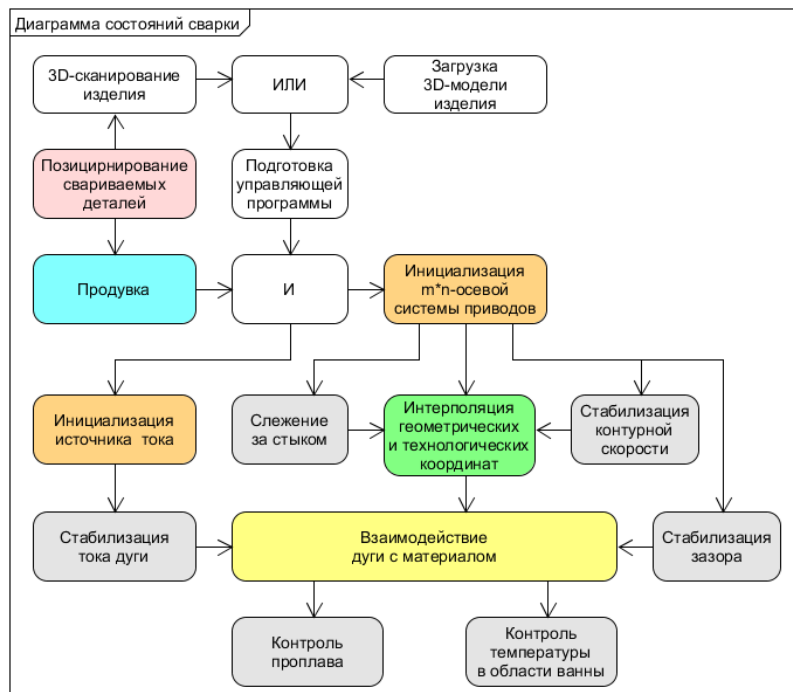


Рис. 2. Диаграмма состояний подготовки и проведения процесса ЭЛС
Fig. 2. Diagram of the states of preparation and conduct of the EBW process

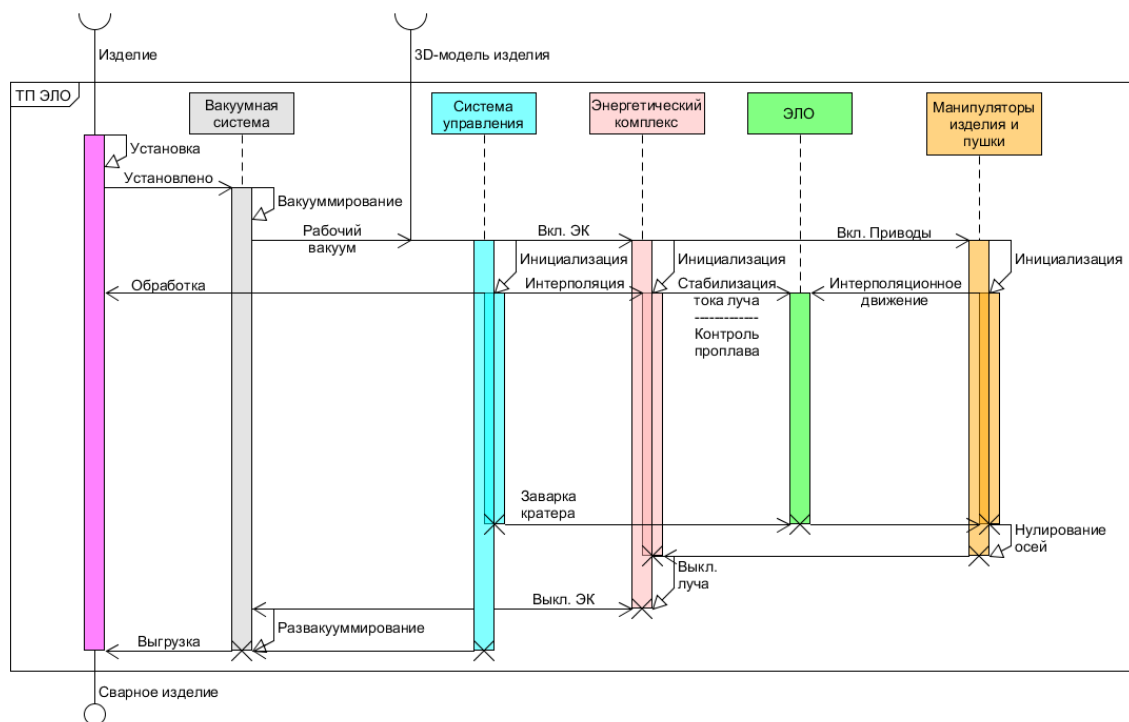


Рис. 3. Диаграмма последовательности ЭЛС (ТП – технологический процесс, ЭЛО – электроннолучевая обработка, ЭК – энергокомплекс)

Fig. 3. ELS sequence diagram (TP – technological process, ELO – electron beam processing, EC – energy complex)

Модель взаимодействия описывает взаимодействие между объектами для обеспечения поведения ПС как целого. Построение модели взаимодействия начинается с выбора варианта использования, который затем уточняется на диаграммах последовательности и деятельности. Диаграммы последовательностей показывает временную последовательность взаимодействия объектов (рис. 3), диаграммы деятельности – поток управления между последовательными этапами вычислений.

Диаграммы состояний и последовательностей позволяют сформировать таблицу соответствия между технологическими переходами и техническими средствами (табл. 1). В результате составляется список узлов, необходимый для создания установки: рабочая камера, станочный комплекс, энергетический блок, вакуумные станции, комплект пневматических средств, узел водяного охлаждения, устройства управления и др.

При разработке концептуальной модели установки ЭЛС необходимо установить её структуру, выбрать элементы, определить параметры, функциональные зависимости, ограничения, критерии. На этом этапе определяются наиболее существенные технологические параметры сварки и состав технических средств, взаимодействие между ними (рис. 4).

Оборудование для реализации операции ЭЛС оценивается следующими критериями: конструктивными решениями узлов, коэффициентом использования объема рабочей камеры, коэффициентом металлоемкости рабочей камеры, временем получения рабочего разреза, производительностью установки, степенью автоматизации основных операций, площадью размещения, экономичностью, временем перехода на сварку другой номенклатуры изделий, удобством обслуживания, модульностью, качеством сварных соединений [16]. К техническим параметрам основных узлов установки относятся:

- геометрическая форма и размеры, толщина стенки, натекание, рабочее давление (рабочая камера);
- ток пучка, ускоряющее напряжение, ток бомбардировки, напряжение Венельта, амплитуда развёртки, токи фокусировки и отклонения пучка, давление в катодной части (энергетический комплекс);
- мощность электрических двигателей, диапазоны скорости и перемещения, время разгона и торможения, точность позиционирования (станочный комплекс);
- давление и температура воды, производительность насосов (водяное охлаждение);
- производительность низко- и высоковакуумных насосов, время выхода на режим, время срабатывания запорной аппаратуры, давление в насосах (вакуумная станция).

Рабочая камера предназначена для создания вакуумного пространства, размещения станочного комплекса и технологической оснастки, защиты от рентгеновского излучения, возникающего в результате торможения ускоренных электронов. Рабочая камера является одним из наиболее важных и трудоемких узлов установки. От их формы, конструкции, жесткости и размеров зависят габариты и качество свариваемых изделий. Камеры должны быть технологичными, обеспечивать механическую прочность и жесткость конструкции, а также биологическую защиту обслуживающего персонала [16]. По форме рабочие камеры подразделяются на цилиндрические, с прямоугольным и восьмигранным сечением. К особенностям камер цилиндрического типа относятся технологичность изготовления, повышенная прочность, низкий коэффициент использования рабочего пространства при сварке изделий, отличных от тел вращения. Камеры с прямоугольным сечением используются для сварки изделий широкой номенклатуры. Рабочие камеры с восьмигранным сечением имеют высокий коэффициент использования рабочего пространства.

Состав станочного комплекса, выполняющего сварочные, установочные и транспортные перемещения, зависит от класса установки, её назначения, специализации, размеров свариваемых изделий, степени автоматизации. В состав станочного комплекса в зависимости от технологической задачи входят манипуляторы изделия и пушки, механизм подачи присадочной

Таблица 1

Соответствие между технологическими переходами и техническими средствами

Table 1

Correspondence between technological transitions and technical means

Операция	Узел	Технические средства
Разрезание	Вакуумная станция	Вакуумные насосы Запорная аппаратура (клапаны, затворы) Трубопроводы Фильтры Масляные ловушки Приборы Датчики давления Датчики температуры Устройство контроля и управления
	Рабочая камера	Оболочка Иллюминаторы Откатная крышка Патрубки
	Замкнутое водоохлаждение	Чиллер Трубопроводы Запорная аппаратура Датчик давления Фильтры
Установка изделия	Манипулятор изделия Задняя бабка	Сварная рама Планшайба Направляющие Шариковинтовая пара Электродвигатели Сервоприводы Устройство управления Комплект электрической разводки
Позиционирование пушки	Манипулятор пушки	Направляющие Шариковинтовая пара Электродвигатели Сервоприводы Устройство управления Комплект электрической разводки
Сварка	Энергетический блок	Пушка Источники питания Блок управления Вакуумный насос Комплект силовой разводки
	Станочный комплекс	Исполнительные механизмы станочного комплекса
	Устройство видеонаблюдения	Видеокамера Стробоскоп Фильтры Блок обработки изображения Память

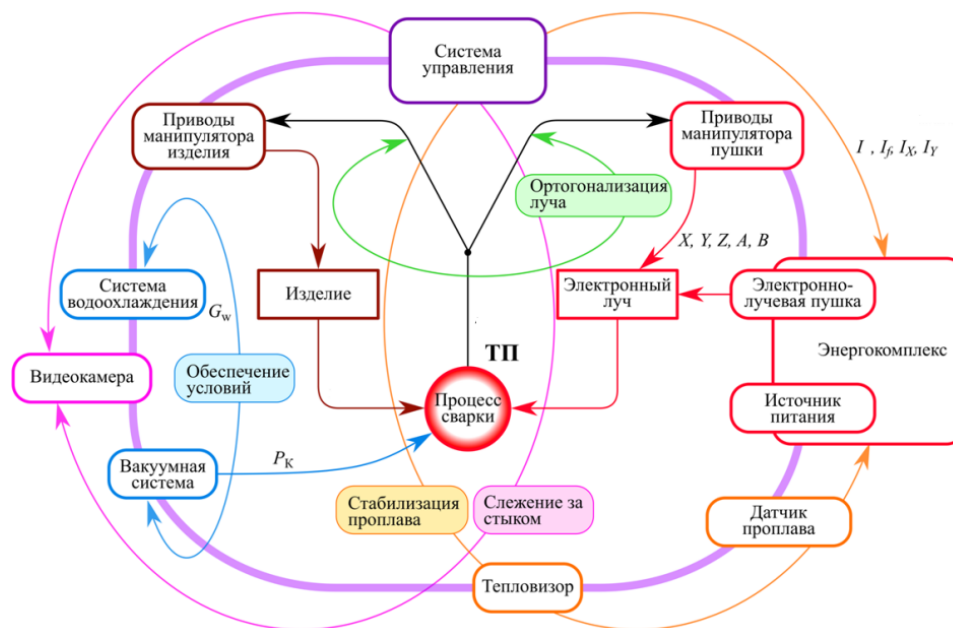


Рис. 4. Концептуальная модель установки ЭЛС (I – ток сварки, I_f – ток фокусировки, I_x, I_y – токи отклонения пучка по осям X и Y , P_k – рабочее давление в камере, X, Y, Z, A, B – координаты перемещения пушки по осям, G_w – расход воды)

Fig. 4. Conceptual model of the ELW installation (I is the welding current, I_f is the focusing current, I_x, I_y are the beam deflection currents along the X and Y axes, P_k is the working pressure in the chamber, X, Y, Z, A, B are the coordinates of the gun movement along the axes, G_w – water consumption)

проволоки, задняя бабка, исполнительные механизмы для выполнения вспомогательных операций и др. По конструктивному исполнению манипуляторы пушки и изделия подразделяются на универсальные и специализированные. Универсальные манипуляторы, как правило, многоосевые, применяются для сварки изделий широкой номенклатуры; специализированные манипуляторы – для сварки однотипных изделий.

Станочный комплекс, представленный на рис. 5, обеспечивает взаимосвязанное перемещение электроннолучевой пушки и изделия по замкнутому и незамкнутому контурам в соответствии с управляющей программой. Манипулятор изделия, помимо трех линейных перемещений по осям X , Y и Z , обеспечивает наклон закреплённого изделия с оснасткой и вращение планшайбы. Исполнительные механизмы обеспечивают перемещение двух электронных пушек в горизонтальном и вертикальном направлениях. Процесс сварки может происходить на наклонных, конусных, сферических поверхностях.

Станочный комплекс, представленный на рис. 6, включает в себя манипулятор электроннолучевой пушки и манипулятор изделия. Манипулятор пушки обеспечивает перемещение пушки в продольном, поперечном, вертикальном направлениях (оси X , Y и Z) и вращение в плоскостях XZ и YZ (оси A и B). Манипулятор изделия обеспечивает вращение (ось W) и дополнительное поперечное перемещение (ось Y_1) изделий.

В состав энергетического комплекса входят электронная пушка, вакуумный насос, узел охлаждения, устройство управления, комплект источников питания, включая высоковольтный. Основные параметры энергетического комплекса определяются толщиной и теплофизическими свойствами свариваемых материалов, требованиями к коэффициенту формы проплавления. По ускоряющему напряжению сварочные пушки подразделяются на низковольтные (10...30 кВ), средневольтные (40...60 кВ) и высоковольтные (100...200 кВ).

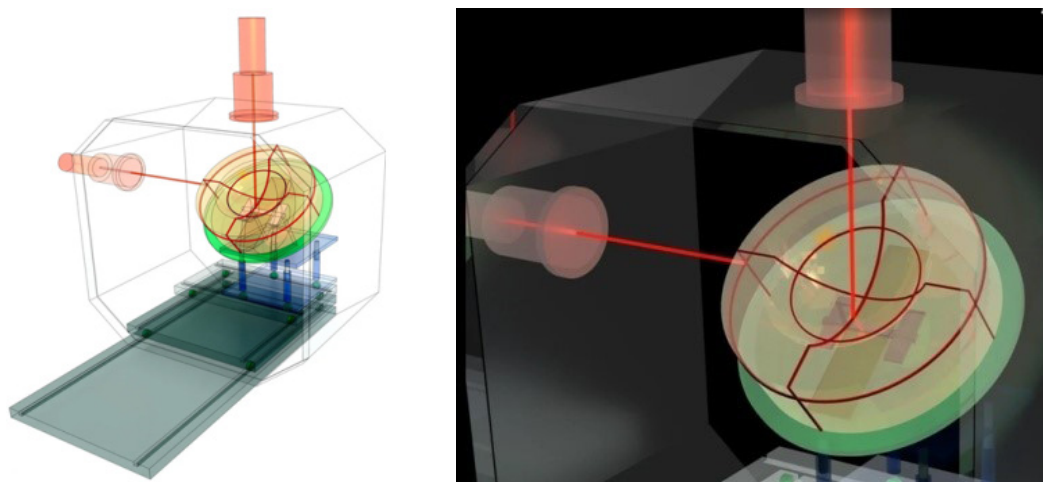


Рис. 5. Станочный комплекс: 5-осевой манипулятор изделия, два одноосевых механизма пушек
Fig. 5. Machine complex: 5-axis product manipulator, two single-axis gun mechanisms

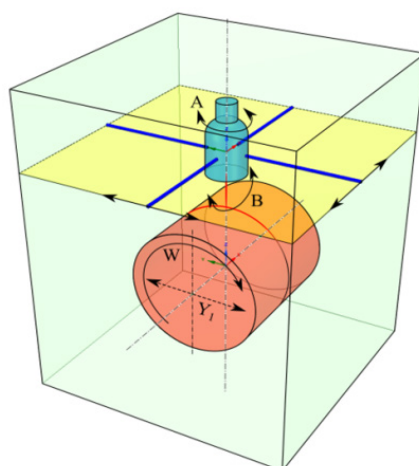


Рис. 6. Станочный комплекс: 5-осевой манипулятор электронной пушки, 2-осевой манипулятор изделия
Fig. 6. Machine complex: 5-axis electron gun manipulator, 2-axis product manipulator

В пушках используются прямо- и косвенно-накальные источники электронов (катоды). Прямонакальные вольфрамовые или танталовые катоды изготавливаются из металлических лент и допускают высокотемпературный нагрев до 2400...2600°С. В качестве косвенно-накальных применяются катоды из вольфрама, тантала и гексаборида лантана LaB_6 . Эмиссионные свойства катода из гексаборида лантана превосходят все известные высокотемпературные катоды.

Вакуумная система установки состоит из набора насосов, запорной аппаратуры, трубопроводов, фильтров, ловушек и обеспечивает создание и поддержание необходимого разрежения в рабочей камере ($1,33 \cdot 10^{-2}$ Па) и в пушке ($6,65 \cdot 10^{-3}$ Па). В зависимости от исполнения, технических требований установки оснащаются турбомолекулярными, криогенными и/или диффузионными насосами.

Конструкции установок для ЭЛС определяются размером и геометрической формой рабочей камеры, составом станочного комплекса и вакуумных станций, типом энергетического комплекса, набором программно-аппаратных средств системы управления.

Информационная страта

При проектировании оборудования ЭЛС к числу наиболее наукоемких задач относится разработка информационного обеспечения и программно–аппаратных средств системы управления (СУ), представляющей собой особый класс динамических систем, которые отличаются наличием самостоятельных функций и целей управления, высоким уровнем системной организации. На информационной страте рассматривается множество взаимосвязанных подсистем управления, выполняющих самостоятельные и общесистемные функции управления и передачи данных. Элементами информационной страты являются оборудование вычислительных цифровых сетей, промышленные компьютеры (ПК), устройства числового программного управления (ЧПУ), программируемые логические контроллеры (ПЛК), микропроцессорные и аналоговые устройства.

С развитием мультипроцессорных СУ появилась возможность создания целостных производственных систем ЭЛС, базирующихся на принципах комплексной автоматизации основных и вспомогательных технологических операций, лёгком и удобном интерфейсе оператора к информационным и вычислительным ресурсам.

Как правило, проектирование 3D–модели изделия, содержащей комплекс конструкторских, технологических и механических параметров, осуществляется в среде системы автоматизированного проектирования (САД–система). Графический файл 3D–модели изделия поступает на вход постпроцессора, который рассчитывает координаты перемещения исполнительных механизмов станочного комплекса для подготовки управляющей программы устройства ЧПУ.

Диаграмма уровней управления с расшифровкой атрибутов, операций и обязанностей представлена на рис. 7. Иерархическое построение СУ обеспечивает её повышенную устойчивость к внешним воздействиям, согласует отдельные задачи элементов и подсистем с общими задачами всей системы, позволяет сократить длины электрических разводов, минимизирует электромагнитные помехи на измерительные цепи.

Вычислительный потенциал промышленного компьютера позволяет выполнить задачи расчета технологического режима ЭЛС на базе математической модели (ММ), визуализации элементов оборудования и параметров процесса, документирования параметров и др. Устройство ЧПУ обеспечивает управление как механическими перемещениями, так и параметрами энергетического комплекса. Управление процессом получения разрезания в рабочей камере и вспомогательными механизмами осуществляется с помощью программируемого логического контроллера.

Основные функции СУ определяются через совокупность её внешних взаимодействий:

- управление механизмами перемещения изделия и электроннолучевой пушки (геометрическая задача);
- последовательно-параллельное управление дискретными механизмами, элементами вакуумных станций (логическая задача);
- взаимосвязанное управление энергокомплексом и приводами механических перемещений (технологическая задача);
- организация интерфейса с оператором (терминальная задача);
- документирование параметров ЭЛС (архивная задача);
- идентификация состояния основных элементов установки, формирование файлов состояния элементов, файлов событий и аварийных ситуаций (диагностическая задача);
- математическое моделирование ЭЛС (задача оптимизации);
- диспетчеризация приведённых выше задач (системная задача).

Решение геометрической и технологической задач управления обеспечивает устройство ЧПУ, которое представляет собой управляющую машину реального времени, имеющую набор периферийных модулей для управления технологическим процессом. Устройство ЧПУ обеспечивает выполнение следующих функций: числовое программное управление исполнительными механизмами станочного комплекса; программирование профилей токов пучка, фокусировки, отклоне-

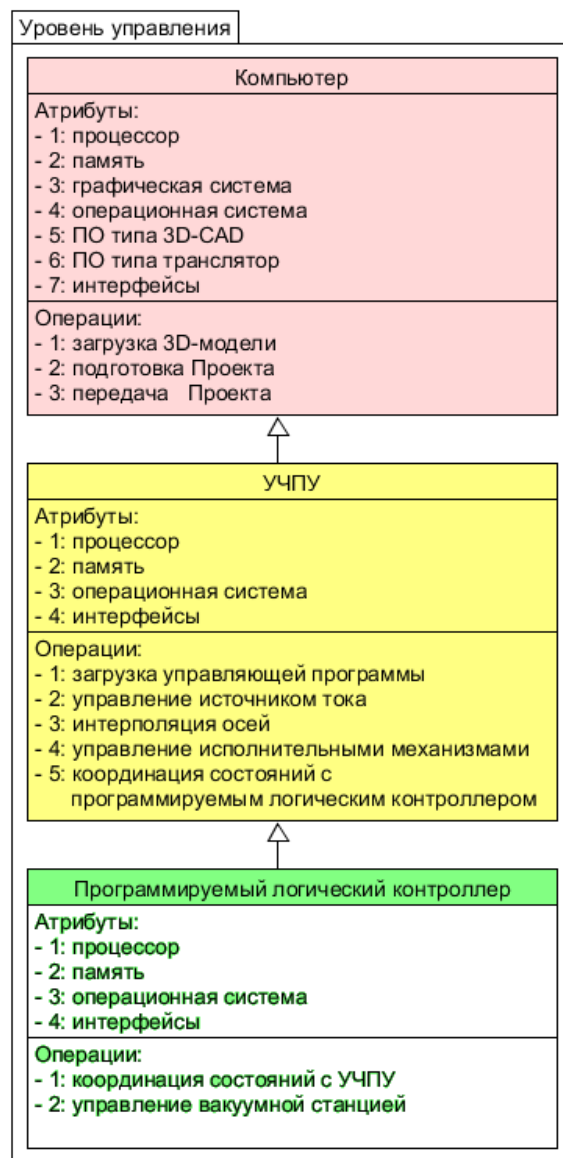


Рис. 7. Структура системы управления
Fig. 7. Structure of the management system

ния пучка по осям X и Y , амплитуды развертки; реализацию режима "Обучение". Токи сварки, фокусировки, отклоняющих катушек, амплитуды развертки являются программно-задаваемыми параметрами и в процессе отработки программы могут изменяться по линейному закону.

Управляющая программа процесса сварки составляется в стандартных G-кодах и M-функциях. При этом обеспечивается программирование и интерполяция механических осей и тока сварки. Пример задания различных контуров в управляющей программе в стандартных G-кодах приведен ниже:

N1G0P50Q670
N2G1G90P150Q700F50
N3S100
N4X5.5Y120F450
N5V5W7F5

В первом кадре задана функция G0 (быстрое позиционирование), поэтому ток пучка (ось P) и ток фокусирующей линзы изменяется мгновенно от текущего значения до 50 мА и 670 мА соответственно. Во втором кадре включается функция G1 (линейная интерполяция), токи пучка и фокусировки линейно возрастают до 150 мА и 700 мА. Скорость нарастания тока определяет значение функции F. В третьем кадре задаётся амплитуда развертки (S), в четвертом кадре — перемещение пушки по осям X и Y с контурной скоростью 450 мм/мин, в пятом кадре — токи отклонения 5 мА и 7 мА соответственно (оси V и W).

В качестве управляющей компоненты для решения логической задачи применяется программируемый логический контроллер, программно-аппаратные средства которого организуют последовательное выполнение операций по управлению исполнительными элементами вакуумных станций, рабочих и вспомогательных механизмов в соответствии с заданным алгоритмом работы. Вакуумные станции обеспечивают откачку воздушной среды из рабочей камеры с помощью низко- и высоковакуумных насосов, запорной аппаратуры. Контроль давления в камере и рабочих точках осуществляется от вакуумных датчиков.

Организация диалога с оператором (терминальная задача) выполняется через человеко-машинный интерфейс. Для визуального наблюдения за состоянием механизмов вакуумных станций используется мнемосхема установки, на которой отображается динамика процесса сварки.

СУ обеспечивает высокий уровень информационного обеспечения оператора и технолога: диагностика работы насосов по температуре, контроль воды, аварийная звуковая и световая сигнализации, набор блокировок при некорректных действиях оператора, цифровая и графическая визуализация параметров сварки, увеличение количества датчиков для локализации неисправности. При возникновении внештатных ситуаций СУ обеспечивает перевод установки в безопасное состояние, на мониторе появляется окно, в котором отображается код ошибки, описание ошибки и рекомендации оператору.

СУ в режиме реального времени выполняет документирование основных технологических параметров процесса сварки (архивная задача): время (общее время и время включения), токи пучка, фокусировки, отклонения, параметры управляющей программы (координаты осей, скорость сварки), давление в рабочей камере и др.

Решение диагностической задачи управления подразумевает идентификацию состояния ПС, формирование файлов состояния отдельных элементов, файлов событий и аварийных ситуаций.

На информационном уровне исследуются задачи оперативного управления на основе общего контроля состояния процесса ЭЛС. С развитием мультипроцессорных СУ, построенных на базе устройств ЧПУ, промышленных компьютеров, сетевых программируемых логических контроллеров и устройств видеонаблюдения появилась возможность создания целостных производственных систем ЭЛС, базирующихся на принципах комплексной автоматизации основных и вспомогательных технологических операций, лёгком и удобном для использования интерфейсе оператора к информационным и вычислительным ресурсам.

Измерительная страта

На измерительной страте рассматриваются средства контроля процесса ЭЛС и диагностики оборудования. Элементами измерительной страты, образующими интерфейс между подсистемами технологической и информационной страты, являются видеокамеры, электронные приборы и нормализаторы, фотодатчики положения исполнительных механизмов, расходомеры, датчики давления и воды, преобразователи, различные средства измерительной техники и др. Наряду с переменными, доступными для контроля посредством прямых измерений, процесс ЭЛС характеризуется переменными, которые рассчитываются косвенными измерениями.

Важное значение для получения качественного сварного соединения имеет контроль положения стыка в процессе сварки с помощью современных электронных и оптических устройств и приборов [17–18].

Работа видеоконтрольного устройства основана на принципе использования информации о состоянии поверхности изделия в потоке вторичных электронов, возникающих при бомбардировке поверхности изделия пучком электронов. Электронный пучок прочеркивает на поверхности изделия прямоугольный растр, вторичные электроны, отраженные от поверхности изделия, попадают на металлический диск (коллектор), изолированный от пушки. После обработки электрический сигнал усиливается и подводится к управляющему электроду лучевой трубки, на экране которой формируется изображение поверхности изделия.

Видеоконтрольное устройство [16] применяется в трех режимах: настройка пучка на стык, "Обучение", слежение за стыком в процессе сварки. Функция настройки пучка на стык осуществляется до начала операции сварки. В процессе сварки управление пространственным положением пушки относительно кромок изделия осуществляется с помощью устройства числового программного управления (ЧПУ). В этом случае, технологический режим сварки должен обеспечивать минимальные тепловые деформации, исключаяющие нарушение геометрических параметров стыка.

В режиме "Обучение" видеоустройство совмещает пучок со стыком в ряде точек по траектории стыка. Измеренные координаты запоминаются в параметрах и затем используются в управляющей программе устройства ЧПУ. Во время сварки осуществляется взаимосвязанное перемещение пучка и изделия по записанным точкам с помощью линейной или круговой интерполяции.

Первоначально видеоустройства, реализованные на принципе использования токов вторичной эмиссии, из-за технических сложностей не обеспечивали наблюдение за стыком при рабочих токах сварки. В дальнейшем были разработаны устройства, обеспечивающие режим слежения за стыком в процессе сварки с помощью модуляции токов пучка, фокусировки и отклоняющих катушек: пучок периодически при малом токе сканирует стык впереди ванны в течение 5 мс и затем возвращается в ванну расплава для продолжения процесса с рабочим током. Режим активного слежения за положением ванны расплава обеспечивает контроль и управление положением пучка относительно стыка. Применяются два способа управления по стыку: электромагнитное отклонение пучка и/или его механическое перемещение в направлении, перпендикулярном траектории стыка. При механическом перемещении пучка отключается контроль устройства ЧПУ над соответствующей осью, которая переводится в режим слежения по сигналу от видеоконтрольного устройства. После сварки электрические приводы вновь подключаются к устройству ЧПУ. Слежение за стыком в реальном масштабе времени существенно снижает требования к точности механизмов электромеханической системы установки. При этом, уменьшается трудоёмкость подготовки управляющей программы.

Блок определения проплава обеспечивает автоматический контроль сквозного проплавления соединения. Регулирование тока пучка осуществляется с учетом информационного сигнала от датчика-резистора, один конец которого соединен с корпусом рабочей камеры установки, а другой — с коллектором электронов, проникающих через сквозной парогазовый канал.

Основной задачей управления процессом ЭЛС является получение бездефектного сварного соединения с заданной структурой и требуемыми свойствами. В связи с этим разработка средств оптического наблюдения и контроля за процессом ЭЛС (рис. 8) открывает новые возможности по увеличению способов его управления и разработке алгоритмов адаптивного управления.

Устройство оптического наблюдения состоит из объектива, микропроцессорного блока обработки информации, промышленного компьютера для оцифровки и визуализации области сварки. Для защиты оптики видеокамеры, находящейся в рабочей камере установки, от засветки и напыления парами металла используются стробоскоп и фильтры. Оптическое устройство обеспечивает настройку пучка на стык и режим слежения в процессе ЭЛС. На рис. 9 приведен кадр из видеонаблюдения при настройке пучка на стык свариваемого изделия, а на рис. 10 — числовая матрица этого изображения. Синим цветом выделена линия центра стыка, желтым цветом — след от электронного пучка. Точность ввода пучка в стык составляет $\pm 0,05$ мм [17].

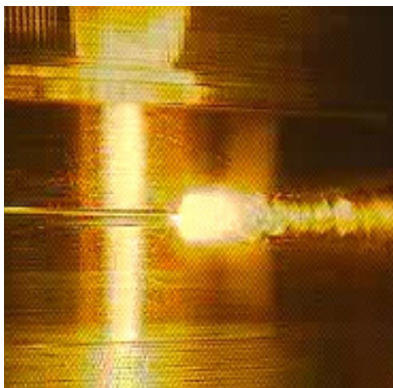


Рис. 8. Формирование сварного соединения

Fig. 8. Formation of a welded joint

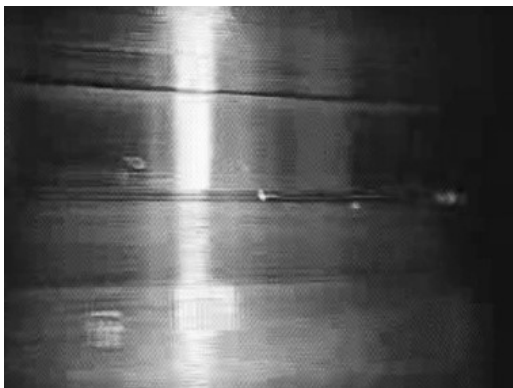


Рис. 9. Кадр видеонаблюдения за стыком

Fig. 9. Surveillance frame behind the joint

149	110	169	122	125	142	127	149	141	115	165	119	122	122	100	118	113	102	119	100	114
156	117	164	132	135	143	136	154	146	111	161	127	124	124	113	114	108	116	111	108	109
143	176	110	159	150	138	166	136	140	159	100	147	129	117	146	97	125	134	98	142	101
153	155	150	140	148	150	137	129	133	141	127	121	129	109	108	120	128	106	121	120	109
143	121	149	121	131	136	123	170	129	116	157	117	121	137	97	153	100	117	145	82	139
170	182	160	184	166	164	164	143	149	132	120	142	131	127	142	89	120	127	97	129	91
135	145	116	134	136	125	145	98	124	137	89	114	114	95	119	92	122	109	92	126	82
144	125	143	121	132	138	109	144	110	107	134	98	107	121	78	139	89	100	129	72	124
151	155	148	140	136	149	156	148	140	132	125	121	121	117	99	108	108	105	105	106	
149	164	130	151	148	140	148	91	121	132	78	110	103	76	131	80	127	111	83	141	84
139	123	132	136	138	125	119	150	128	114	144	127	119	125	103	134	106	109	125	96	117
172	146	175	142	146	167	148	165	147	132	152	114	129	124	125	143	111	128	119	100	127
149	189	133	188	175	136	169	117	144	169	98	161	132	120	145	106	141	110	113	143	96
176	166	175	162	161	169	147	153	151	145	139	126	136	134	119	113	107	108	116	107	109
167	129	173	124	132	163	135	160	130	108	152	98	117	107	120	146	90	120	112	79	124
146	181	131	178	164	132	174	128	154	170	100	152	126	116	131	97	128	97	86	119	76
150	158	144	154	150	141	145	136	145	147	119	127	128	125	116	99	111	98	105	111	94
182	135	191	131	139	181	138	171	133	112	177	111	136	125	105	137	70	111	118	71	130
115	139	104	136	126	104	117	88	105	113	61	91	78	71	82	61	90	64	56	79	46
81	107	64	90	85	75	75	70	82	61	68	126	141	40	57	26	48	40	36	52	31
141	102	151	112	103	121	108	119	64	79	211	213	224	79	64	33	25	30	31	39	61
135	111	132	107	123	111	89	105	90	172	250	243	247	210	187	170	161	179	165	139	124
74	103	54	82	84	67	76	65	103	202	208	230	151	92	131	104	124	96	90	68	37
126	135	126	136	104	126	116	88	101	148	165	179	86	46	70	79	52	56	61	42	65
111	85	113	86	92	91	85	91	103	162	228	169	74	81	83	103	70	67	68	60	80
186	174	173	160	190	160	152	155	136	148	169	135	108	153	142	110	128	108	101	138	95
149	160	145	156	129	147	153	121	129	141	101	109	116	97	100	93	83	90	97	91	90
156	123	186	128	146	146	129	156	129	130	124	92	113	92	101	145	108	92	131	84	105
149	170	135	153	150	141	133	135	128	128	125	114	119	109	114	102	105	103	89	93	85
145	186	122	171	155	148	149	118	131	115	96	115	99	108	130	90	112	119	78	107	83
139	128	180	143	145	136	121	135	112	112	117	104	110	111	90	126	96	81	111	73	89
165	121	187	139	136	125	115	142	112	117	129	103	117	112	95	102	91	85	87	76	77
150	185	120	171	145	138	159	122	142	126	105	125	107	111	133	85	112	121	73	109	80
145	185	127	159	152	148	151	129	140	131	117	124	115	110	91	115	93	82	99	73	82
159	127	185	131	142	136	107	130	105	112	120	95	109	99	70	125	72	87	91	60	93
159	164	140	161	145	111	120	110	106	96	88	95	88	95	130	73	105	97	79	88	64
166	174	171	178	133	130	122	100	122	119	107	118	96	105	112	87	104	90	82	88	70
158	158	199	150	132	139	126	150	101	98	103	80	107	101	79	119	92	84	88	81	85

Рис. 10. Числовая матрица кадра видеонаблюдения за стыком

Fig. 10. Numerical matrix of the video surveillance frame for the joint



Рис. 11. Кадр перед замыканием кольцевого шва
Fig. 11. Frame before closing the circumferential seam

При ЭЛС часто возникают такие дефекты, как корневая пила, паровые полости, неполномерность, начальные и конечные дефектные участки. Для устранения корневой пилы, занижений с лицевой стороны шва, непроваров в начале шва и кратеров в конце шва, на стадии проектирования необходимо предусмотреть технологический припуск.

Важными стадиями процесса ЭЛС являются формирование ванны расплава, заварка кратера, перекрытие шва. Момент формирования сварного соединения перед перекрытием кольцевого шва показан на рис. 11. Для уменьшения размеров кратера применяется плавное уменьшение тока сварки и вывод пучка из стыка.

При использовании двух видеокамер можно получать объемное изображение процесса ЭЛС, т. е. контролировать выпуклость ванны расплава и следовательно управлять геометрической формой ванны.

Сварочное оборудование может также оснащаться тепловизором, обеспечивающим измерение температурного поля в области ванны расплава. Оптическая камера, направленная на зону плавления, обрабатывает сигналы, пропорциональные энергии излучения, и передает по цифровому протоколу информацию в компьютер, на котором выполняется обработка полученных данных и визуализация теплового изображения поверхности изделия. Использование тепловизора расширяет возможности управления, способствует формированию сварного соединения с заданной структурой, компенсирует недостатки априорной технологии.

Современные электронно-оптические и оптические средства позволяют контролировать важные параметры процесса ЭЛС. Автоматизация процесса ЭЛС подразумевает разработку наукоемких математических моделей и реализацию адаптивных алгоритмов управления с использованием программно-аппаратных средств видеонаблюдения.

Алгоритмическая страта

На алгоритмическом уровне рассматриваются алгоритмы управления, математические модели (ММ), технологические карты процесса ЭЛС. Элементами данной страты являются алгоритмы управления, записанные в виде программ на алгоритмических языках в памяти микропроцессорных устройств. Проектирование операции ЭЛС осуществляется на двух уровнях: формирование структуры операции (выбор кинематической схемы сварки, предварительный прогрев стыка, осцилляция пучка, непрерывный/импульсный режим, заварки кратера и др.) и оптимизация значений параметров технологического процесса.

Значение математического моделирования для изучения влияния технологических параметров на свойства изделий постоянно возрастает. Средства инженерного анализа, основанные на численных методах, стали важной частью проектирования операции сварки. К числу пакетов, ориентированных на решение междисциплинарных задач, относятся, в частности, пакеты

Ansys CFX, Ansys Fluent, LS-DYNA и др. Математическое моделирование ЭЛС основывается на тщательном изучении физики гидрогазодинамических, тепло- и массообменных, динамических процессов. Методы математического моделирования позволяют учесть мультидисциплинарный характер процесса сварки, обеспечить высокую степень точности вычислений, выбрать оптимальные значения параметров технологического процесса ЭЛС.

Разработка наукоемких моделей для известных и новых материалов является одной из актуальнейших задач, имеющей большое прикладное значение. В основе моделирования процесса ЭЛС лежит решение нелинейных дифференциальных уравнений изменения энергии, изменения количества движения (уравнения Навье–Стокса) и уравнения неразрывности. Моделирование фазовых переходов материала изделия основано на решении задачи Стефана с привлечением нелинейной зависимости скорости движения границы раздела фаз от температуры. При моделировании необходимо учитывать зависимость теплофизических свойств материала изделия (удельной теплоемкости, теплопроводности и плотности) от температуры.

Особенностью процесса формирования слоя электронным пучком является движение жидкой проводящей поверхности под действием электрического и магнитного полей.

Уравнения теплопроводности с учётом влияния жидкого проводящего слоя в электромагнитном поле имеет следующий вид:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + f - \delta_s L V_n + \rho_{\text{пр}} j^2.$$

Здесь c — теплоемкость материала, λ — коэффициент теплопроводности материала, ρ — плотность материала, T — температура, f — плотность теплового источника, δ_s — поверхностная δ -функция, V_n — скорость движения границы фазового перехода по нормали, L — энтальпия фазового перехода, $\rho_{\text{пр}}$ — проводимость жидкого металла, j — плотность тока внутри жидкости.

Поверхность ванны расплава стремится принять свою равновесную форму под влиянием силы тяжести и сил поверхностного натяжения. Дифференциальное уравнение движения жидкости имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{v}}}{\partial t} + (\bar{\mathbf{v}} \nabla) \bar{\mathbf{v}} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \frac{\mu}{3\rho} \operatorname{grad} \operatorname{div} \bar{\mathbf{v}} + \frac{\mu}{\rho} \Delta \bar{\mathbf{v}} - \sigma R \delta(\varphi) \nabla \varphi.$$

Здесь $\mathbf{g}$ — ускорение свободного падения; ρ — плотность; p — давление; μ — коэффициент динамической вязкости; $\bar{\mathbf{v}} = (v_x, v_y, v_z)$ — вектор эффективной скорости расплава, рассчитываемый через истинную скорость жидкой фазы, R — искривление линии раздела двух фаз; φ — расстояние от текущей линии раздела двух фаз до нулевого интерфейса; $\delta(\varphi)$ — волновая функция от φ .

Уравнение неразрывности имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{\mathbf{v}}) = 0.$$

В качестве прикладного инструмента для численного моделирования ЭЛС используются пакеты инженерных расчётов (Computer-Aided Engineering, CAE), включая анализ конечных элементов (Finite Element Analysis, FEA), динамику многотельных систем (Multi-Body Dynamics, MBD), вычислительную гидродинамику (Computational Fluid Dynamics, CFD), взаимодействие жидкости (газа) с конструкцией (Fluid-Structure Interaction, FSI), электромагнитный анализ (Electro-Magnetic Analysis, EMA), автоматизированную оптимизацию (Computer-Aided Optimization, CAO).

Таким образом, алгоритмический уровень объединяет множество правил и законов управления, которые могут быть записаны на какой-либо носитель информации. В то же время, правила и законы управления не могут быть реализованы без остальных, имеющих физическое воплощение уровней иерархической структуры СУ.

Системная страта

На системной страте рассматриваются задачи оценки качества моделей на нижестоящих уровнях с учётом основных структурных и параметрических характеристик, общие комплексные вопросы, определяется методика оптимизации параметров процесса на базе векторного критерия. На данной страте анализируются все технические и экономические вопросы, задаются проектные ограничения.

Оптимальные значения параметров процесса ЭЛС рассчитываются с учётом вектора критериев оптимизации K , компоненты которого являются функциями исходных, рассчитываемых и искомых параметров. В качестве критериев векторной оптимизации процесса можно выбрать следующие экономические и технологические показатели: K_1 — приведённые затраты, K_2 — производительность процесса.

Анализ ряда работ по методам решения задач многоцелевой оптимизации показал эффективность её построения по модульно—иерархическому принципу. Разбиение подсистемы многоцелевой оптимизации на три уровня обусловлено сложностью рассматриваемой задачи. Нижний уровень подсистемы определяет способ задания и структуру множества альтернатив управляющих параметров процесса и соответствующее им множество частных критериев оптимизации. На среднем уровне подсистемы значительно сокращается допустимое множество вариантов выбора параметров ТП путем определения их эффективных (Парето—оптимальных) значений. Простейшим методом приближенного построения множества Парето можно считать ЛП—поиск, обеспечивающего заполнение области возможных решений в многомерном пространстве параметров равномерно расположенными пробными точками, в каждой точке определяют значения всех критериев и исключают неэффективные. Численная реализация моделей этого уровня позволяет сформировать пакет эффективных решений. На верхнем уровне из этого пакета выбирается единственный наилучший вариант.

Простейшим методом приближенного построения множества Парето можно считать ЛП—поиск, который представляет собой модификацию метода случайного поиска, пригодную для решения задач нелинейного программирования при большой размерности многоцелевой функции [19]. Метод осуществляет заполнение области возможных решений в многомерном пространстве параметров равномерно расположенными пробными точками $Q_1, Q_2, \dots$. Для каждой точки исследуемого пространства параметров вычисляются значения всех критериев, по которым составляются таблицы испытаний, где эти значения расположены в порядке возрастания или убывания. Численная реализация моделей этого уровня позволяет сформировать пакет эффективных решений. На верхнем уровне из этого пакета выбирается единственный наилучший вариант.

Системный уровень подобно кровеносной системе биологического организма обеспечивает коммуникационные процессы всех разнородных страт производственной системы ЭЛС для достижения главной задачи: получение сварного соединения с заданной структурой и свойствами.

Заключение

Понимание внутренних закономерностей производства с помощью теории иерархических систем позволяет выявить различные способы декомпозиции сложной системы в виде иерархий абстрагирования, организации и сложности принятия решений. Стратифицированное представление ПС позволяет раскрыть взаимодействие разнородных по своей природе уровней и межуровневых связей, имеющих различные интерфейсы. Приведенная иерархическая абстракция,

состоящая из технологической, инструментальной, измерительной, информационной, алгоритмической, системной страт позволяет достаточно полно раскрыть содержание производственной системы ЭЛС, которая характеризуется последовательным вертикальным расположением подсистем, приоритетом действий подсистем верхнего уровня, зависимостью действий подсистем верхнего уровня от фактического исполнения нижними уровнями своих функций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Рудской А.И., Волков К.Н., Соколов Ю.А., Кондратьев С.Ю. Цифровые производственные системы: технологии, моделирование, оптимизация. — СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. — 828 с.
- [2] Рудской А.И., Соколов Ю.А., Кондратьев С.Ю., Волков К.Н. Наука, искусство, технологии: монография. — СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. — 706 с.
- [3] Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении / Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева, В.Г. Митрофанова. — М.: Машиностроение, 1986. — 256 с.
- [4] Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. — М.: Мир, 1973. — 344 с.
- [5] Sabchevski S.P., Mladenov G.M., Wojcicki S., Dabek J. An analysis of electron guns for welding // Journal of Physics. 1996. V. 29. Is. 6. Pp. 1446–1456.
- [6] Chiang S., Albright C.E. The limit of joint penetration in high energy density beam welding // Welding Journal. 1993. № 3. Pp. 117–121.
- [7] Gross P.M. Technical note: creating deeper electron beam penetration // Welding Journal. 1993. № 2. Pp. 61–62.
- [8] Borrow N.P. New low cost electron beam welder // Metallurgia. 1993. V. 60. Is. 1. Pp. 36–43.
- [9] Соколов Ю.А., Павлушин Н.В., Кондратьев С.Ю. Новые аддитивные технологии с использованием пучка ионов // Вестник машиностроения. 2016. № 9. С. 72–76.
- [10] Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Новый подход к синтезу порошковых и композиционных материалов электронным лучом. Часть 1. Технологические особенности процесса // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. № 1 (727). С. 30–35.
- [11] Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Новый подход к синтезу порошковых и композиционных материалов электронным лучом. Часть 2. Практические результаты на примере сплава ВТ6 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. № 3 (729). С. 40–44.
- [12] Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Алгоритм и технологические процессы синтеза порошковых деталей электронным лучом в вакууме // Технология машиностроения. 2015. № 1. С. 11–16.
- [13] Будкин Ю.В., Сивов Е.Н., Соколов Ю.А. Электроннолучевая сварки. — М.: ДПК Пресс, 2010. — 96 с.
- [14] Рамбо Дж., Блаха М. UML 2.0. Объектно-ориентированное моделирование и разработка. — СПб.: Питер, 2007. — 544 с.
- [15] Новиков Ф., Иванов Д. Моделирование на UML. — СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. — 200 с.
- [16] Глазов СИ., Люшинский А.В., Магнитов В.С. и др. Основы технологии электронно-лучевой и диффузионной сварки. — Рыбинск: НПО «Сатурн», 2001. — 284 с.
- [17] Соколов Ю.А., Павлушин Н.В. Особенности управления процессом электроннолучевой сварки // Металловедение и термическая обработка металлов. 2022. № 10. С. 11–15.
- [18] Шолохов М.А. Траекторные задачи при автоматической и роботизированной сварке. Методы и алгоритмы решения, датчики, программно-аппаратные средства. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. — 168 с.
- [19] Хоменюк В.В. Элементы теории многоцелевой оптимизации. — М.: Наука, 1983. — 123 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

СОКОЛОВ Юрий Алексеевич — зам. директора, ПАО "Электромеханика", д-р техн. наук.

E-mail: s5577@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0280-0178>

REFERENCES

- [1] **A.I. Rudskoy, K.N. Volkov, Yu.A. Sokolov, S.Yu. Kondratyev**, Tsifrovyye proizvodstvennyye sistemy: tekhnologii, modelirovaniye, optimizatsiya. — SPb.: POLITEKh-PRESS, 2020. — 828 s.
- [2] **A.I. Rudskoy, Yu.A. Sokolov, S.Yu. Kondratyev, K.N. Volkov**, Nauka, iskustvo, tekhnologii: monografiya. — SPb.: POLITEKh-PRESS, 2022. — 706 s.
- [3] Avtomatizirovannoye proyektirovaniye i proizvodstvo v mashinostroyenii / Pod obshch. red. Yu.M. Solomentseva, V.G. Mitrofanova. — M.: Mashinostroyeniye, 1986. — 256 s.
- [4] **M. Mesarovich, D. Mako, I. Takakhara**, Teoriya iyerarkhicheskikh mnogourovnevnykh sistem. — M.: Mir, 1973. — 344 s.
- [5] **S.P. Sabchevski, G.M. Mladenov, S. Wojcicki, J. Dabek**, An analysis of electron guns for welding // Journal of Physics. 1996. V. 29. Is. 6. P. 1446–1456.
- [6] **S. Chiang, C.E. Albright**, The limit of joint penetration in high energy density beam welding // Welding Journal. 1993. № 3. P. 117–121.
- [7] **P.M. Gross**, Technical note: creating deeper electron beam penetration // Welding Journal. 1993. № 2. P. 61–62.
- [8] **N.P. Borrow**, New low cost electron beam welder // Metallurgia. 1993. V. 60. Is. 1. P. 36–43.
- [9] **Yu.A. Sokolov, N.V. Pavlushin, S.Yu. Kondratyev**, Novyye additivnyye tekhnologii s ispolzovaniyem pu-chka ionov // Vestnik mashinostroyeniya. 2016. № 9. S. 72–76.
- [10] **A.I. Rudskoy, S.Yu. Kondratyev, Yu.A. Sokolov**, Novyy podkhod k sintezu poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov elektronnykh luchom. Chast 1. Tekhnologicheskiye osobennosti protsessa // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 2016. № 1 (727). S. 30–35.
- [11] **S.Yu. Kondratyev, Yu.A. Sokolov**, Novyy podkhod k sintezu poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov elektronnykh luchom. Chast 2. Prakticheskiye rezultaty na primere splava VT6 // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 2016. № 3 (729). S. 40–44.
- [12] **A.I. Rudskoy, S.Yu. Kondratyev, Yu.A. Sokolov**, Algoritmi i tekhnologicheskiye protsessy sinteza poroshkovykh detaley elektronnykh luchom v vakuumе // Tekhnologiya mashinostroyeniya. 2015. № 1. S. 11–16.
- [13] **Yu.V. Budkin, Ye.N. Sivov, Yu.A. Sokolov**, Elektronoluchevaya svarka. — M.: DPK Press, 2010. — 96 s.
- [14] **Dzh. Rambo, M. Blakha**, UML 2.0. Obyektno-orientirovannoye modelirovaniye i razrabotka. — SPb.: Piter, 2007. — 544 s.
- [15] **F. Novikov, D. Ivanov**, Modelirovaniye na UML. — SPb.: SPbGU ITMO, 2010. — 200 s.
- [16] **S.I. Glazov, A.V. Lyushinskiy, B.C. Magnitov i dr.**, Osnovy tekhnologii elektronno-luchevoy i diffuzionnoy svarki. — Rybinsk: NPO «Saturn», 2001. — 284 s.
- [17] **Yu.A. Sokolov, N.V. Pavlushin**, Osobennosti upravleniya protsessom elektronoluchevoy svarki // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 2022. № 10. S. 11–15.
- [18] **M.A. Sholokhov**, Trayektornyye zadachi pri avtomaticheskoy i robotizirovannoy svarke. Metody i algoritmy resheniya, datchiki, programmno-apparatnyye sredstva. — M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2015. — 168 s.
- [19] **V.V. Khomenyuk**, Elementy teorii mnogotselovoy optimizatsii. — M.: Nauka, 1983. — 123 s.

INFORMATION ABOUT AUTHOR

Yuriy A. SOKOLOV – *Public Joint Stock Company "Electromekhanika".*

E-mail: s5577@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0280-0178>

Поступила: 06.11.2022; Одобрена: 07.12.2022; Принята: 20.12.2022.

Submitted: 06.11.2022; Approved: 07.12.2022; Accepted: 20.12.2022.

Научная статья

УДК 691.735: 669.017.15: 620.183

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28407>



В. Нгуен , А.Е. Балановский, В. Нгуен

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический университет»,
Иркутск, Россия

 vantrieu.xumuk@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ НАГРЕВЕ ОБМАЗКИ ОЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ

Аннотация. Проведены эксперименты по получению поверхностных слоев плазменным нагревом обмазки оловянной бронзы (сплав ПРВ-БрО10) различной толщины (0,25; 0,5; 1,00 мм) при воздействии на них различной силы тока (100; 140; 160 А). Полученные слои имеют разную глубину упрочненного слоя и разную структуру. При толщине слоя обмазки 0,25 и 0,5 мм легко появляются дефекты под действием большой силы тока. При более толстом слое обмазки (1 мм) растворение оловянной бронзы в сталь ограничено. Низкая сила тока плазменной дуги (100 А) ограничивает диффузию и трансформацию расплавленной ванны, достаточную для насыщения легирующими элементами толстого слоя обмазки (0,5 и 1 мм). Насыщенные зоны, богатые железом представлены высокой дисперсностью и микротвердостью, находящейся в основном в пределах 400 – 600 НВ.

Ключевые слова: формирование поверхностного слоя, плазменный нагрев, оловянная бронза, структура, микротвердость, сила тока, обмазка.

Для цитирования:

Нгуен В., Балановский А.Е., Нгуен В. Особенности формирования поверхностных слоев при плазменном нагреве обмазки оловянной бронзы // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 4. С. 110–122. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28407>



V. Nguyen ✉, A.E. Balanovskiy, V. Nguyen

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
«Irkutsk National Research Technical University»,
Irkutsk, Russia

✉ vantrieu.xumuk@gmail.com

FEATURES OF THE FORMATION OF SURFACE LAYERS DURING PLASMA HEATING OF TIN BRONZE PRE-COATING

Abstract. We experimented with obtaining surface layers by plasma heating of a pre-coating of tin bronze (PRV-BrO10 alloy) of various thicknesses (0.25; 0.5; 1.00 mm) when exposed to various currents (100; 140; 160 A). The resulting layers have different depths of the hardened layer and different structures. With a pre-coating layer thickness of 0.25 and 0.5 mm, high current easily causes defects. With a thicker pre-coating layer (1 mm), the dissolution of tin bronze into steel is limited. Low current of the plasma arc (100 A) limits the diffusion and transformation of the molten pool sufficient to saturate the thick pre-coating layer (0.5 and 1 mm) with alloying elements. Saturated zones rich in iron are represented by high dispersion and microhardness, which is mainly in the range of 400–600 HV.

Keywords: surface layer formation, plasma heating, tin bronze, structure, microhardness, current strength, pre-coating.

Citation:

V. Nguyen, A.E. Balanovskiy, V. Nguyen, Features of the formation of surface layers during plasma heating of tin bronze pre-coating, *Global Energy*, 28 (04) (2022) 110–122, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28407>

Введение. В настоящее время актуальна проблема повышения износостойкости металлических сплавов, деталей и механизмов, работающих в условиях как воздействия абразивных частиц, так и трения скольжения. Разнообразные детали: втулки, пластины скольжения (ползунки), неподвижные пластины (для пресс-формы), подшипниковые узлы и т.д., изготовленные из дорогих медных сплавов, нуждаются в замене, в необходимости повышения прочности и других свойств, таких как износостойкость, коррозионная стойкость [1, 2]. Хотя многие медные сплавы обладают высокими антифрикционными свойствами, но их низкая износостойкость и высокая стоимость не всегда удовлетворяют экономико-техническим требованиям современного производства. Одним из решений для замены бронзовых материалов и повышения качества низкопрочных железных сплавов является использование материалов на основе композиции железа и меди (Fe-Cu). Известно, что материалы на основе Fe-Cu относятся к псевдосплавам, которые могут обеспечивать высокую износостойкость и низкий коэффициент трения [1–3]. Однако на практике у созданных сплавов системы Fe-Cu часто встречается ряд недостатков: слоистость и неоднородность структуры, ограниченная твердость, высокая вероятность появления дефектов [4–6]. Тем не менее несмешивающиеся сплавы Fe-Cu, полученные традиционными методами затвердевания, подвержены сегрегации микроструктуры, которая вызвана двумя жидкими расплавами с разной плотностью, что стало основным препятствием для ограничения применения несмешивающихся сплавов Fe-Cu в промышленности [5].

Для изготовления износостойких и антифрикционных деталей некоторые авторы пришли к псевдосплавам «бронза-сталь» [2] или сплавам Fe-Cu-Sn [1, 7–9]. Сплав Fe-Cu-Sn с долей 5 % меди и 3 % олова при испытании трения со сталью дает низкий коэффициент трения, ни-

же 0,5 [7]. Сплав Fe-Mn-Cu-Sn-C имеет низкую твердость, с максимальным значением после измельчения около 350 HV [8]. Механические свойства сплавов Fe-Cu-Sn-C, спеченных при (1000 – 1150 °С), соответствуют или превосходят свойства деформируемых бронзовых сплавов [9]. Сплавы, спеченные при температурах 850 °С, показали плохие механические свойства из-за неполной диффузии меди и углерода в матрицу Fe во время спекания. Установлено, что композит Fe85%-Cu15% имеет наиболее высокую твердость (640 HV), а композит Fe15%-Cu85% – наименее (341 HV). После дополнительного отжига твердость двух этих композитов снижается при температурах свыше 500 °С [10].

Нанесение защитных покрытий является одним из способов улучшения свойств поверхности металлов, в том числе высокой твердости, коррозионной стойкости, износостойкости. и т. д. Установлено, что легированные покрытия системы Fe-Cu получают в основном двумя способами: поверхностное легирование металлов медью или медным сплавом за счет диффузии легирующих элементов показано в работах [11–13]; наплавка, оплавление смеси железных и меди или медных сплавов при использовании высококонцентрированных источников, как показано в работах [4, 12, 15–17]. По технико-экономическим показателям среди методов использования высококонцентрированных источников для упрочнения и легирования поверхности металлов оптимальным вариантом считается плазменный нагрев [18–20]. Для модификации поверхности сплавов кремниевой бронзы GTA используют в качестве плазмообразующего газа аргон или азот с силой тока 160 – 200 А, скоростью перемещения 2 мм/с. Модифицированный сплав дает значительное улучшение твердости и износостойкости поверхности, максимальное значение твердости составляет 835 HV, а для подложки – 180 HV [18]. На сталь Q235A плазменное покрытие получилось из смеси оловянной бронзы (CuSn10) и железного сплава (0,54 % С, 18,1 % Cr, 10,2 % Ni, остальное – Fe) с режимом, включающим ток дуги 175 – 180 А, напряжение дуги составило 28 – 31 В, расход газа аргона – 8,3 л/мин, скорость передвижения – 45 – 50 мм/мин [19]. В результате этого полученное покрытие CuSn10 обладает твердостью, находящейся в диапазоне 150 – 230 HV.

Оловянная бронза обладает хорошей свариваемостью и прессуемостью. Кроме того, оловянные бронзы имеют малую усадку, поэтому могут применять для отливки деталей, создания поверхностных покрытий со сложными конфигурациями. Благодаря низкой температуре плавления (около 1000 °С), оловянные бронзы легко поддаются термической обработке. Однако исследование оплавленных покрытий на сталях еще не достаточно. По выводам многих авторов, при оплавлении покрытия из бронзы и стальной поверхности для создания легированного слоя системы Fe-Cu с более высокой дисперсностью, однородностью, твердостью и меньшим количеством дефектов необходимо найти оптимальные параметры обработки. Известно, что во многих работах [19–23] при плазменном оплавлении сплавов системы Fe-Cu использовались: высокие значения силы тока, более 160 А, и большое время обработки. Использование плазменной обработки электрической дугой с нанесением предварительного слоя порошков в виде обмазки, пасты на поверхность металла, было представлено в нескольких работах [24–29]. Как показано в работах [25, 28, 29], использование обмазки, содержащей связующий компонент, упрощает процесс обработки и снижает стоимость технологии.

Целью данной работы является исследование микроструктуры и микротвердости сформированных поверхностных слоев после плазменного нагрева слоя обмазки различной толщины из оловянной бронзы при различных силах тока, которые не выше 160 А.

Методы и материалы

В качестве сплава оловянной бронзы используется сплав ПРВ-БрО10. Химический состав этого сплава показан в табл. 1, и размер частиц порошка представлен дисперсией на рис. 1. Пластины из стали Ст3 (типичный размер 70 × 25 × 10 мм) для плазменной обработки, предварительно подвергались шлифовке абразивными бумагами. Размешивали равномерно смесь порошка,

потом перемешивали с клеем. Соотношение клея и количества порошка должно обеспечивать нужную консистенцию, чтобы получить пасту в густом виде для легкого нанесения ее на поверхность металлов. Толщина обмазки фиксировалась на поверхности стали Ст3 с помощью маски различной относительной толщины: 0,25; 0,50; 1,00 мм. Приготовленные образцы проходили сушку в сушильном шкафу ШС-80-01 СПУ в течение 1 ч при температуре 100 °С, чтобы полностью удалась влага из обмазки.

Таблица 1

Химический состав сплава ПРВ-BrO10

Table 1

The chemical composition of the alloy PRV-BrO10

Марка порошка	Cu, %	Sn, %
ПРВ-BrO10	89 – 90	9–11

Операция получения покрытий плазменным оплавлением осуществляется в несколько этапов, в том числе взвешивание компонентов входящих в состав порошков; смешивание смеси порошков и клея до получения пасты; нанесение полученной пасты на шлифованную поверхность образца; сушка испытуемого образца в сушильном шкафу; плазменный нагрев; охлаждение обрабатываемого образца в охлаждающей среде. Оборудование для плазменной обработки представлено в работе [24, 27]. Для проведения обработки использовались различные режимы: сила тока (I) = 100, 140, 160 А; расход газа Аргона = 10 л/мин; скорость обработки = 2,7 мм/с.

Изучение микроструктуры обработанных образцов проводили на металлографическом микроскопе марки MET-2 с увеличением от 50 до 1000 раз. С помощью программы Tour View для экспорта изображений на компьютер, проводили наблюдение изменения микроструктуры металла по глубине слоя. Измерения твердости металлов, сплавов и металлических покрытий проведены с помощью микротвердомера HNV-G21. Значения твердости у этого прибора вычислены по шкалам Виккерса.

Результаты исследований и их обсуждение

В табл. 2 показан внешний вид поверхности однопроходной дорожки полученных слоев после плазменного нагрева и охлаждения в воде. Установлено следующее:

- С увеличением толщины слоя обмазки ширина дорожки увеличивалась при той же силе тока за счет плавления несмешивающейся бронзы на поверхности стали.
- В слое, полученном при толщине обмазки 0,25 мм и силе тока 140 А появлялись поры на поверхности полученного слоя. Наличие брызг на краях дорожек образцов № 2, 3, 6, 8, 9.
- Поверхность легированных слоев образцов № 4, 7 имеет форму рыбьей чешуи. Наиболее гладкой является поверхность слоев образцов № 1, 5.

Установлено, что однородность слоя сплава сильно зависит от степени растворения массы оловянной бронзы и разбавленной поверхности стали [30]. Толстый слой покрытия препятствовал передаче тепла от потока плазменной дуги к подложке. Затем ток необходимо увеличить, чтобы обеспечить достаточную энергию для увеличения степени растворения сплава при разбавленной площади поверхности подложки. Известно, что оловянная бронза имеет более низкую температуру плавления по сравнению с железом. В результате недостаточное соединение на границе кристалла, в свою очередь, приводило к трещинам, образованию которых способствовали растягивающие напряжения при быстром охлаждении водой. Установлено, что из-за большого объема жидкого раствора, образовавшегося из толстого слоя покрытия, и хаотического конвективного движения плазменно-дуговой поток неравномерно передавался на всю площадь поверхности

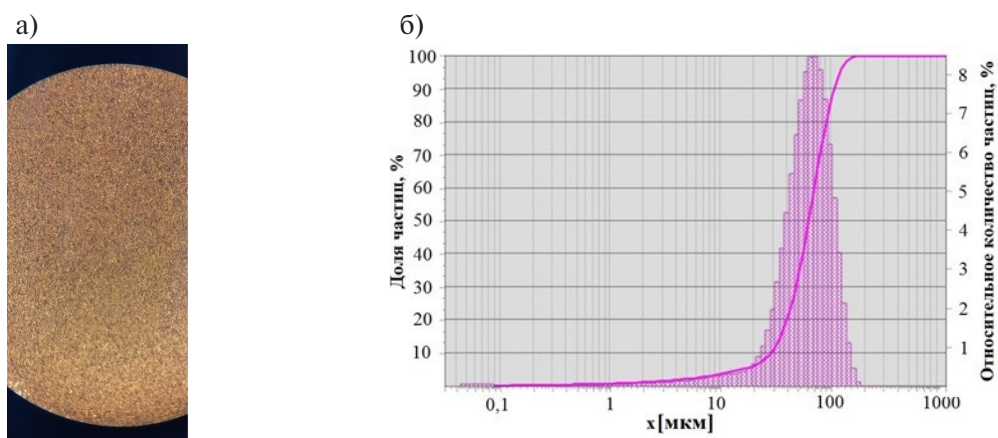


Рис. 1. Гранулометрический состав частиц порошка сплава ПРВ-БрО10
Fig. 1. Granulometric composition of powder particles of the alloy PRV-BrO10

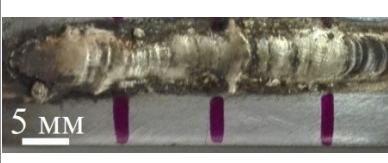
подложки. Следовательно, это приводило к неравномерности границы ванны расплава, неупорядоченному распределению субслоев и возникновению мелких железонасыщенных участков, расположенных внутри насыщенных зон оловянной бронзы и наоборот.

Таблица 2

**Внешний вид поверхности легированных дорожек
после плазменного нагрева слоя обмазки сплава ПРВ-БрО10**

Table 2

**Appearance of the surface of alloyed tracks
after plasma heating of the coating layer of the PRV-BrO10 alloy**

Ток, А	Толщина обмазки		
	0,25 мм	0,50 мм	1,00 мм
100			
140			
160			

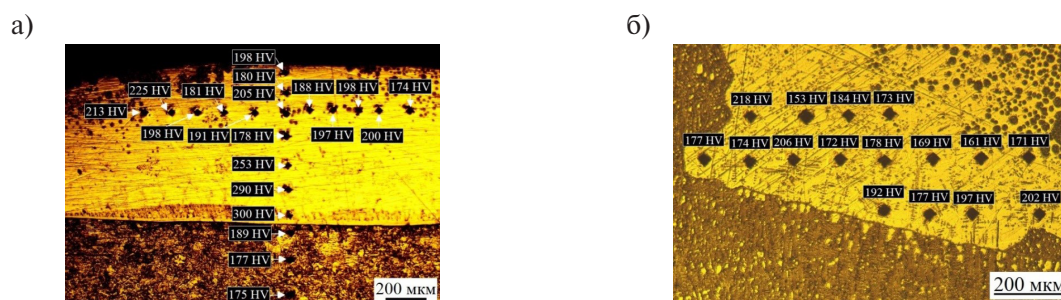


Рис. 2. Распределение значений микротвердости богатых зон оловянной бронзой полученных слоев при толщине обмазки 1 мм и силах тока: а – 100 А; б – 160 А

Fig. 2. The distribution of microhardness values of the rich zones of tin bronze of the obtained layers with a coating thickness of 1 mm and current strengths: a – 100 A; b – 160 A

Результаты измерения микротвердости полученных слоев под нагрузкой 2 Н приведены на рис. 2 и 3. Зоны, богатые оловянной бронзой, характеризуются матрицей этой бронзы с более мелкими структурами округлых и дендритных богатых железом зерен (рис. 2). Значения микротвердости этих зон находятся в основном в пределах от 170 до 250 HV. В частности, некоторые значения, достигшие 290, 300 HV, могут быть связаны с наличием в месте измерения богатой железом структуры.

На рис. 3 показано распределение значений микротвердости богатых зон железом легированных слоев. Видно, что значения микротвердости по глубине и ширине легированного слоя № 1 незначительно отличаются и находятся в диапазоне 341–562 HV (рис. 3, а). В слое, полученном со слоем обмазки 0,50 мм и силе тока 100 А, для насыщенной зоны железом значения микротвердости находятся в диапазоне 513–615 HV (рис. 3, б). Появились трещины в легированном слое № 3, полученном из обмазки толщиной 0,25 мм и при силе тока 140 А (рис. 3, в). Измеренные значения микротвердости для этого слоя не превышают 500 HV. Существует большая разница между структурами слоев, полученных при силах 140 и 160 А с толщиной обмазки 0,50 мм. В поверхностном слое № 5 (сила тока 140 А) отслоения не произошло, но появились довольно крупные последовательные зоны (светлые), богатые оловянной бронзой, и трещины сегрегации, которые были заполнены этой бронзой (рис. 3, г). В результате много мягких зон мягкого (светлые участки на рис. 3, г) с низкой микротвердостью (134, 229, 310 HV), остальные значения находятся в диапазоне 402–567 HV. Для слоя № 8 (сила тока 160 А) появились протяженные трещины, идущие от поверхности до границы между легированным слоем и основной сталью. Видно, что структура этого слоя более однородна по сравнению со структурой слоя № 5 (рис. 3, д). На рис. 3, е показана одна типичная зона слоя № 9 с распределением микротвердости нескольких точек, в том числе максимальное значение достигло до 618 HV.

Сравнительная оценка микротвердости представлена диаграммой «Ящик с усами» с обработкой выбросов с 5-го/95-му процентиллю на рисунке 3.14. Установлено, что большинство значений микротвердости насыщенных зон железом всех слоев находится в пределах 400–600 HV. Зоны насыщения слоев № 1, 2, 4, 8, 9 имеют более высокое концентрирование значений микротвердости по сравнению со слоем № 5. Это связано с наличием наиболее крупных мягких зон, богатых оловянной бронзой, которые снизили твердости точек измерения. Интересно, что значения микротвердости насыщенных зон железом слоев, имеющих расслоение, значительно выше, чем у насыщенных слоев № 1, 4, 5, 8. Среднее значение для каждого слоя составляет 497, 549, 446, 443, 486, 550 HV, соответственно.

Внешний вид поверхности и поперечного сечения образовавшихся слоев после полирования и травления представлен на рис. 5. Несмотря на отсутствие явно выраженной внешней формы

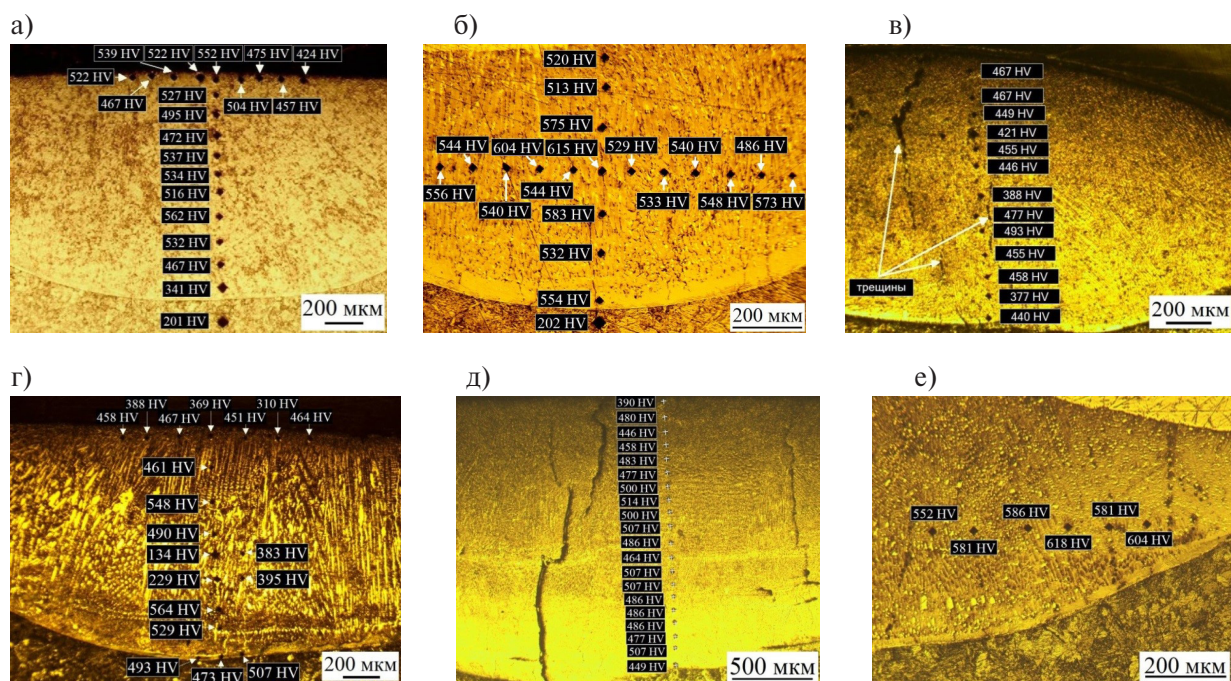


Рис. 3. Распределение значений микротвердости насыщенных зон железом полученных слоев при различных режимах (толщина обмазки и сила тока): а – 0,25 мм, $I = 100$ А; б – 0,50 мм, $I = 100$ А; в – 0,25 мм, $I = 140$ А; г – 0,50 мм, $I = 140$ А; д – 0,50 мм, $I = 160$ А; е – 1,00 мм, $I = 160$ А

Fig. 3. Distribution of microhardness values of iron-saturated zones of obtained layers under various modes (thickness of the coating and current strength): а – 0,25 мм, $I = 100$ А; б – 0,50 мм, $I = 100$ А; в – 0,25 мм, $I = 140$ А; г – 0,50 мм, $I = 140$ А; д – 0,50 мм, $I = 160$ А; е – 1,00 мм, $I = 160$ А

рыбьей чешуи (табл. 2), структура поверхности легированного слоя, полученного оплавлением обмазки оловянной бронзы с толщиной 1 мм при силе тока 140 А, после полировки приобрела такую форму (рис. 5, а). При обработки обмазки 1 мм оловянной бронзы с силой тока 160 А структура поверхности полученного слоя проявилась в виде изображенных крупных насыщенных богатых железом зон, расположенных в матрице этой бронзы (рис. 5, б). При большем увеличении этих крупных зон наличие богатых железом частиц показано на рис. 5, в. Размер большинства данных частиц находится в диапазоне 1 – 15 мкм. Толстый слой обмазки сопровождался образованием большого объема жидкого раствора, в котором движение конвекционных потоков было более хаотичным, т.е. неравномерным действием теплопередачи по всей площади и глубине ванны расплава. В результате этого появились насыщенные зоны бронзы с железом, находящиеся в богатых оловянной бронзой зонах; показана структура края слоя, полученного при оплавлении обмазки этой бронзы с толщиной 1 мм при силе тока 160 А (рис. 5, г).

В результате получения слоев на основе оловянной бронзы структуры обогащенных железом зон показаны на рис. 6. Видно, что при использовании тонкого слоя обмазки 0,25 мм и токе 100 А размер длина богатых оловянной бронзой зон не превышает 20 мкм (рис. 6, а). Увеличение массы оловянной бронзы со слоем обмазки 0,50 мм и силой тока 140 А привело к увеличению размеров зон, богатых этой бронзой, на несколько десятых по длине и ширине (рис. 6, б). При увеличении силы тока (160 А) основная структура слоев на основе покрытия толщиной 0,50 мм — дендритно-столбчатая с высокой плотностью расположения (рис. 6, в). При одинаковой силе тока (160 А) и толщине порошкового покрытия (1,00 мм) обогащенные железом зерна крупнее, чем в других слоях (рис. 6, г).

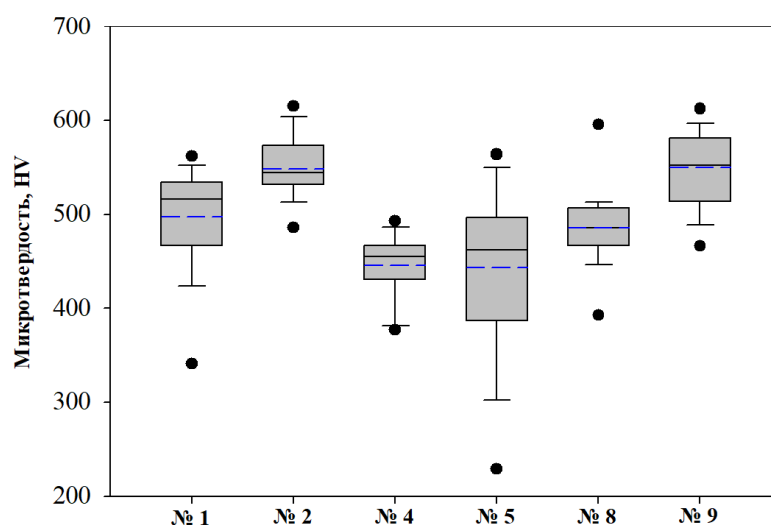
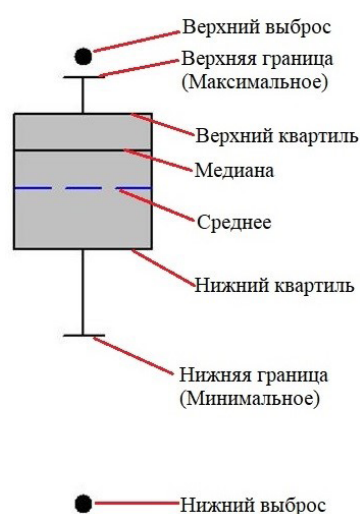


Рис. 4. Дисперсия микротвердости насыщенных зон железом легированных слоев, полученных при различных режимах (толщина обмазки и сила тока): № 1 – 0,25 мм, $I = 100$ А; № 2 – 0,50 мм, $I = 100$ А; № 4 – 0,25 мм, $I = 140$ А; № 5 – 0,50 мм, $I = 140$ А; № 8 – 0,50 мм, $I = 160$ А; № 9 – 1,00 мм, $I = 160$ А

Fig. 4. Dispersion of microhardness of iron-saturated zones of alloyed layers obtained under various modes (thickness of the coating and current strength): No. 1 – 0.25 mm, $I = 100$ A; No. 2 – 0.50 mm, $I = 100$ A; No. 4 – 0.25 mm, $I = 140$ A; No. 5 – 0.50 mm, $I = 140$ A; No. 8 – 0.50 mm, $I = 160$ A; No. 9 – 1.00 mm, $I = 160$ A

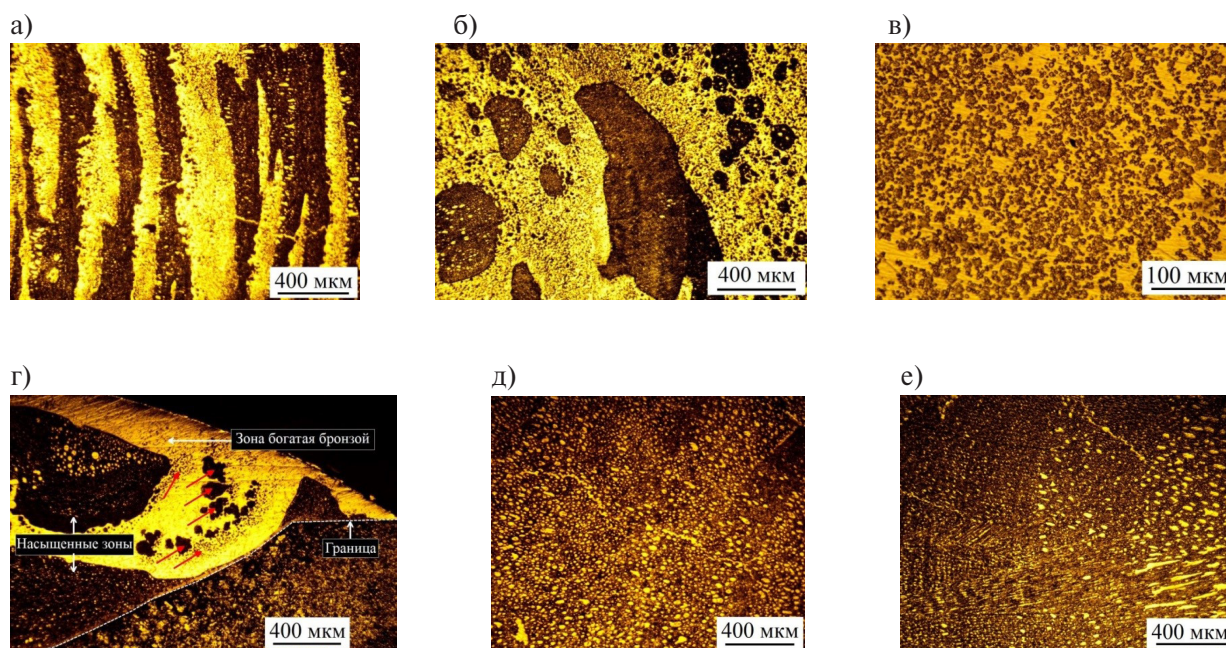


Рис. 5. Вид поверхности и поперечного сечения образовавшихся слоев после полирования и травления

Fig. 5. View of the surface and cross section of the formed layers after polishing and etching

Заключение

Результаты экспериментов показали, что использование тонкого слоя (0,25 мм) покрытия из сплава ПРВ-BrO10 обеспечивает более полное насыщение слоя. При скорости обработки (2,7 мм/с) и малой силе тока 100 А дефектов не фиксировали, а при большей силе тока – 140,

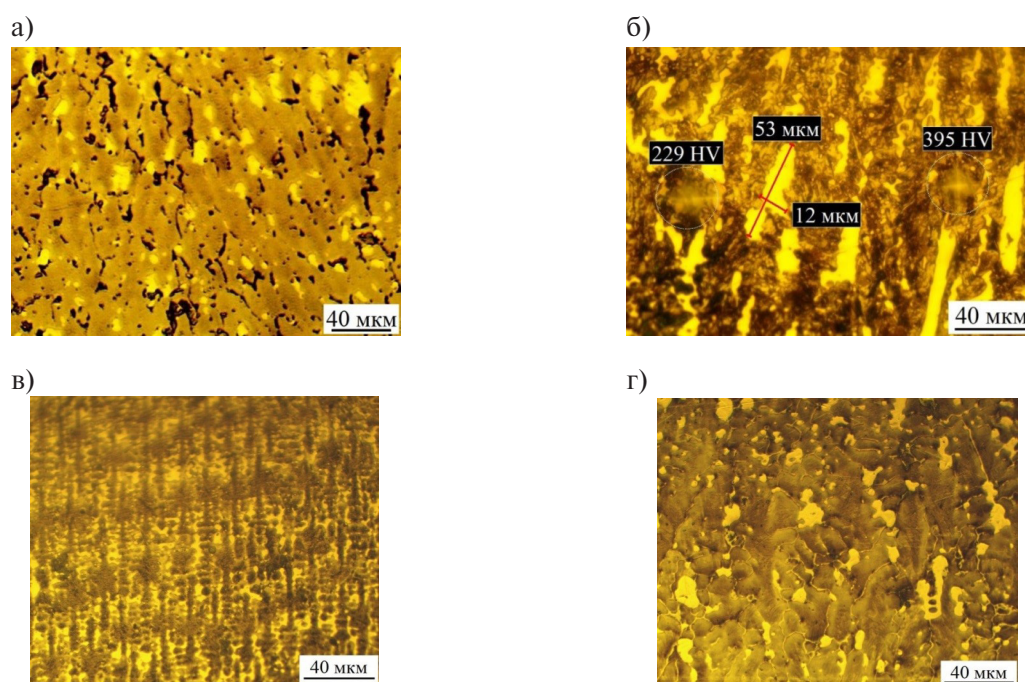


Рис. 6. Структура насыщенных зон железом легированных слоев, полученных при различных режимах (толщина обмазки и сила тока): а – 0,25 мм, $I = 100$ А; б – 0,50 мм, $I = 140$ А; в – 0,50 мм, $I = 160$ А; г – 1 мм, $I = 160$ А

Fig. 6. The structure of iron-saturated zones of alloyed layers obtained under various modes (thickness of the coating and current strength): а – 0.25 mm, $I = 100$ A; б – 0.50 mm, $I = 140$ A; в – 0.50 mm, $I = 160$ A; d – 1.00 mm, $I = 160$ A

160 А появлялись трещины. Использование слоя обмазки толщиной 1 мм не позволило в этой серии опытов получить насыщенный слой при указанных силах тока и привело к расслаиванию. Установлено, что легирование поверхности стали оловянной бронзой в основном происходит в жидком состоянии при расплавлении металлов. При большой массе оловянной бронзы и недостаточной теплоотдаче в образовавшемся поверхностном слое появляются различные подслои: верхний – расплавленный сплав, богатый оловянной бронзой, с наличием мелких железистых частиц; нижняя богата железом, легированным медью, оловом за счет их растворения в стальной матрице. Зоны обогащенной оловянной бронзы имеют микротвердость, которая находится в основном в пределах 170 – 300 HV, а зоны обогащенной железом – 400 – 600 HV.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Stepanova N., Razumakov A., Lozhkina E.A. Structure and mechanical properties of Cu–alloyed cast iron, *Applied Mechanics and Materials*. 682 (2014) 178–182.
- [2] Тен Э.Б., Петровский П.В., Ионова Г.Е. Особенности формирования границ раздела компонентов в композитах "Сталь-Алюминий" и "Сталь-Бронза" // *Литейщик России*. 2017. № 7. С. 26–28.
- [3] Zhang R.F., Kong X.F., Wang H.T., Zhang S.H., Legut D., Sheng S.H., Srinivasan S., Rajan K., Germann T.C. An informatics guided classification of miscible and immiscible binary alloy systems, *Scientific reports*. 7 (1) (2017) 9577.
- [4] Dai X., Xie M., Zhou S., Wang C., Yang J., Li Z. Formation and properties of a self-assembled Cu-Fe-Ni-Cr-Si immiscible composite by laser induction hybrid cladding, *Journal of Alloys and Compounds*. 742 (2018) 910–917.

- [5] Dai X., Zhou S., Wang M., Lei J., Xie M., Chen H., Wang C., Wang T. Microstructure evolution of phase separated Fe-Cu-Cr-C composite coatings by laser induction hybrid cladding, *Surface and Coatings Technology*. 324 (2017) 518–525.
- [6] Das P., Paul S., Bandyopadhyay P.P. HVOF sprayed diamond reinforced nano-structured bronze coatings, *Journal of Alloys and Compounds*. 746 (2018) 361–369.
- [7] Mushtaq S., Wani M., Saleem S., Bandy S., Mir M., Khan J., Singh J. Tribological Characteristics of Fe-Cu-Sn Alloy with Molybdenum Disulfide as a Solid Lubricant under Dry Conditions, *SSRN Electronic Journal*. 7 (2018).
- [8] Bączek E., Konstanty J., Romanski A., Podsiadlo M., Cyboron J. Processing and Characterization of Fe-Mn-Cu-Sn-C Alloys Prepared by Ball Milling and Spark Plasma Sintering, *Journal of Materials Engineering and Performance*. 27 (5) (2018).
- [9] Mamedov V. Microstructure and mechanical properties of PM Fe–Cu–Sn alloys containing solid lubricants, *Powder Metallurgy*. 47 (2004) 173–179.
- [10] Bachmaier A., Kerber M., Setman D., Pippin R. The formation of supersaturated solid solutions in Fe–Cu alloys deformed by high-pressure torsion, *Acta Materialia*. 60 (3) (2012) 860–871.
- [11] Огнева Т.С., Мартюшев Н.В., Альтпетер И., Сурков М. А., Токарев А. О., Крутская Т.М. Структура и свойства термически обработанных среднеуглеродистых сталей, легированных медью // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты*. 2018. Т. 20. №. 2. С. 130–143.
- [12] Марусин М.В., Шукин В.Г., Марусин В.В. Поверхностное легирование углеродистой стали медью при высокоэнергетической индукционной обработке // *Физика и химия обработки материалов*. 2010. № 5. С. 67–70.
- [13] Колубаева Ю.А., Иванов Ю.Ф., Тересов А.Д. Исследование закономерностей электронно-ионно-плазменного легирования стали // *Перспективные материалы*. 2011. № S13. С. 608–617.
- [14] Tan K.S., Wood R.J.K., Stokes K.R. The slurry erosion behaviour of high velocity oxy-fuel (HVOF) sprayed aluminium bronze coatings, *Wear*. 255 (1–6) (2003) 195–205.
- [15] Brian R.W. 17 – Mechanics of Abrasion and Wear, *Principles of Modern Grinding Technology* (Second Edition), William Andrew Publishing. (2014) 349–379.
- [16] Devojno O.G., Feldshtein E., Kardapolava M.A., Lutsko N.I. On the formation features, structure, microhardness and tribological behavior of single tracks and coating layers formed by laser cladding of Al-Fe powder bronze, *Surface and Coatings Technology*. 358 (2019) 195–206.
- [17] Gamon W., Aniolek K. Examination of the sliding wear of bronze coatings on railway buffer heads, *Wear*. 448–449 (2020), 203235.
- [18] Aravind A., Saravanan R. Improvement in hardness, wear rate and corrosion resistance of silicon bronze using gas tungsten arc, *Materials Today: Proceedings*. 24 (2) (2020) 406–414.
- [19] Hou Q.Y., Ding T.T., Huang Z.Y., Wang P., Luo L.M., Wu Y.C. Microstructure and properties of mixed Cu–Sn and Fe-based alloys without or with molybdenum addition processed by plasma transferred arc, *Surface and Coatings Technology*. 283 (2015) 184–193.
- [20] Kucita P., Wang S.C., Li W.S., Cook R.B., Starink M.J. The effects of substrate dilution on the microstructure and wear resistance of PTA Cu-Al-Fe aluminium bronze coatings, *Wear*. 440–441 (2019) 203102.
- [21] Nair S., Sellamuthu R., Saravanan R. Effect of Nickel content on hardness and wear rate of surface modified cast aluminum bronze alloy, *Materials Today: Proceedings*. 5 (2, 2) (2018) 6617–6625.
- [22] Raju D., Govindan A.R., Subramanian J., Ramachandran S., Nair S. Surface alloying of aluminium bronze with chromium: Processing, testing, and characterization, *Materials Today: Proceedings*. 27 (3) (2020) 2191–2199.
- [23] Aravind A., Saravanan R. Improvement in hardness, wear rate and corrosion resistance of silicon bronze using gas tungsten arc, *Materials Today: Proceedings*. 24 (2) (2020) 406–414.
- [24] Balanovskii A.E., Vu V.H. Plasma surface carburizing with graphite paste, *Letter on materials*. 7 (2) (2017) 175–179.

- [25] **Bello K.A., Maleque M.A., Adebisi A.A.** Processing of Ceramic Composite Coating via TIG Torch Welding Technique, Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials. 4 (2020) 523–535.
- [26] **Azwan M., Maleque M.A., Rahman M.M.** TIG Torch Melting as Surface Engineering Technology, Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials, Elsevier. (2020) 629–637.
- [27] **Vu V.H., Balanovskiy A.E., Doan V.T., Nguyen V.T.** Surface Saturation with Carbon Using Plasma Arc and Graphite Coating, Tribology in Industry. 43 (2) (2021) 211–221.
- [28] **Kumar A., Kumar A.D.** Evolution of microstructure and mechanical properties of Co-SiC tungsten inert gas cladded coating on 304 stainless steel, Engineering Science and Technology, an International Journal. 24 (3) (2021) 591–604.
- [29] **Kumar A., Kumar R.R., Kumar A.D.** Mechanical characteristics of Ti-SiC metal matrix composite coating on AISI 304 steel by gas tungsten arc (GTA) coating process, Materials Today: Proceedings. 1 (2019) 111–117.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НГУЕН Ван Чьеу — аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», без степени.
E-mail: vantrieu.xumuk@gmail.com

БАЛАНОВСКИЙ Андрей Евгеньевич — заведующий кафедрой, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», канд. техн. наук.
E-mail: fuco.64@mail.ru

НГУЕН Ван Винь — аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», без степени.
E-mail: nguyenvanvinh190596@gmail.com

REFERENCES

- [1] **N. Stepanova, A. Razumakov, Ye.A. Lozhkina**, Structure and mechanical properties of Cu–alloyed cast iron, Applied Mechanics and Materials. 682 (2014) 178–182.
- [2] **E.B. Ten, P.V. Petrovskiy, G.Ye. Ionova**, Osobennosti formirovaniya granits razdela komponentov v kompozitakh "Stal-Alyuminiy" i "Stal-Bronza" // Liteyshchik Rossii. 2017. № 7. S. 26–28.
- [3] **R.F. Zhang, X.F. Kong, H.T. Wang, S.H. Zhang, D. Legut, S.H. Sheng, S. Srinivasan, K. Rajan, T.C. Germann**, An informatics guided classification of miscible and immiscible binary alloy systems, Scientific reports. 7 (1) (2017) 9577.
- [4] **X. Dai, M. Xie, S. Zhou, C. Wang, J. Yang, Z. Li**, Formation and properties of a self-assembled Cu-Fe-Ni-Cr-Si immiscible composite by laser induction hybrid cladding, Journal of Alloys and Compounds. 742 (2018) 910–917.
- [5] **X. Dai, S. Zhou, M. Wang, J. Lei, M. Xie, H. Chen, C. Wang, T. Wang**, Microstructure evolution of phase separated Fe-Cu-Cr-C composite coatings by laser induction hybrid cladding, Surface and Coatings Technology. 324 (2017) 518–525.
- [6] **P. Das, S. Paul, P.P. Bandyopadhyay**, HVOF sprayed diamond reinforced nano-structured bronze coatings, Journal of Alloys and Compounds. 746 (2018) 361–369.

- [7] **S. Mushtaq, M. Wani, S. Saleem, S. Banday, M. Mir, J. Khan, J. Singh**, Tribological Characteristics of Fe-Cu-Sn Alloy with Molybdenum Disulfide as a Solid Lubricant under Dry Conditions, *SSRN Electronic Journal*. 7 (2018).
- [8] **E. Bączek, J. Konstanty, A. Romanski, M. Podsiadlo, J. Cyboron**, Processing and Characterization of Fe-Mn-Cu-Sn-C Alloys Prepared by Ball Milling and Spark Plasma Sintering, *Journal of Materials Engineering and Performance*. 27 (5) (2018).
- [9] **V. Mamedov**, Microstructure and mechanical properties of PM Fe-Cu-Sn alloys containing solid lubricants, *Powder Metallurgy*. 47 (2004) 173–179.
- [10] **A. Bachmaier, M. Kerber, D. Setman, R. Pippan**, The formation of supersaturated solid solutions in Fe-Cu alloys deformed by high-pressure torsion, *Acta Materialia*. 60 (3) (2012) 860–871.
- [11] **T.S. Ogneva, N.V. Martyshev, I. Altpeter, M.A. Surkov, A.O. Tokarev, T.M. Krutskaya**, Struktura i svoystva termicheski obrabotannykh sredneuglerodistykh staley, legirovannykh medyu // *Obrabotka metallov: tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty*. 2018. T. 20. №. 2. S. 130–143.
- [12] **M.V. Marusin, V.G. Shchukin, V.V. Marusin**, Poverkhnostnoye legirovaniye uglerodistoy stali medyu pri vysokoenergeticheskoy induktsionnoy obrabotke // *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2010. № 5. S. 67–70.
- [13] **Yu.A. Kolubayeva, Yu.F. Ivanov, A.D. Teresov**, Issledovaniye zakonomernostey elektronno-ionno-plazmennogo legirovaniya stali // *Perspektivnyye materialy*. 2011. № S13. S. 608–617.
- [14] **K.S. Tan, R.J.K. Wood, K.R. Stokes**, The slurry erosion behaviour of high velocity oxy-fuel (HVOF) sprayed aluminium bronze coatings, *Wear*. 255 (1–6) (2003) 195–205.
- [15] **R.W. Brian**, 17 – Mechanics of Abrasion and Wear, *Principles of Modern Grinding Technology* (Second Edition), William Andrew Publishing. (2014) 349–379.
- [16] **O.G. Devojno, E. Feldshtein, M.A. Kardapolava, N.I. Lutsko**, On the formation features, structure, microhardness and tribological behavior of single tracks and coating layers formed by laser cladding of Al-Fe powder bronze, *Surface and Coatings Technology*. 358 (2019) 195–206.
- [17] **W. Gamon, K. Aniolek**, Examination of the sliding wear of bronze coatings on railway buffer heads, *Wear*. 448–449 (2020), 203235.
- [18] **A. Aravind, R. Saravanan**, Improvement in hardness, wear rate and corrosion resistance of silicon bronze using gas tungsten arc, *Materials Today: Proceedings*. 24 (2) (2020) 406–414.
- [19] **Q.Y. Hou, T.T. Ding, Z.Y. Huang, P. Wang, L.M. Luo, Y.C. Wu**, Microstructure and properties of mixed Cu-Sn and Fe-based alloys without or with molybdenum addition processed by plasma transferred arc, *Surface and Coatings Technology*. 283 (2015) 184–193.
- [20] **P. Kucita, S.C. Wang, W.S. Li, R.B. Cook, M.J. Starink**, The effects of substrate dilution on the microstructure and wear resistance of PTA Cu-Al-Fe aluminium bronze coatings, *Wear*. 440–441 (2019) 203102.
- [21] **S. Nair, R. Sellamuthu, R. Saravanan**, Effect of Nickel content on hardness and wear rate of surface modified cast aluminum bronze alloy, *Materials Today: Proceedings*. 5 (2, 2) (2018) 6617–6625.
- [22] **D. Raju, A.R. Govindan, J. Subramanian, S. Ramachandran, S. Nair**, Surface alloying of aluminium bronze with chromium: Processing, testing, and characterization, *Materials Today: Proceedings*. 27 (3) (2020) 2191–2199.
- [23] **A. Aravind, R. Saravanan**, Improvement in hardness, wear rate and corrosion resistance of silicon bronze using gas tungsten arc, *Materials Today: Proceedings*. 24 (2) (2020) 406–414.
- [24] **A.E. Balanovskii, V.H. Vu**, Plasma surface carburizing with graphite paste, *Letter on materials*. 7 (2) (2017) 175–179.
- [25] **K.A. Bello, M.A. Maleque, A.A. Adebisi**, Processing of Ceramic Composite Coating via TIG Torch Welding Technique, *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*. 4 (2020) 523–535.
- [26] **M. Azwan, M.A. Maleque, M.M. Rahman**, TIG Torch Melting as Surface Engineering Technology, *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, Elsevier. (2020) 629–637.
- [27] **V.H. Vu, A.E. Balanovskiy, V.T. Doan, V.T. Nguyen**, Surface Saturation with Carbon Using Plasma Arc and Graphite Coating, *Tribology in Industry*. 43 (2) (2021) 211–221.

[28] **A. Kumar, A.D. Kumar**, Evolution of microstructure and mechanical properties of Co-SiC tungsten inert gas cladded coating on 304 stainless steel, *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 24 (3) (2021) 591–604.

[29] **A. Kumar, R.R. Kumar, A.D. Kumar**, Mechanical characteristics of Ti-SiC metal matrix composite coating on AISI 304 steel by gas tungsten arc (GTA) coating process, *Materials Today: Proceedings*. 1 (2019) 111–117.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Van T. NGUYEN – *Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Irkutsk National Research Technical University»*.

E-mail: vantrieu.xumuk@gmail.com

Andrey E. BALANOVSKIY – *Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Irkutsk National Research Technical University»*.

E-mail: fuco.64@mail.ru

Van V. NGUYEN – *Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Irkutsk National Research Technical University»*.

E-mail: nguyenvanvinh190596@gmail.com

Поступила: 14.10.2022; Одобрена: 19.11.2022; Принята: 24.11.2022.

Submitted: 14.10.2022; Approved: 19.11.2022; Accepted: 24.11.2022.

Научная статья

УДК 620.178.162: 539.53

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28408>



В. Нгуен , А.Е. Балановский, В. Нгуен

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический университет»,
Иркутск, Россия

 vantrieu.xumuk@gmail.com

ОЦЕНКА АБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ИЗ ПЛАЗМЕННОГО ОПЛАВЛЕНИЯ ОЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ И КАРБИДА ХРОМА

Аннотация. В данной работе представлены исследование характеристик и стойкости к абразивному износу поверхностных легированных слоев при плазменном нагреве смеси, содержащей оловянную бронзу и карбид хрома. Установлено, что в зависимости от состава смеси, толщины обмазки, режима обработки получаемые слои различаются по структуре, химическому и фазовому составу. Добавка карбида хрома с массовой долей 20 % позволяет повысить микротвердость легированного слоя на основе оловянной бронзы до 700 HV с формированием мартенситной структуры. Испытания на абразивный износ проводились при нагрузке 5, 20, 50 Н и при сонаправленном вращении держателя к абразивному кругу. Полученные результаты показали, что износостойкость легированных слоев Fe-Cu-Sn и Fe-Cr-C-Cu-Sn выше по сравнению со слоем Cu-Sn. В частности слой системы Fe-Cr-C-Cu-Sn слой наилучший.

Ключевые слова: абразивный износ, легированный слой, карбид хрома, оловянная бронза, микротвердость, износостойкость, поверхностное упрочнение.

Для цитирования:

Нгуен В., Балановский А.Е., Нгуен В. Оценка абразивной износостойкости поверхностных слоев из плазменного оплавления оловянной бронзы и карбида хрома // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 4. С. 123–135. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28408>



V. Nguyen ✉, A.E. Balanovskiy, V. Nguyen

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
«Irkutsk National Research Technical University»,
Irkutsk, Russia

✉ vantrieu.xumuk@gmail.com

ESTIMATION OF ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF PLASMA ALLOYED LAYERS BASED ON TIN BRONZE AND CHROMIUM CARBIDE

Abstract. This paper presents a study of the characteristics and resistance to abrasive wear of surface alloyed layers during plasma heating of a mixture containing tin bronze and chromium carbide. It was established that depending on the composition of the mixture, the thickness of the coating, the processing mode, the resulting layers differ in structure, chemical and phase composition. The addition of chromium carbide with a mass fraction of 20% makes it possible to increase the microhardness of the alloyed layer based on tin bronze up to 700 HV with the formation of a martensitic structure. Tests for abrasive wear were carried out at a load of 5, 20, 50 N and with codirectional rotation of the holder to the abrasive wheel. The obtained results showed that the wear resistance of the Fe-Cu-Sn and Fe-Cr-C-Cu-Sn alloyed layers is higher compared to the Cu-Sn layer. In particular, the Fe-Cr-C-Cu-Sn layer is the best option.

Keywords: abrasive wear, alloyed layer, chromium carbide, tin bronze, microhardness, wear resistance, surface hardening.

Citation:

V. Nguyen, A.E. Balanovskiy, V. Nguyen, Estimation of abrasive wear resistance of plasma alloyed layers based on tin bronze and chromium carbide, *Global Energy*, 28 (04) (2022) 123–135, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28408>

Введение. Поверхностное упрочнение стали легирующим слоем широко распространено в технологии машиностроения. Подход к легированию медью поверхности стали давно является одним решением для повышения антифрикционных свойств, коррозионной стойкости, биокоррозионной стойкости и других свойств [1–4]. Известно, что сплавы на основе меди Cu-X, где X – Fe, Cr, и другие, относятся к несмешивающейся бинарной системе, обладающей высокой механической прочностью, электропроводностью и магнетизмом (для Fe-Cu) и также высокими термическими характеристиками [2, 3, 4]. Сплав системы Fe-Cu является перспективной основой для создания материалов, сочетающих хорошую механическую прочность, износостойкость и коррозионную стойкость с высокой теплопроводностью и электропроводностью [5–8]. Тем не менее, несмешивающиеся сплавы Fe-Cu, полученные традиционными методами затвердевания, подвержены сегрегации микроструктуры, которая вызвана двумя жидкими расплавами с разной плотностью, что стало основным препятствием для ограничения применения несмешивающихся сплавов Fe-Cu в промышленности [9]. Применение материалов на основе Fe-Cu встречается в широком диапазоне приложений, от фрикционных материалов и высоковольтных скользящих контактов до устройств магнитоэлектроники и спинтроники [8, 10–12]. Комбинация меди и железа часто осуществляется в целях экономии при одновременном снижении стоимости меди и повышении твердости сплава за счет присутствия железа [1, 2, 13, 14].

В настоящее время, для улучшения свойств материалов в железную основу вводят не чистую медь, а сплавы на ее основе как например, бронзовый порошок. Комбинирование Fe, Cu и Sn было приведено в создании композитных сплавов системы Fe-Cu-Sn [14–18]. В различных трибологических применениях используются композиты из железа, меди и олова благодаря их высокой твердости, высокой прочности и умеренной износостойкости [16, 17]. В последние годы использование высококонцентрированных источников для поверхностного легирования конструкционных сталей все чаще осуществляется с многочисленными успешными результатами, в том числе электродуговой плазменный нагрев обеспечивает достаточное количество тепла с высокой эффективностью, коротким временем обработки [19, 20, 21]. Для улучшения свойств поверхностного упрочнения в ряде работ уже сообщалось о плазменном нагреве алюминиевой бронзы [22], смеси оловянной бронзы и сплава железа [23], лазерной наплавке несмешивающихся нанокомпозитов систем Cu-Fe-Cr-Si-C [24], Cu-Fe-Ni-Cr-Si [25], Cu-Ni-Fe-Mo-xCr [26]. Однако количество исследований по получению легированного слоя системы Fe-Cu-Sn пока невелико, а качество получаемых покрытий не соответствует ожидаемым требованиям, связанным с высокой твердостью, износостойкостью и т.д. Абразивный износ является одним из наиболее распространенных видов износа. Это происходит, когда более твердый материал трется о более мягкий. На практике абразивный и другой износ в основном вызывают механические повреждения металлических деталей машин, особенно движущихся частей. Исследования на износостойкость неоднократно проводились, но в основном только для покрытий и сплавов систем Fe-Cu-Sn [15], Fe-Cu [22], Cu-Sn [27], Cu-Sn-Cr [28]. Для легирования поверхности углеродистой стали предлагалось использовать покрытия системы Fe-Cr-C-Cu-Sn [20]. Суть его заключается в том, что в состав покрытий входят мягкие фазы системы Cu-Sn и твердые фазы системы Fe-Cr-C, в результате чего удастся повысить поверхностную твердость, износостойкость, но при этом обеспечивают сопротивление к трению как материалы из чистой бронзы.

Целью данной работы является оценка износостойкости поверхностных легированных слоев, полученных в плазменном нагреве обмазки, содержащей оловянную бронзу и карбид хрома. В работе представлены результаты исследований микроструктуры, измерения микротвердости, определения химического и фазового состава по поперечному сечению полученных слоев и их испытания на абразивное изнашивание.

Методы и материалы

Для легирования поверхности стали Ст3 в качестве основного сплава использовали оловянную бронзу ПРВ-БрО10 (Cu: 89 – 90 %; Sn: 9 – 11 %) с размером частиц менее 150 мкм, в качестве добавки карбид хрома с массовой долей 20 % и основным размером частиц 10 – 300 мкм, а в качестве связующего компонента силикатный клей. Приготовление обмазки смеси клея и порошка показано в работе [19]. Плазменное оплавление осуществлялось на сварочном аппарате Kempt PSS5000 с управлением аргонно-дуговой сваркой Oscillator TU50. Режим плазменной обработки для каждого состава показан в табл. 1.

После охлаждения на воздухе обработанные образцы вырезали на автоматическом станке P100A, затем прессовали акриловой смолой в форме круглого цилиндра на автоматическом прессе ПОЛИЛАБ С50А. После шлифовки, полировки и травления в 5 %-ной кислоте HNO_3 с добавлением этанола микроструктура исследуемых образцов изучали на микроскопе MET-2. Измерение микротвердости выполнено с помощью микротвердомера HNV-G21. Анализ химического состава поперечного сечения полученных слоев выполняется на микроскопе JIB-4500 с анализатором EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometer for Chemical Analysis). Фазовый состав полученных слоев изучали на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 с системой поликапиллярной оптики.

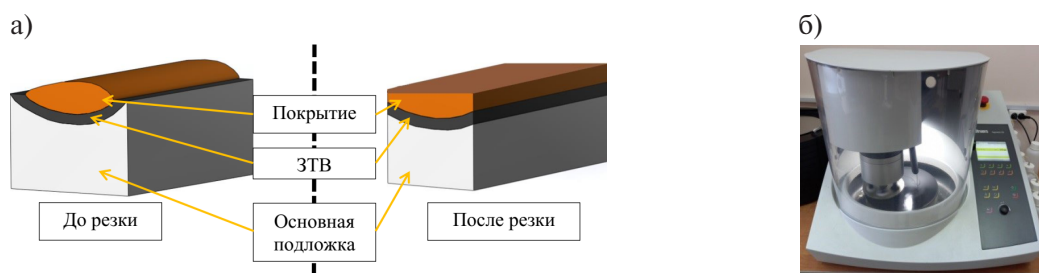


Рис. 1. Шлифовально-полировальный станок Struers Tegramin-25 для испытания изнашивания
Fig. 1. Grinding and polishing machine Struers Tegramin-25 for wear testing

Таблица 1

Режим плазменной обработки

Table 1

Plasma processing mode

№ образца	1	2	3
Состав	ПРВ-БрО10		ПРВ-БрО10 + 20 % карбида хрома
Толщина обмазки	1,00 мм		0,25 мм
Скорость обработки	2,7 мм/с		2,7 мм/с
Сила тока	100 А	140 А	140 А

Для проведения испытания изнашивания используется Шлифовально-полировальный станок Struers Tegramin-25 с управлением рабочего экрана, показанный на рис. 1. После плазменного нагрева и охлаждения, образец отрезали, чтобы получили их в виде параллелепипеда размерами $12 \times 5 \times 10$ мм (рис. 1, а). Для соответствия к держателю шлифовально-полировального станка Struers Tegramin-25, образец для испытаний прессовали акриловой смолой на автоматическом прессе Полилаб С50А. Контактная поверхность прессованного образца для испытаний состоит из рабочей поверхности покрытия, которая на 100 % контактирует с абразивом и остающейся поверхности, заполненной смолой. Износостойкость определяли для исследуемых образцов путем вращательных движений по поверхности шлифовальной бумаге на основе карбида кремния.

Результаты исследований и их обсуждение

Поперечное сечение с распределением микротвердости полученных слоев показано на рис. 2. При меньшей силе тока (100 А) и толстой слое обмазки (1 мм) поверхностный легированный слой состоит в основном из расплавленной оловянной бронзы с малой степенью разбавления подложки. Из рис. 2, а видно, что основная зона имеет микротвердость ниже 200 НV, тонкий насыщенный железом подслоя рядом с границей имеет толщину менее 30 мкм и максимальную микротвердость не выше 600 НV. Основная структура слоя системы Cu-Sn показана на рис. 2, б, как аналогичные результаты приведены в работах [27, 29] с основными фазами, включающими α -Cu, δ -Cu₄₁Sn₁₁. При силе тока 140 А и обмазке 0,50 мм образующийся слой не имеет расслоения, но имеется множество локальных зон, богатых оловянной бронзой с размером в несколько сотых микрометра. Видно, верхняя зона и нижняя зона рядом с границей имеют более высокое концентрирование значений микротвердости, чем у центральной зоны.

Наиболее качественным является слой, полученный после плазменного нагрева обмазки 0,25 мм смеси ПРВ-БрО10 + 20 % карбида хрома. Поперечное сечение полученного слоя показано на рис. 3, а. Отмечено, что основной структурой являются равноосные и столбчатые кри-

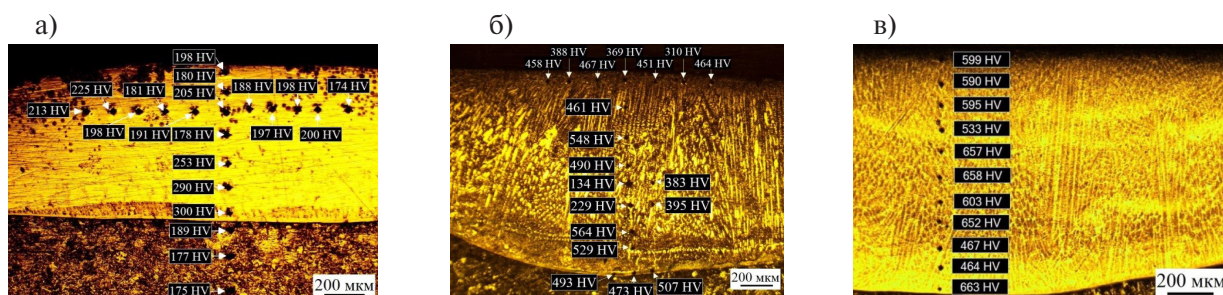


Рис. 2. Распределение микротвердости поверхностных слоев по глубине:
 а – $I = 100$ А, толщина обмазки «ПРВ-BrO10» 1 мм; б – $I = 140$ А, толщина обмазки «ПРВ-BrO10» 0,5 мм;
 в – $I = 140$ А, толщина обмазки «ПРВ-BrO10 + 20 % карбида хрома» 0,25 мм

Fig. 2. Depth distribution of microhardness of the surface layers:
 а – $I = 100$ А, thickness of pre-coating «PRV-BrO10» 1 mm;
 б – $I = 140$ А, thickness of pre-coating «PRV-BrO10» 0.5 mm;
 в – $I = 140$ А, thickness of pre-coating «PRV-BrO10 + 20 % chromium carbide» 0.25 mm

сталлические зерна. Значения микротвердости для центральной (рис. 3, б), граничной (рис. 3, в) и краевой (рис. 3, г) зон незначительно отличаются, которые находятся в пределе 500 – 700 HV. Химический состав некоторых точек легированного слоя системы Fe-Cu-Sn показан на рис. 3, а. Видно, что химический состав в основном характерен для трех основных зон: богатых медью; богатых железом и термического влияния. В точке 1 основными элементами являются олово и медь, т.е. оловянная бронза играет роль матрицы, а в точке 2 железо играет роль матрицы. Высокое содержание кислорода в точке 2 (5,12 %) можно отнести к силикатному связующему. Медь и олово в зоне термического влияния не обнаружены (точка 3). Это доказано из-за их очень ограниченной растворимости в железе при низких температурах. Для определения химического состава легированного слоя системы Fe-Cr-C-Cu-Sn был выбран образец на основе смеси оловянной бронзы и 20 % карбида хрома. Химический состав некоторых точек центральной зоны слоя показан на рис. 3, б. Растворимость железа в матрице меди для легированных слоев Fe-Cu-Sn, Fe-Cr-C-Cu-Sn незначительно отличается. Содержание хрома в зоне богатой оловянной бронзой (точка 3) значительно ниже, чем в зоне богатой железом (точки 1, 2). Склонность к образованию сложных карбидов может вызвать снижение растворимости хрома в бронзовой матрице. Результат рентгенофазового анализа показал, что основными фазами и структурами легированного слоя системы Fe-Cu-Sn являются твердый раствор углерода в α - и γ -Fe, твердый раствор меди с оловом α -Cu, ε -Cu, δ -Cu₄₁Sn₁₁ и β' -Cu_{13,7}Sn (рис. 4, а и б). По результатам рентгенофазового анализа установлено, что основными структурами и фазами легированного слоя системы Fe-Cr-C-Cu-Sn: твердый раствор углерода в α - и γ -Fe, мартенсит, эвтектический карбид (Fe₃C), твердый раствор меди с оловом α -Cu, карбида металлов M₂₃C₆ (рис. 4, в и г).

Стойкость поверхностных слоев в условиях изнашивания по закрепленному абразиву будет определяться от структуры легированного слоя, зоны термического влияния. Анализ литературных источников по испытаниям на изнашивания поверхностных слоев показал, что для достижения полного процесса изнашивания до зоны основного металла, будет наблюдаться несколько областей износа с разной интенсивностью. Состояние поверхности образца а следовательно и сопротивляемость абразивному износу будет изменяться по глубине упрочненного слоя в следующем порядке: легированный слой → легированный слой + зона термического влияния → зоны термического влияния + зона основного металла → зона основного металла.

В режимах испытаний постоянно применялись скорость абразивного круга – 100 об/мин и скорость держателя – 100 об/мин с изменением нагрузок (5, 20, 50 Н). Полученные результаты «удельная скорость изнашивания – время» показаны на рис. 8. Сначала, по каждому интервалам

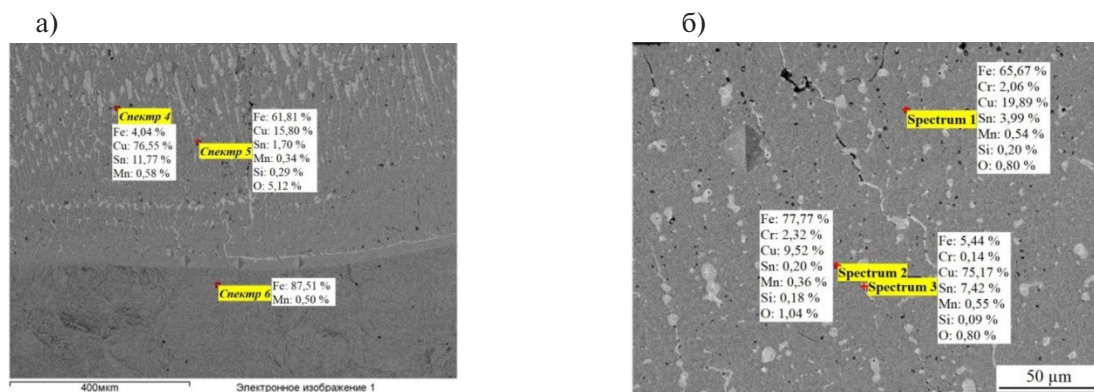


Рис. 3. Результат определения химического состава легированных слоев на основе обмазки:

а – ПРВ-БрО10; б – ПРВ-БрО10 + 20 % карбида хрома

Fig. 3. The result of determining the chemical composition of the alloyed layers based on the pre-coating:

а – PRV-BrO10; б – PRV-BrO10 + 20 % chromium carbide

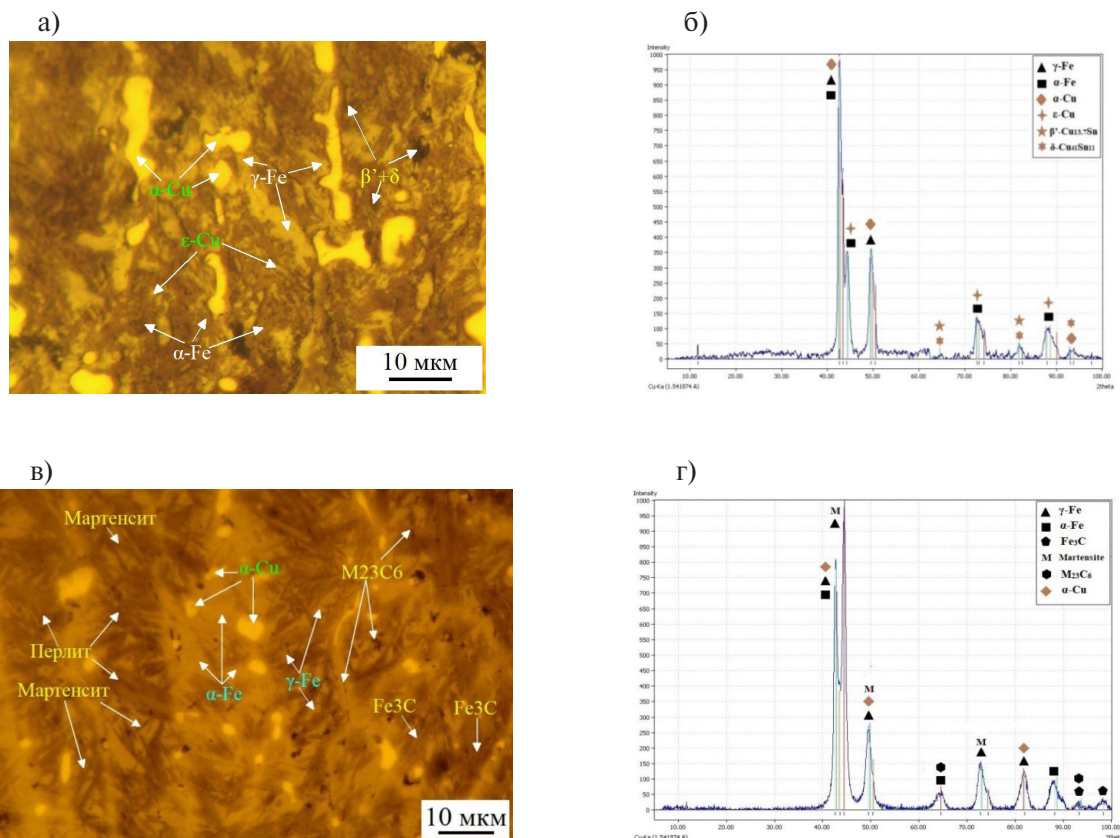


Рис. 4. Рентгенограммы легированных слоев на основе обмазки:

а, б – ПРВ-БрО10; в, г – ПРВ-БрО10 + 20 % карбида хрома

Fig. 4. X-ray patterns of doped layers based on the pre-coating:

а, б – PRV-BrO10; в, г – PRV-BrO10 + 20 % chromium carbide

времени под нагрузкой 5 Н скорость изнашивания для слоев систем Fe-Cu-Sn и Fe-Cr-C-Cu-Sn больше, чем для слоя Cu-Sn (рис. 8, а). Однако за 25 мин скорость изнашивания слоя оловянной бронзы Cu-Sn почти достигла скорости изнашивания слоя Fe-Cr-C-Cu-Sn. С увеличением на-

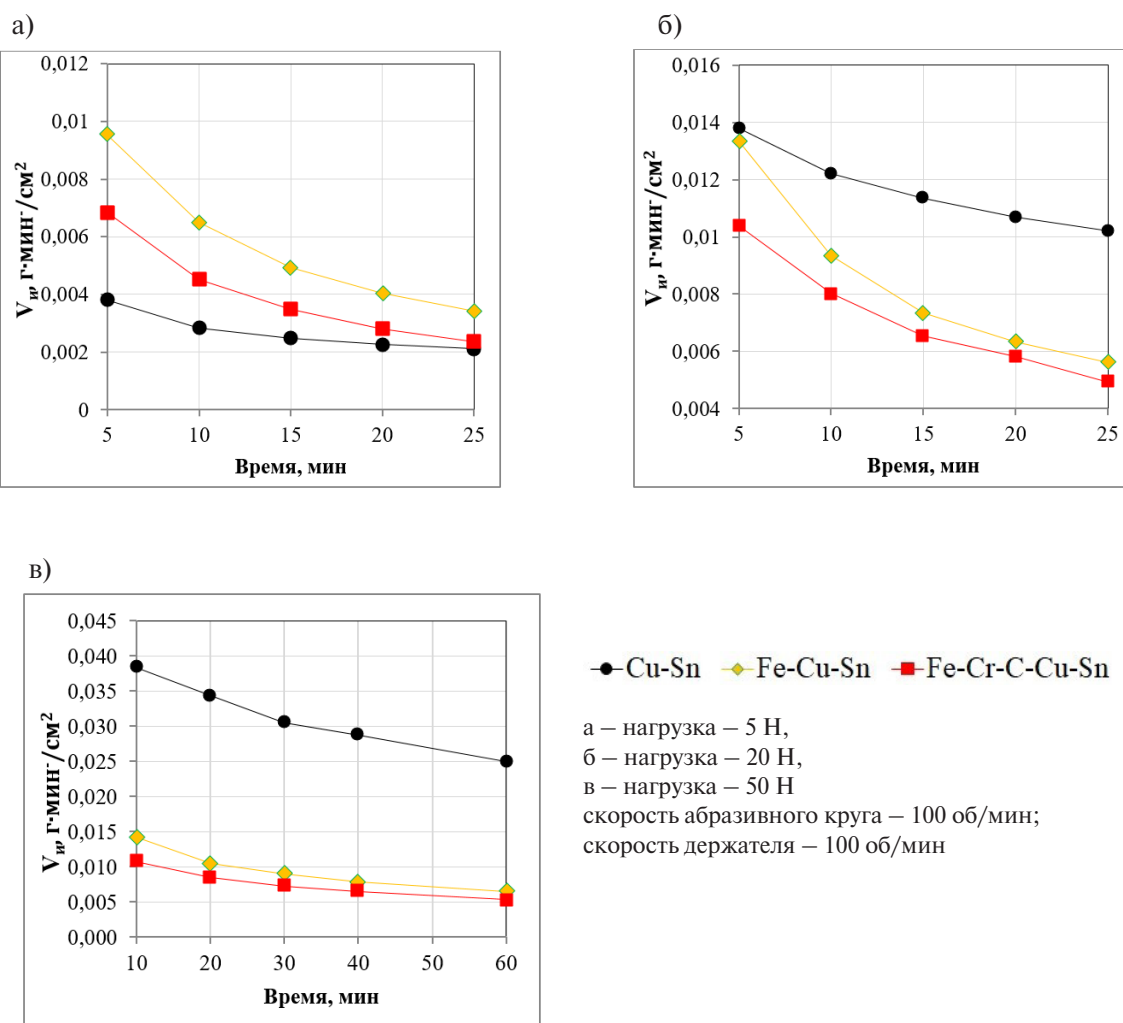


Рис. 5. Зависимость удельной скорости изнашивания (V_w) от времени при нагрузках: 5, 20, 50 Н на шкурке 6-Н с охлаждением водой

Fig. 5. Dependence of the specific wear rate (V_w) on time at loads: 5, 20, 50 N on a 6-N sandpaper with water cooling

грузки в 4 раза (20 Н), скорость изнашивания слоя Cu-Sn уже больше, чем у двух слоев Fe-Cu-Sn, Fe-Cr-C-Cu-Sn и она медленнее уменьшается с каждым интервалом времени. Это связано с высокой однородностью слоя Cu-Sn. Видно, что все легированные слои демонстрируют большую потерю массы, чем в случае нагрузки 5 Н, показанные на рис. 8, б. При первой серии экспериментов низкая износостойкость легированного слоя системы Fe-Cu-Sn может быть вызвана наличием трещин или случайных включений у верхней зоны.

Напротив, устойчивость слоя системы Fe-Cr-C-Cu-Sn к изнашиванию связана с наличием карбида хрома с более высокой твердостью. В тоже время, легированный слой системы Fe-Cr-C-Cu-Sn не только продолжает демонстрировать высокую износостойкость, но и сохраняет этот уровень с течением длительного времени, показывая кривую, которая продолжает изгибаться больше, чем другие слои. По мере увеличения времени испытаний кривизна кривой «удельная скорость изнашивания — время» увеличивается, т.е. указывает на то, что внутренние подслои поверхностного слоя значительно насыщены упрочняющим компонентом с высокой однородностью, и в них понижено количество дефектов. Это также согласуется со многими исследованиями, связанными как с проницаемостью и растворимостью меди в железе, так и с диффузией

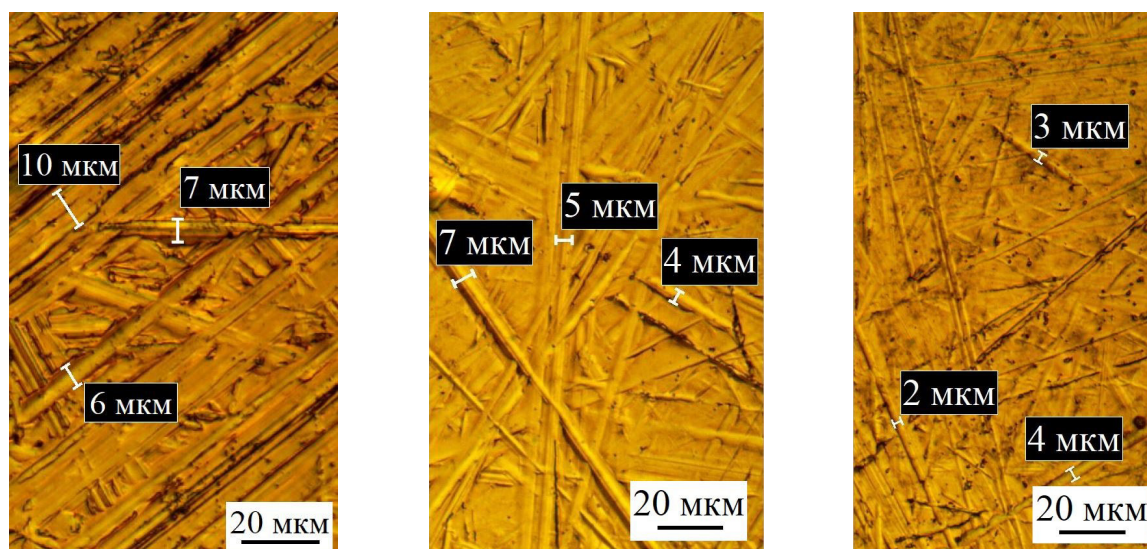


Рис. 6. Изношенная поверхность образцов после испытания при нагрузке 50 Н

Fig. 6. Worn surface of samples after testing under a load of 50 N

хрома в стали [30, 31]. Для испытания этих же образцов была увеличена нагрузка до 50 Н, а время между двумя измерениями составляет 10 минут. Полученные результаты приведены на рис. 8, в. Видно, что плазменные слои систем Fe-Cu-Sn, Fe-Cr-C-Cu-Sn продолжают демонстрировать хорошую износостойкость, причем лучшим из них является легированный слой системы Fe-Cr-C-Cu-Sn. Процесс изнашивания образца со слоем Cu-Sn быстрее добивается до зоны термического влияния и за 40 минут испытаний до основной зоны стали Ст3.

Обнаружено, что на поверхности изношенных зон наблюдаются следы микрорезания в виде четких царапин разной длины и глубины. Процессы микрорезания связаны с воздействием абразивных частиц на поверхность, что подтверждается следами микрорезания в виде бороздок и отвалов с острыми краями, ориентированными по направлению движения абразивных зерен. Взаимодействие абразивной частицы с поверхностью заключается в удалении металлических микросхем и выталкивании материала к краю образовавшейся риски под действием пластической деформации. Помимо глубоких царапин на поверхности легированного слоя системы Fe-Cu-Sn также наблюдается отслоение фрагментов слоя, что свидетельствует о низкой когезионной прочности, связанной с образованием оксидных прослоек на межламеллярных границах. Развитие механизма микрорезания свидетельствует о том, что твердость использованного абразива более чем в 1,3 раза превышает твердость структурных составляющих оплавленного слоя системы Fe-Cu-Sn.

После испытания под нагрузкой 50 Н, изношенная поверхность образцов приведены на рис. 6. Отмечено, что на поверхности слоя Cu-Sn наблюдается большее количество микрорезаний с шириной, чаще всего в диапазоне 6 – 10 мкм, а на поверхности слоя Fe-Cu-Sn – количество и ширина микрорезаний уменьшаются. На поверхности легированного слоя из оловянной бронзы микрорезания более широкие и глубокие, чем для легированного слоя Fe-Cr-C-Cu-Sn.

Выводы

Установлено, что поверхностные легированные слои систем Fe-Cu-Sn и Fe-Cr-C-Cu-Sn были получены при плазменном нагреве обмазки, содержащей оловянную бронзу и карбида хрома с применением мощности тока 140 А, скорости обработки 2,7 мм/с. Поверхностный легированный слой системы Cu-Sn был получен при низкой мощности тока (100 А) и толщине обмазки 1,00 мм.

Легированный слой системы Fe-Cr-C-Cu-Sn обладает более высокой однородностью и микротвердостью, находящейся в пределе 500 – 700 HV. Низкое концентрирование значений микротвердости слоев систем Cu-Sn, Fe-Cu-Sn вызвано ненасыщением дисперсионного затверждения между медью и железом. Установлено, что при формировании оплавленного слоя на поверхности конструкционной стали основными фазами и структурами легированного слоя системы Fe-Cu-Sn являются твердый раствор углерода в α и γ -Fe, твердый раствор меди с оловом α -Cu, ε -Cu, δ -Cu₄₁Sn₁₁ и β' -Cu_{13,7}Sn, а для легированного слоя системы Fe-Cr-C-Cu-Sn: твердый раствор углерода в α и γ -Fe, мартенсит, эвтектический карбид (Fe₃C), твердый раствор меди с оловом α -Cu, карбид M₂₃C₆. Химический и рентгенофазовый анализы показали, что наличие карбида хрома приводит к появлению мартенситной и перлитной структуры. Определено, что износостойкость покрытий увеличивается по ряду легированных слоев систем: Cu-Sn < Fe-Cu-Sn < Fe-Cr-C-Cu-Sn. Это соответствует с добавлением карбида хрома и увеличением твердости. В более высоком изнашивании наблюдаются глубокие и широкие борозды.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Guo F.A., Xiang C.J., Yang C.X., Cao X.M., Mu S.G., Tang Y.Q. Study of rare earth elements on the physical and mechanical properties of a Cu-Fe-P-Cr alloy, *Materials Science and Engineering B*. 147 (1) (2008) 1–6.
- [2] Derimov N., Abbaschian R. Liquid Phase Separation in High-Entropy Alloys—A Review, *Entropy*. 20 (11) (2018).
- [3] Lee J., Beach J., Bellon P., Averback R.S. High thermal coarsening resistance of irradiation-induced nanoprecipitates in Cu-Mo-Si alloys, *Acta Materialia*. 132 (2017) 432–443.
- [4] Zhang R.F., Kong X.F., Wang H.T., Zhang S.H., Legut D., Sheng S.H., Srinivasan S., Rajan K., Germann T.C. An informatics guided classification of miscible and immiscible binary alloy systems, *Scientific reports*. 7 (1) (2017).
- [5] Beloshenko V.A., Dmitrenko V.Y., Chishko V.V. Modifying the structure and properties of Cu-Fe composites by the methods of pressure formation, *Phys. Met. Metallogr.* 116 (2015) 456–466.
- [6] Kobayashi A., Nagayama K. Microstructure and Solidification Process of Fe-Cu Immiscible Alloy by Using Containerless Process, *Journal of the Japan Institute of Metals and Materials*. 81 (5) (2017) 251–256.
- [7] Kimura Y., Takaki S. Phase Transformation Mechanism of Fe-Cu Alloys, *ISIJ International*. 37 (3) (1997) 290–295.
- [8] Verhoeven J.D., Chueh S.C., Gibson E.D. Strength and conductivity of in situ Cu-Fe alloys, *J. Mater. Sci.* 24 (1989) 1748–1752.
- [9] Dai X., Zhou S., Wang M., Lei J., Xie M., Chen H., Wang C., Wang T. Microstructure evolution of phase separated Fe-Cu-Cr-C composite coatings by laser induction hybrid cladding, *Surface and Coatings Technology*. 324 (2017) 518–525.
- [10] Kana T., Zouhar M., Cerny M., Sob M. Ab initio study of the theoretical strength and magnetism of the Fe-Pd, Fe-Pt and Fe-Cu nanocomposites, *J. Magn. Magn. Mater.* 469 (2019) 100–107.
- [11] Ma L.C., Zhang J.M., Xu K.W. Magnetic and electronic properties of Fe/Cu multilayered nanowires: A first-principles investigation, *Phys. E Low-Dimens. Syst. Nanostruct.* 50 (2013) 1–5.
- [12] Wang X., Ru H. Effect of Lubricating Phase on Microstructure and Properties of Cu-Fe Friction Materials, *Materials*. 12 (2019).
- [13] Ma L.C., Zhang J.M., Xu K.W. Magnetic and electronic properties of Fe/Cu multilayered nanowires: A first-principles investigation, *Phys. E Low-Dimens. Syst. Nanostruct.* 50 (2013) 1–5.
- [14] Konoplianchenko I., Tarelnyk V., Martynkovskyy V., Belous A., Gerasimenko V., Smolyarov G., Tolbatov A., Tolbatov V., Chuprina M. Changing Cohesive Energy Between Atoms in Metalto-Metal Transition

Layer for Fe–Sn and Fe–Cu–Sn Compounds in the Course of Spark Alloying Process, Springer Proceedings in Physics. 240 (2020) 117–133.

[15] **Mushtaq S., Wani M.F.** High-temperature friction and wear studies of Fe-Cu-Sn alloy with graphite as solid lubricant under dry sliding conditions, Materials Research Express. 5 (2) (2018).

[16] **Vergne C., Boher C., Levaillant C., Gras R.** Analysis of the friction and wear behavior of hot work tool scale: application to the hot rolling process, Wear. 250 (1–12) (2001) 322–333.

[17] **Zhang J., Cui X., Ma J., Wang Y.** Study of high-strength and high-conductivity Cu–Sn–Fe alloys, Materials Science-Poland. 34 (1) (2016) 142–147.

[18] **Pardo A., Merino M.C., Carboneras M., Coy A.E., Arrabal R.** Pitting corrosion behaviour of austenitic stainless steels with Cu and Sn additions, Corros. Sci. 49 (2017) 510–525.

[19] **Vu V.H., Balanovskiy A.E., Doan V.T., Nguyen V.T.** Surface Saturation with Carbon Using Plasma Arc and Graphite Coating, Tribology in Industry. 43 (2) (2021) 211–221.

[20] **Nguyen V.T., Astafeva N.A., Balanovskiy A.E.** Study of the Formation of the Alloyed Surface Layer During Plasma Heating of Mixtures of Cu–Sn/CrxCy Alloys, Tribology in Industry. 43 (3) (2021) 386–396.

[21] **Kumar A., Kumar R.R., Kumar A.D.** Mechanical characteristics of Ti–SiC metal matrix composite coating on AISI 304 steel by gas tungsten arc (GTA) coating process, Materials Today: Proceedings. 1 (2019) 111–117.

[22] **Kucita P., Wang S.C., Li W.S., Cook R.B., Starink M.J.** The effects of substrate dilution on the microstructure and wear resistance of PTA Cu–Al–Fe aluminium bronze coatings, Wear. 440–441 (2019).

[23] **Hou Q.Y., Ding T.T., Huang Z.Y., Wang P., Luo L.M., Wu Y.C.** Microstructure and properties of mixed Cu–Sn and Fe-based alloys without or with molybdenum addition processed by plasma transferred arc, Surface and Coatings Technology. 283 (2015) 184–193.

[24] **Zhou S., Dai X., Xie M., Zhao S., Sercombe T.B.** Phase separation and properties of Cu–Fe–Cr–Si–C immiscible nanocomposite by laser induction hybrid cladding, Journal of Alloys and Compounds. 741 (2018) 482–488.

[25] **Dai X., Zhou S., Wang M., Lei J., Xie M., Chen H., Wang C., Wang T.** Microstructure evolution of phase separated Fe–Cu–Cr–C composite coatings by laser induction hybrid cladding, Surface and Coatings Technology. 324 (2017) 518–525.

[26] **Yang Y., Wang A., Xiong D., Wang Z., Zhou D., Li S., Zhang H.** Effect of Cr content on microstructure and oxidation resistance of laser-clad Cu–Ni–Fe–Mo–xCr alloy coating, Surface and Coatings Technology. 34 (2020).

[27] **Wang Q., Zhou R., Guan J., Wan C.** The deformation compatibility and recrystallisation behaviour of the alloy CuSn10P1, Materials Characterization. 174 (2021).

[28] **Sreenivasa R., Mallur S.B.** Sliding Wear Behavior of Cu + Sn + Cr Composites by Taguchi Technique, J Bio Tribo Corros. 7 (28) (2021).

[29] **Chen C., Xu Q., Sun K., Zhao J., Zhou J., Xue F.** Tin-bronze cladding on thin steel sheet by cold metal transfer arc deposition, Materials Science and Technology. 35 (2019) 1–4.

[30] **Zhang J.T., Cui X.C., Yang Y.T., Wang Y.H.** Solidification of the Cu–35 wt pct Fe alloys with liquid separation, Metall. Mater. Trans. A. 44 (2013) 5544–5548.

[31] **Zhou S.F., Lei J.B., Xiong Z., Dai X.Q., Guo J.B., Gu Z.J.** Synthesis of Fe_p/Cu–Cu_p/Fe duplex composite coatings by laser cladding, Mater. Des. 97 (2016) 431–436.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НГУЕН Ван Чьеу — аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», без степени.

E-mail: vantrieu.xumuk@gmail.com

БАЛАНОВСКИЙ Андрей Евгеньевич — заведующий кафедрой, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», канд. техн. наук.

E-mail: fuco.64@mail.ru

НГУЕН Ван Винь — аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», без степени.

E-mail: nguyenvanvinh190596@gmail.com

REFERENCES

- [1] **F.A. Guo, C.J. Xiang, C.X. Yang, X.M. Cao, S.G. Mu, Y.Q. Tang**, Study of rare earth elements on the physical and mechanical properties of a Cu–Fe–P–Cr alloy, *Materials Science and Engineering B*. 147 (1) (2008) 1–6.
- [2] **N. Derimow, R. Abbaschian**, Liquid Phase Separation in High-Entropy Alloys — A Review, *Entropy*. 20 (11) (2018).
- [3] **J. Lee, J. Beach, P. Bellon, R.S. Averbach**, High thermal coarsening resistance of irradiation-induced nanoprecipitates in Cu–Mo–Si alloys, *Acta Materialia*. 132 (2017) 432–443.
- [4] **R.F. Zhang, X.F. Kong, H.T. Wang, S.H. Zhang, D. Legut, S.H. Sheng, S. Srinivasan, K. Rajan, T.C. Germann**, An informatics guided classification of miscible and immiscible binary alloy systems, *Scientific reports*. 7 (1) (2017).
- [5] **V.A. Beloshenko, V.Y. Dmitrenko, V.V. Chishko**, Modifying the structure and properties of Cu–Fe composites by the methods of pressure formation, *Phys. Met. Metallogr.* 116 (2015) 456–466.
- [6] **A. Kobayashi, K. Nagayama**, Microstructure and Solidification Process of Fe–Cu Immiscible Alloy by Using Containerless Process, *Journal of the Japan Institute of Metals and Materials*. 81 (5) (2017) 251–256.
- [7] **Y. Kimura, S. Takaki**, Phase Transformation Mechanism of Fe–Cu Alloys, *ISIJ International*. 37 (3) (1997) 290–295.
- [8] **J.D. Verhoeven, S.C. Chueh, E.D. Gibson**, Strength and conductivity of in situ Cu–Fe alloys, *J. Mater. Sci.* 24 (1989) 1748–1752.
- [9] **X. Dai, S. Zhou, M. Wang, J. Lei, M. Xie, H. Chen, C. Wang, T. Wang**, Microstructure evolution of phase separated Fe–Cu–Cr–C composite coatings by laser induction hybrid cladding, *Surface and Coatings Technology*. 324 (2017) 518–525.
- [10] **T. Kana, M. Zouhar, M. Cerny, M. Sob**, Ab initio study of the theoretical strength and magnetism of the Fe–Pd, Fe–Pt and Fe–Cu nanocomposites, *J. Magn. Magn. Mater.* 469 (2019) 100–107.
- [11] **L.C. Ma, J.M. Zhang, K.W. Xu**, Magnetic and electronic properties of Fe/Cu multilayered nanowires: A first-principles investigation, *Phys. E Low-Dimens. Syst. Nanostruct.* 50 (2013) 1–5.
- [12] **X. Wang, H. Ru**, Effect of Lubricating Phase on Microstructure and Properties of Cu–Fe Friction Materials, *Materials*. 12 (2019).
- [13] **L.C. Ma, J.M. Zhang, K.W. Xu**, Magnetic and electronic properties of Fe/Cu multilayered nanowires: A first-principles investigation, *Phys. E Low-Dimens. Syst. Nanostruct.* 50 (2013) 1–5.
- [14] **I. Konoplianchenko, V. Tarelnyk, V. Martynkovskyy, A. Belous, V. Gerasimenko, G. Smolyarov, A. Tolbatov, V. Tolbatov, M. Chuprina**, Changing Cohesive Energy Between Atoms in Metalto-Metal Transition Layer for Fe–Sn and Fe–Cu–Sn Compounds in the Course of Spark Alloying Process, *Springer Proceedings in Physics*. 240 (2020) 117–133.
- [15] **S. Mushtaq, M.F. Wani**, High-temperature friction and wear studies of Fe–Cu–Sn alloy with graphite as solid lubricant under dry sliding conditions, *Materials Research Express*. 5(2) (2018).

- [16] C. Vergne, C. Boher, C. Levallant, R. Gras, Analysis of the friction and wear behavior of hot work tool scale: application to the hot rolling process, *Wear*. 250 (1–12) (2001) 322–333.
- [17] J. Zhang, X. Cui, J. Ma, Y. Wang, Study of high-strength and high-conductivity Cu–Sn–Fe alloys, *Materials Science-Poland*. 34 (1) (2016) 142–147.
- [18] A. Pardo, M.C. Merino, M. Carboneras, A.E. Coy, R. Arrabal, Pitting corrosion behaviour of austenitic stainless steels with Cu and Sn additions, *Corros. Sci.* 49 (2017) 510–525.
- [19] V.H. Vu, A.E. Balanovskiy, V.T. Doan, V.T. Nguyen, Surface Saturation with Carbon Using Plasma Arc and Graphite Coating, *Tribology in Industry*. 43 (2) (2021) 211–221.
- [20] V.T. Nguyen, N.A. Astafeva, A.E. Balanovskiy, Study of the Formation of the Alloyed Surface Layer During Plasma Heating of Mixtures of Cu–Sn/CrxCy Alloys, *Tribology in Industry*. 43 (3) (2021) 386–396.
- [21] A. Kumar, R.R. Kumar, A.D. Kumar, Mechanical characteristics of Ti–SiC metal matrix composite coating on AISI 304 steel by gas tungsten arc (GTA) coating process, *Materials Today: Proceedings*. 1 (2019) 111–117.
- [22] P. Kucita, S.C. Wang, W.S. Li, R.B. Cook, M.J. Starink, The effects of substrate dilution on the microstructure and wear resistance of PTA Cu–Al–Fe aluminium bronze coatings, *Wear*. 440–441 (2019).
- [23] Q.Y. Hou, T.T. Ding, Z.Y. Huang, P. Wang, L.M. Luo, Y.C. Wu, Microstructure and properties of mixed Cu–Sn and Fe-based alloys without or with molybdenum addition processed by plasma transferred arc, *Surface and Coatings Technology*. 283 (2015) 184–193.
- [24] S. Zhou, X. Dai, M. Xie, S. Zhao, T.B. Sercombe, Phase separation and properties of Cu–Fe–Cr–Si–C immiscible nanocomposite by laser induction hybrid cladding, *Journal of Alloys and Compounds*. 741 (2018) 482–488.
- [25] X. Dai, S. Zhou, M. Wang, J. Lei, M. Xie, H. Chen, C. Wang, T. Wang, Microstructure evolution of phase separated Fe–Cu–Cr–C composite coatings by laser induction hybrid cladding, *Surface and Coatings Technology*. 324 (2017) 518–525.
- [26] Y. Yang, A. Wang, D. Xiong, Z. Wang, D. Zhou, S. Li, H. Zhang, Effect of Cr content on microstructure and oxidation resistance of laser-clad Cu–Ni–Fe–Mo–xCr alloy coating, *Surface and Coatings Technology*. 34 (2020).
- [27] Q. Wang, R. Zhou, J. Guan, C. Wan, The deformation compatibility and recrystallisation behaviour of the alloy CuSn10P1, *Materials Characterization*. 174 (2021).
- [28] R. Sreenivasa, S.B. Mallur, Sliding Wear Behavior of Cu + Sn + Cr Composites by Taguchi Technique, *J Bio Tribo Corros*. 7 (28) (2021).
- [29] C. Chen, Q. Xu, K. Sun, J. Zhao, J. Zhou, F. Xue, Tin-bronze cladding on thin steel sheet by cold metal transfer arc deposition, *Materials Science and Technology*. 35 (2019) 1–4.
- [30] J.T. Zhang, X.C. Cui, Y.T. Yang, Y.H. Wang, Solidification of the Cu–35 wt pct Fe alloys with liquid separation, *Metall. Mater. Trans. A*. 44 (2013) 5544–5548.
- [31] S.F. Zhou, J.B. Lei, Z. Xiong, X.Q. Dai, J.B. Guo, Z.J. Gu, Synthesis of Fe_p/Cu–Cu_p/Fe duplex composite coatings by laser cladding, *Mater. Des.* 97 (2016) 431–436.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Van T. NGUYEN – *Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Irkutsk National Research Technical University».*
E-mail: vantrieu.xumuk@gmail.com

Andrey E. BALANOVSKIY – *Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Irkutsk National Research Technical University».*
E-mail: fuco.64@mail.ru

Van V. NGUYEN – *Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Irkutsk National Research Technical University».*

E-mail: nguyenvanvinh190596@gmail.com

Поступила: 07.11.2022; Одобрена: 19.11.2022; Принята: 24.11.2022.

Submitted: 07.11.2022; Approved: 19.11.2022; Accepted: 24.11.2022.

Научная статья

УДК 62-45

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28409>



А.В. Рыженков, А.В. Волков, Е.С. Трушин , С.П. Черепанов

Национальный исследовательский университет "МЭИ",
Москва, Россия

 TrushinYS@mpei.ru

ИЗМЕНЕНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОГО ТЕКСТУРИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА

Аннотация. Использование гидрофобных металлических поверхностей в теплоэнергетическом оборудовании позволяет снизить гидравлическое сопротивление и скорость образования отложений при транспортировке жидких сред, интенсифицировать теплообменные процессы. Для достижения гидрофобного состояния на поверхности необходимо создать микрошероховатость в виде многомодального рельефа и снизить поверхностную энергию. Одним из наиболее перспективных способов создания структурированного рельефа является лазерная модификация поверхности (лазерная абляция). В работе представлены результаты исследования по определению влияния плотности энергии лазерного излучения на геометрические характеристики формируемого рельефа и свойства смачиваемости поверхности нержавеющей стали марки AISI 304. Выявлено, что за счет формирования структурированного рельефа с последующим снижением поверхностной энергии за счет использования поверхностно-активного вещества, возможно достижение угла смачивания $149,6^\circ$ при плотности энергии лазерного излучения 200 Дж/см^2 .

Ключевые слова: энергоэффективность, гидрофобность, угол смачивания, лазерное излучение, рельеф.

Благодарности: Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России по заданию № FSWF-2020-0021 «Разработка научно-технических основ интенсификации теплообмена при конденсации и повышения термогидродинамических характеристик и износостойкости энергетического оборудования на основе модификации функциональных поверхностей».

Для цитирования:

Рыженков А.В., Волков А.В., Трушин Е.С., Черепанов С.П. Изменение смачиваемости поверхности нержавеющей стали на основе лазерного текстурирования рельефа // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 4. С. 136–146. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28409>



A.V. Ryzhenkov, A.V. Volkov, E.S. Trushin ✉, S.P. Cherepanov

National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
Moscow, Russia

✉ TrushinYS@mpei.ru

CHANGE OF WETTABILITY OF STAINLESS STEEL SURFACE BASED ON LASER TEXTURING OF RELIEF

Abstract. The use of hydrophobic metal surfaces in heat and power equipment makes it possible to reduce hydraulic resistance and the rate of formation of deposits during transportation of liquid media, to intensify heat exchange processes. To achieve the hydrophobic state on the surface it is necessary to create a micro-roughness in the form of a multimodal relief and to reduce the surface energy. One of the most promising ways to create structured relief is laser modification of the surface (laser ablation). The paper presents the results of studies to determine the influence of laser energy density on the geometric characteristics of the formed relief and wettability properties of the surface of stainless steel grade AISI 304. It was found that by forming a structured relief with a subsequent decrease in surface energy using a surface-active substance, it is possible to achieve an angle of wetting of 149.6° at the energy density of laser radiation of 200 J/cm^2 .

Keywords: energy efficiency, hydrophobicity, wetting angle, laser radiation, relief.

Acknowledgements: The results were obtained as part of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation Task No. FSWF-2020-0021 "Development of scientific and technical foundations for intensifying heat transfer during condensation and improving the thermos-hydrodynamic characteristics and wear resistance of power equipment based on the modification of functional surfaces".

Citation:

A.V. Ryzhenkov, A.V. Volkov, E.S. Trushin, S.P. Cherepanov, Change of wettability of stainless steel surface based on laser texturing of relief, *Global Energy*, 28 (04) (2022) 136–146, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28409>

Введение. Одним из наиболее распространенных материалов при изготовлении различного теплообменного оборудования являются коррозионностойкие стали. Например, нержавеющая сталь марки AISI 304 широко используется при изготовлении поверхностей теплообмена в пластинчатых теплообменных аппаратах, используемых в системах теплоснабжения, в трубчатых теплообменных аппаратах, применяемых в пищевой и химической промышленности, в качестве перспективного материала при модернизации или при изготовлении новых конденсаторов атомных электрических станций [1, 2].

В настоящее время активно развиваются способы модификации металлических поверхностей с целью достижения гидрофобного состояния. Данные поверхности обладают рядом уникальных свойств, такими как эффект самоочистения, повышенная коррозионная стойкость, а также снижение гидравлического сопротивления при транспортировке жидких сред и интенсификация теплообменных процессов при их использовании в различных областях энергетики и промышленности [3]. Так, применение гидрофобных теплообменных поверхностей может повысить эффективность различного теплообменного оборудования.

Известно, что для обеспечения гидрофобного режима смачивания на поверхности должна быть создана шероховатость с последующим снижением поверхностной энергии [4–6]. Суще-

существует множество способов создания на поверхности конструкционных материалов упорядоченного многомодального рельефа, среди которых наиболее распространены: плазменное нанесение покрытий [7], химическое и физическое осаждение покрытий [8], формирующее требуемую структуру поверхности, механическая модификация поверхности [9]. Однако, перечисленные способы достаточно сложно реализуемы, энергозатратны и дороги.

Одним из перспективных способов создания на металлической поверхности мультимодального рельефа является её модификация с использованием лазерного излучения. При лазерной модификации поверхности возможно с высокой точностью обеспечивать требуемые геометрические параметры создаваемого рельефа, что в свою очередь позволяет добиться высоких значений угла смачивания.

Целью исследования является оценка возможности достижения гидрофобных свойств поверхности нержавеющей стали марки AISI 304 путем создания мультимодального рельефа с использованием лазерного комплекса и последующим снижением поверхностной энергии с применением поверхностно-активного вещества.

Методы и материалы

Существуют различные типы лазерного оборудования с различными длительностями импульсов, однако среди них можно выделить две основные группы, как наиболее распространенные и эффективные при обработке металлических поверхности с целью создания разномасштабного рельефа: фемтосекундные и наносекундные лазеры. Механизмы абляции аналогичны для нано- и фемтосекундных лазерных импульсов [10–12]:

- разрушение материала с последующим возникновением дефектов, вызванных напряжениями растяжения;
- фрагментация (распад гомогенного материала на части (фрагменты) под действием высоких сил напряжения);
- испарение или взрывное кипение (при высокой интенсивности лазерного излучения).

В результате воздействия лазерного излучения происходит быстрый нагрев приповерхностного слоя материала, после чего начинается процесс взрывного кипения, при котором перегретая метастабильная жидкость претерпевает взрывной фазовый переход в устойчивое двухфазное состояние из-за массивного гомогенного зарождения пузырьков пара.

После разрушения материала начинается процесс фрагментации, вследствие чего возникает пространственно-неоднородные деформации, вызванные уменьшением величины термоэластических напряжений. Из-за неоднородных деформаций гомогенная жидкость (расплавленный металл) превращается в скопление отдельных элементов.

Процесс испарения представляет собой не термический процесс перехода вещества в газообразное состояние, а скорее процесс разрушения твердого вещества вследствие поглощения энергии, значительно превышающей энергию межатомной связи [13]. Таким образом, происходит диссоциация поверхностного слоя материала: плотные макроскопические частицы разъединяются, формируя облако газообразных частиц [14].

Согласно экспериментальным исследованиям, результаты которых представлены в работе [15], порог абляции для нержавеющей стали составляет 0,29 Дж/см² для начала разрушения материала и 0,55 Дж/см² для механизма фрагментации. При этом значение порога абляции зависит не только от типа материала, но и от длительности лазерного импульса.

На рис. 1 представлено изображение металлической поверхности, обработанной наносекундным лазерным комплексом FMark NS-FB-20 при различной плотности энергии излучения: ниже порога абляции, при значениях, близких к порогу абляции, и выше порога абляции. При значениях плотности энергии излучения ниже порога абляции на обработанной поверхности присутствуют следы плавления, вызванного локальным нагревом верхнего слоя материала лазерными

импульсами, однако следы испарения и взрывного кипения отсутствуют (см. рис. 1а). В результате целевая поверхность подвергается плавлению и рекристаллизации без удаления верхнего слоя и разлёта разномасштабных частиц материала по поверхности. При увеличении плотности энергии до значения, близкого к порогу абляции, появляются характерные следы плавления металла и отдельные разномасштабные частицы в виде капель, расположенные по краям области воздействия лазерного импульса (см. рис. 1б). Дальнейшее увеличение плотности энергии излучения приводит к разбросу разномасштабных капель испарившегося металла и образованию характерных для процесса лазерной абляции структур из коалесцировавших полостей перегретого металла (см. рис. 1в).

Таким образом, используемый в настоящей работе наносекундный лазерный комплекс FMark-20 NS-FB позволяет формировать разномасштабный рельеф путем инициации механизмов лазерной абляции металлической поверхности. На основе вышесказанного, возможно сделать вывод, что характеристики рельефа, формируемого посредством лазерной абляции, зависят от свойств материала и плотности энергии лазерного излучения, значение которой должно быть выше порога абляции.

Экспериментальные образцы для проведения исследований по изменению степени смачиваемости изготавливались из нержавеющей стали марки AISI 304 (аналог 08X18H10) в виде пластин размером 2×3,5 см и толщиной 1 мм.

После изготовления поверхность пластин очищалась с использованием этилового спирта и последующей промывкой дистиллированной водой для удаления остатков растворителя.

На поверхности образцов (с использованием наносекундного лазера) формировался рельеф в виде параллельных канавок с межосевым расстоянием 100 мкм. Для определения влияния параметров лазерного излучения на степень смачиваемости, плотность энергии излучения варьировалась в диапазоне от 5 до 600 Дж/см².

Формирование молекулярных слоев поверхностно-активного вещества на металлических поверхностях с текстурированным рельефом, созданным путем воздействия лазерного излучения, позволяет снизить величину поверхностной энергии на границе раздела фаз "твёрдое тело — газ" до значения меньшего, чем на границе раздела фаз "твёрдое тело — жидкость". Результатом достижения описанного неравенства поверхностных энергий является обеспечение устойчивого гидрофобного состояния поверхностей в условиях промышленного применения.

Одним из наиболее популярных поверхностно-активных веществ, используемого в различных сферах промышленности с целью формирования молекулярных слоев на поверхностях различных конструкционных материалов, является поверхностно-активное вещество из класса пленкообразующих алифатических аминов с длиной углеводородного радикала C₁₆—C₂₀, в частности, октадециламин (ОДА) [16]. При ориентированной сорбции молекул ОДА на металлической поверхности осуществляется формирование так называемого частокола Лэнгмюра, характеризующегося гидрофобными свойствами, в результате чего происходит снижение поверхностной энергии [17].

Результаты и их обсуждение

После текстурирования на стальных поверхностях многомодального рельефа с использованием лазерного комплекса выполнено исследование топографии поверхностей и шлифов экспериментальных образцов. В табл. 1 представлены изображения модифицированных поверхностей при различной плотности энергии излучения, полученные с использованием электронного микроскопа.

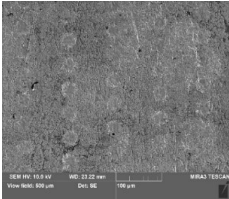
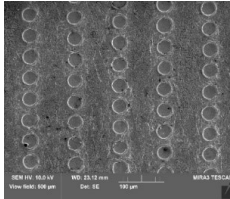
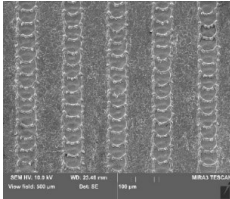
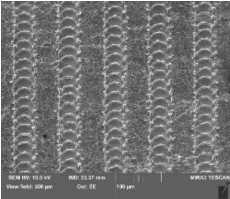
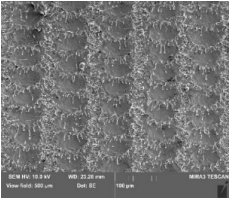
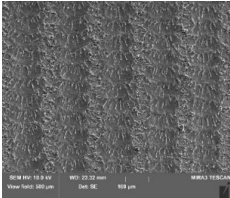
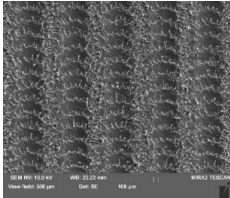
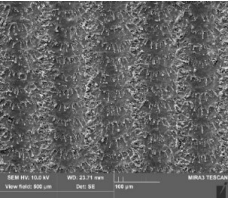
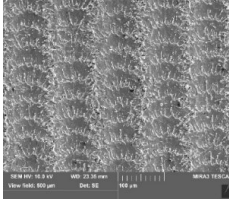
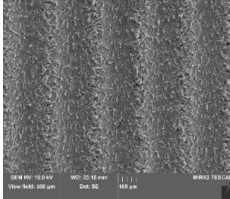
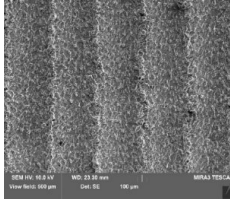
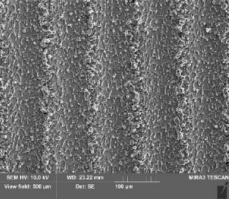
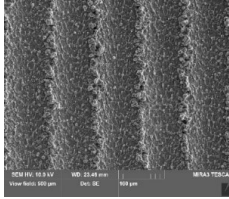
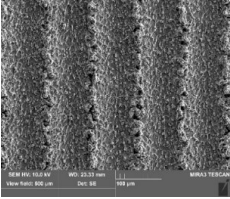
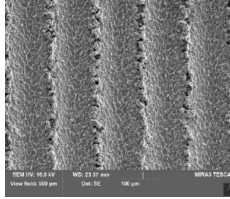
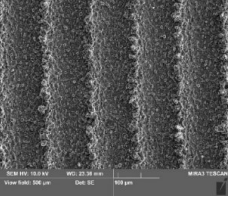
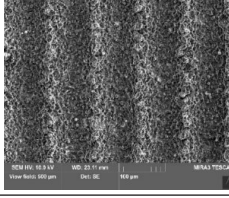
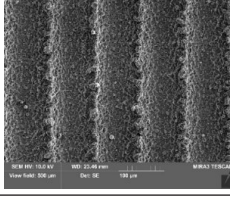
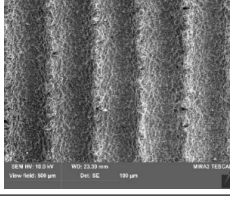
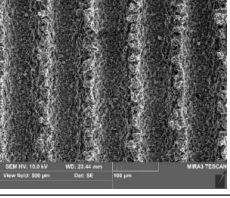
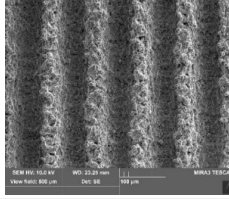
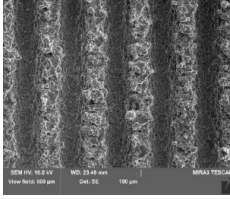
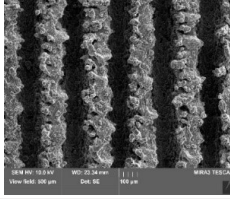
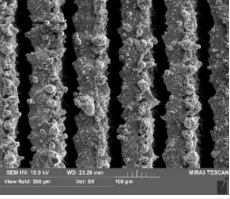
Из анализа изображений, представленных в табл. 1 видно, что изменение параметров лазерного излучения влияет на геометрические характеристики формируемого рельефа.

Таблица 1

Изображения модифицированных стальных поверхностей
при различной плотности энергии лазерного излучения

Table 1

Images of modified steel surfaces at different densities of laser energy

Плотность энергии лазерного излучения, Дж/см²			
5	10	15	20
			
25	30	35	40
			
50	75	100	110
			
120	130	140	150
			
200	250	300	350
			
400	450	500	600
			

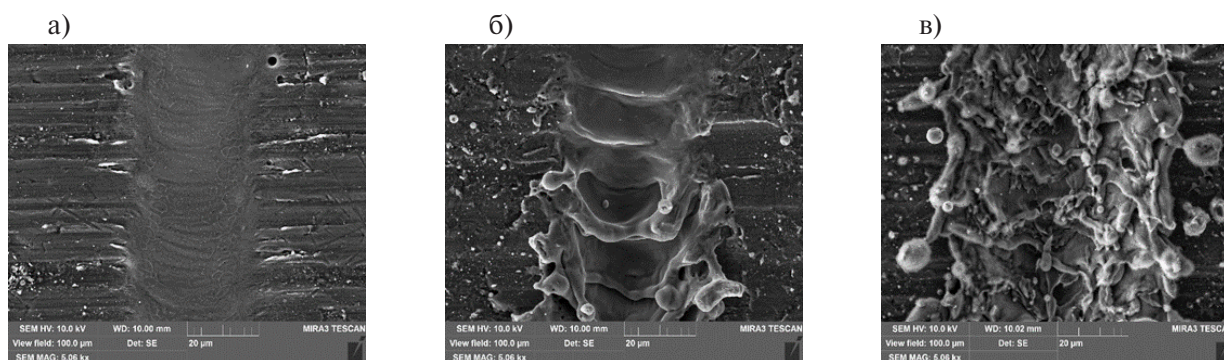


Рис. 1. Изображение металлической поверхности после обработки наносекундным лазером при плотности энергии излучения ниже порога абляции (а), близкой к порогу абляции (б) и выше порога абляции (в)

Fig. 1. Image of a metal surface after treatment with a nanosecond laser at energy densities below the ablation threshold (a), close to the ablation threshold (b), and above the ablation threshold (c)

При этом с повышением значения плотности энергии излучения рельеф становится более выраженный, вплоть до перекрытия канавок фрагментами металла, образовавшимися в результате абляции. На рис. 2 приведен характерный вид сформированного на поверхности нержавеющей стали рельефа, и упрощенная геометрическая модель полученного рельефа. Основными геометрическими характеристиками сформированного рельефа являются: ширина выступа, сформированного вследствие наплыва расплавленного металла (*a*), ширина между выступами (*b*), глубина канавки, образованной в результате воздействия лазерного излучения (*h*). В табл. 2 приведены измеренные геометрические параметры рельефа и плотность энергии излучения, при которой рельеф был сформирован.

Определение значения угла смачивания поверхностей экспериментальных образцов осуществлялось с применением автоматического оптического анализатора ОСА 20 и проводилось следующим образом:

- на модифицированной поверхности экспериментального образца размещались три капли дистиллированной воды объемом 5 мкл;
- определялся угол смачивания для каждой капли;
- на основании проведенных измерений рассчитывалось среднее значение угла смачивания поверхности.

Необходимо отметить, что исходная стальная поверхность проявляет гидрофильные свойства, а значение угла смачивания составляет $85,4^\circ$.

В результате воздействия лазерного излучения и обработки стальных образцов поверхностно-активным веществом получены как гидрофобные, так и гидрофильные поверхности. При этом проявление гидрофильных свойств наблюдается для образцов, модифицированных при плотности энергии лазерного излучения до 100 Дж/см^2 . Такой эффект объясняется тем, что при воздействии лазерного излучения при указанных значениях плотности энергии происходит изменение электрического потенциала обрабатываемой поверхности в «положительную» сторону. Вследствие этого молекулы поверхностно-активного вещества сорбируются на модифицированную поверхность экспериментальных образцов таким образом, что углеводородные радикалы, проявляющие гидрофобные свойства, обращены к поверхности металла, а гидрофильная полярная группа, имеющая положительный заряд, отталкивается от поверхности.

Для экспериментальных образцов, подвергнутым обработке при плотности энергии лазерного излучения более 100 Дж/см^2 , наблюдается достижение гидрофобного состояния, при этом значения угла смачивания составляют более $112,6^\circ$, а максимальное значение $149,6^\circ$ получено при плотности энергии 200 Дж/см^2 . Внешний вид капли дистиллированной воды на модифи-

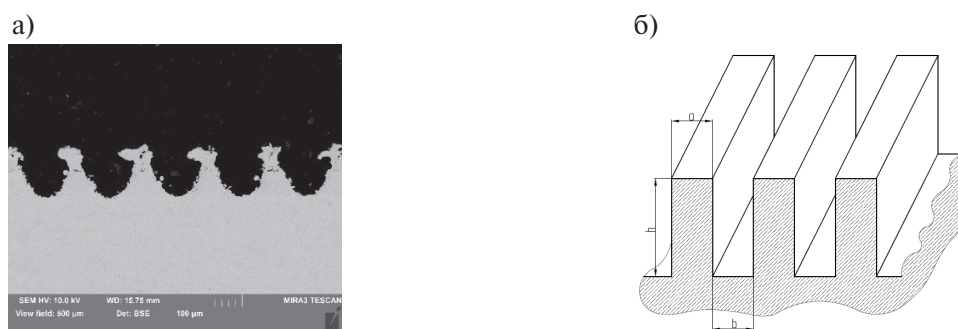


Рис. 2. Характерный внешний вид (а) и упрощенная геометрическая модель (б) сформированного на поверхности экспериментальных образцов из нержавеющей стали рельефа

Fig. 2. Characteristic appearance (a) and a simplified geometric model (b) of the relief formed on the surface of the experimental stainless steel samples

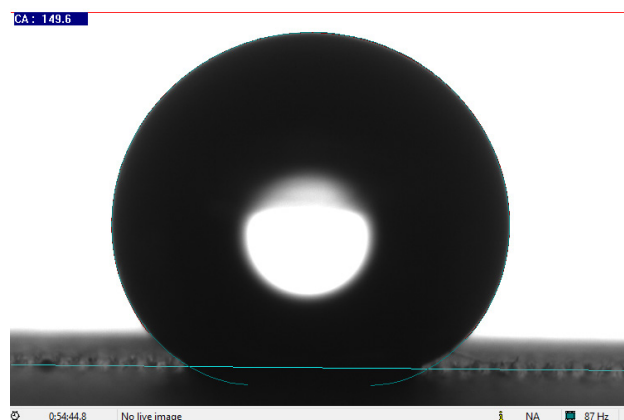


Рис. 3. Внешний капли дистиллированной воды, размещенной на гидрофобной поверхности экспериментального образца с углом смачивания 149,6°

Fig. 3. External drop of distilled water placed on the hydrophobic surface of the experimental sample with a wetting angle of 149,6°

Таблица 2

Геометрические параметры текстурированного рельефа
и плотность энергии лазерного излучения, при которой рельеф сформирован

Table 2

Geometric parameters of the textured relief
and the density of laser curing energy at which the relief is formed

q, Дж/см ²	5	10	15	20	25	30	35	40	50	75	100	110
a, мкм	—	63,7	56,3	54,9	41,3	36,8	34,1	34,6	26,6	31,6	27,3	18,0
b, мкм	—	32,5	42,3	43,5	59,7	60,5	61,5	58,9	75,5	65,5	70,3	80,1
h, мкм	—	2,3	3,7	4,5	4,0	6,4	6,3	6,7	8,2	9,8	13,5	19,3
q, Дж/см ²	120	130	140	150	200	250	300	350	400	450	500	600
a, мкм	26,8	24,5	21,1	13,9	14,1	13,7	18,8	14,9	22,2	30,6	23,9	30,3
b, мкм	68,9	71,9	77,2	82,2	86,3	85,4	77,7	84,1	77,7	64,8	67,9	68,9
h, мкм	19,7	21,7	21,3	29,1	35,1	37,7	58,0	47,6	67,8	74,6	77,5	101,4

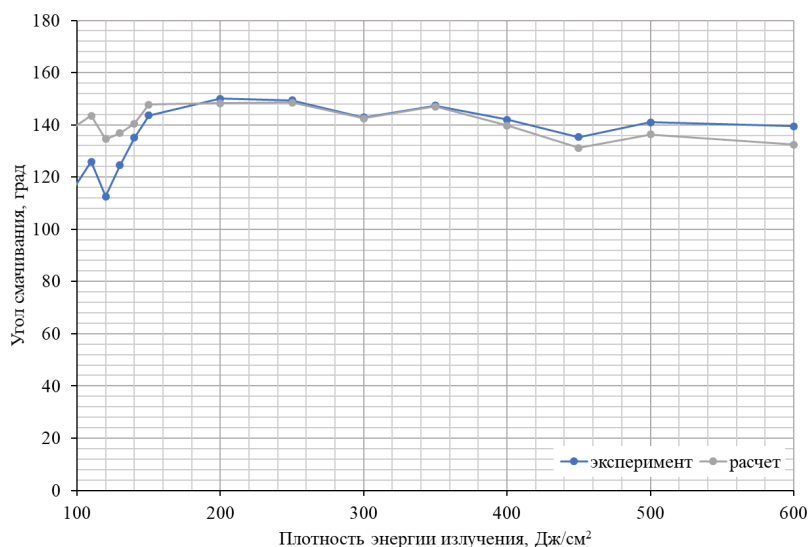


Рис. 4. Кривые значений угла смачивания, полученные расчетным и экспериментальным способом

Fig. 4. Wetting angle curves obtained by calculation and experiment

цированной при плотности энергии лазерного излучения 200 Дж/см² поверхности представлен на рис. 3.

Также определено, что на гидрофобных поверхностях наблюдается гетерогенный режим смачивания, при котором капля жидкости смачивает только вершины рельефа поверхности, а во впадинах и порах рельефа находится воздух. При таком режиме смачивания угол смачивания возможно определить расчётно по уравнению Касси-Бакстера (1):

$$\cos \theta = f \cos \theta_0 + f - 1, \quad (1)$$

где $f = S_{\text{тж}}/S$ — доля смачиваемых участков поверхности, определяемая отношением смоченной $S_{\text{тж}}$ к фактической S площади поверхности.

В соответствии с геометрической моделью сформированного рельефа (см. рис. 2б) для определения теоретического значения угла смачивания получено следующее соотношение (2):

$$\cos \theta = \frac{a}{a+b} (\cos \theta_0 + 1) - 1, \quad (2)$$

Используя уравнение (2), был осуществлен расчет значений угла смачивания с использованием геометрических характеристик текстурированного на гидрофобных поверхностях рельефа, представленных в табл. 2 На рис. 4 представлен график с теоретической и экспериментальной кривыми.

Из рис. 4 видно, что определенные экспериментально значения угла смачивания с достаточной точностью соответствуют рассчитанным по уравнению (2). Таким образом возможно использовать полученное соотношение для прогнозирования смачиваемости поверхности нержавеющей стали.

Выводы

Показано, что использование ОДА для снижения поверхностной энергии модифицированной с использованием лазерного излучения поверхности обеспечивает устойчивое гидрофобное

состояние с высокими значениями угла смачивания. При этом стоит отметить, что для стальных образцов марки AISI 304 (аналог 08X18H10), модифицированных при плотности энергии лазерного излучения до 100 Дж/см², характерно проявление гидрофильных свойств.

Для экспериментальных образцов, подвергнутым обработке при плотности энергии лазерного излучения более 100 Дж/см², наблюдается достижение гидрофобного состояния, при этом значения угла смачивания составляют более 112,6°, а максимальное значение 149,6° получено при плотности энергии 200 Дж/см².

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Kumar A., Sharma R., Kumar S., Verma P.** A review on machining performance of AISI 304 steel // *Materials Today: Proceedings*, Vol. 56, 2022. Pp. 2945–2951.
- [2] **Kant R., Mittal R., Kumar C., Rana B.S., Kumar M., Kumar R.** Fabrication and Characterization of Weldments AISI 304 and AISI 316 Used in Industrial Applications // *Materials Today: Proceedings*, 2018, Vol. 5, pp. 18475–18481.
- [3] **Ryzhenkov O.V., Kurshakov A.V., Ryzhenkov A.V., Dasaev M.R., Grigoriev S.V.** On intensification of heat exchange in steam condensers made of stainless steel and brass. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019. Vol. 8. Pp. 2290–2294.
- [4] **Balraj Krishnan Tudu, Aditya Kumar, Bharat Bhushan.** Facile approach to develop anti-corrosive superhydrophobic aluminium with high mechanical, chemical and thermal durability; *Philosophical transactions of the royal society a mathematical, physical and engineering sciences* 377, 2018.
- [5] **Zhen Yang, Xianping Liu, Yanling Tian.** Novel metal-organic superhydrophobic surface fabricated by nanosecond laser irradiation in solution; *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 587, 2020.
- [6] **Ganesh B. Shirsath, K. Muralidhar, Raj Ganesh S. Pala, J. Ramkumar.** Condensation of water vapor underneath an inclined hydrophobic textured surface machined by laser and electric discharge; *Applied Surface Science* 484, 2019, pp. 999–1009.
- [7] **Matthew Wei-Jun Liu, Jia-Hong Huang.** Effect of coating architecture on stress and energy relief efficiency of TiZrN coating on Si substrate // *Thin Solid Films*, Vol. 751, 2022. P. 139219.
- [8] **Siddiqui A., Maurya R., Katiyar P., Balani K.** Superhydrophobic, self-cleaning carbon nanofiber CVD coating for corrosion protection of AISI 1020 steel and AZ31 magnesium alloys // *Surface and Coatings Technology*, Vol. 404, 2020. P. 126421.
- [9] **Wang N., Xiong D., Deng Y., Shi Y., Wang K.** Mechanically robust superhydrophobic steel surface with anti-icing, UV-durability, and corrosion resistance properties // *ACS Appl Mater Interfaces*, Vol. 7, 2015. P. 6260–72.
- [10] **Ván Vechten J.A.** Experimental tests for boson condensation and superconductivity in semiconductors during pulsed beam annealing // *Solid State Communications*, Vol. 39, 1981. pp. 1285–1291.
- [11] **Reif J., Varlamova O., Varlamov S., Bestehorn M.** The role of asymmetric excitation in self-organized nanostructure formation upon femtosecond laser ablation // *AIP Conference Proceedings*. 2012. Vol. 1464. pp. 428–441.
- [12] **Breitling D., Ruf A., Berger P.W., Dausinger F.H., Klimentov S.M., Pivovarov P.A., Kononenko T.V., Konov V.I.** Plasma effects during ablation and drilling using pulsed solid-state lasers // *Laser Processing of Advanced Materials and Laser Microtechnologies*. 2003. Vol. 5121. pp. 24–33.
- [13] **Mazzi A., Miotello A.** Simulation of phase explosion in the nanosecond laser ablation of aluminum // *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 489, 2017. pp. 126–130.
- [14] **Yan Z., Mei X., Wang W., Pan A., Lin Q., Huang C.** Numerical simulation on nanosecond laser ablation of titanium considering plasma shield and evaporation-affected surface thermocapillary convection // *Optics Communications*, Vol. 453, 2019. P. 124384.

[15] Saltuganov P., Ionin A.A., Kudryashov S., Rukhadze A., Gavrilov A., Makarov S., Rudenko A., Zayarnyi D. Fabrication of Superhydrophobic Coating on Stainless Steel Surface by Femtosecond Laser Texturing and Chemisorption of an Hydrophobic Agent // Journal of Russian Laser Research, Vol. 36, Jan 2015. pp. 81–85.

[16] Куршаков А.В., Рыженков А.В., Бодров А.А., Рыженков О.В., Патакин А.А., Чернов Е.Ф. Интенсификация теплообменных процессов в конденсаторах паровых турбин с использованием поверхностно активных веществ // Теплоэнергетика, № 11, 2014. С. 16–20.

[17] Рыженков В.А., Седлов А.С., Рыженков А.В. О возможности снижения гидравлического сопротивления трубопроводов систем теплоснабжения // Энергосбережение и водоподготовка, № 5, 2007. С. 22–26.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

РЫЖЕНКОВ Артем Вячеславович — ведущий научный сотрудник, Национальный исследовательский университет "МЭИ", д-р техн. наук.
E-mail: RyzhenkovAV@mpei.ru

ВОЛКОВ Александр Викторович — главный научный сотрудник, Национальный исследовательский университет "МЭИ", д-р техн. наук.
E-mail: VolkovAV@mpei.ru

ТРУШИН Евгений Сергеевич — инженер, Национальный исследовательский университет "МЭИ", без степени.
E-mail: TrushinYS@mpei.ru

ЧЕРЕПАНОВ Сергей Павлович — аспирант, Национальный исследовательский университет "МЭИ", без степени.
E-mail: CherepanovSP@mpei.ru

REFERENCES

[1] A. Kumar, R. Sharma, S. Kumar, P. Verma, A review on machining performance of AISI 304 steel // Materials Today: Proceedings, Vol. 56, 2022. Pp. 2945–2951.

[2] R. Kant, R. Mittal, C. Kumar, B.S. Rana, M. Kumar, R. Kumar, Fabrication and Characterization of Weldments AISI 304 and AISI 316 Used in Industrial Applications // Materials Today: Proceedings, 2018, Vol. 5, p. 18475–18481.

[3] O.V. Ryzhenkov, A.V. Kurshakov, A.V. Ryzhenkov, M.R. Dasaev, S.V. Grigoriev, On intensification of heat exchange in steam condensers made of stainless steel and brass. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019. Vol. 8. Pp. 2290–2294.

[4] Balraj Krishnan Tudu, Aditya Kumar, Bharat Bhushan, Facile approach to develop anti-corrosive superhydrophobic aluminium with high mechanical, chemical and thermal durability; Philosophical transactions of the royal society a mathematical, physical and engineering sciences 377, 2018.

[5] Zhen Yang, Xianping Liu, Yanling Tian, Novel metal-organic superhydrophobic surface fabricated by nanosecond laser irradiation in solution; Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 587, 2020.

[6] Ganesh B. Shirsath, K. Muralidhar, Raj Ganesh S. Pala, J. Ramkumar, Condensation of water vapor underneath an inclined hydrophobic textured surface machined by laser and electric discharge; Applied Surface Science 484, 2019, pp. 999–1009.

- [7] **Matthew Wei-Jun Liu, Jia-Hong Huang**, Effect of coating architecture on stress and energy relief efficiency of TiZrN coating on Si substrate // *Thin Solid Films*, Vol. 751, 2022. P. 139219.
- [8] **A. Siddiqui, R. Maurya, P. Katiyar, K. Balani**, Superhydrophobic, self-cleaning carbon nanofiber CVD coating for corrosion protection of AISI 1020 steel and AZ31 magnesium alloys // *Surface and Coatings Technology*, Vol. 404, 2020. P. 126421.
- [9] **N. Wang, D. Xiong, Y. Deng, Y. Shi, K. Wang**, Mechanically robust superhydrophobic steel surface with anti-icing, UV-durability, and corrosion resistance properties // *ACS Appl Mater Interfaces*, Vol. 7, 2015. P. 6260–72.
- [10] **J.A. Van Vechten**, Experimental tests for boson condensation and superconductivity in semiconductors during pulsed beam annealing // *Solid State Communications*, Vol. 39, 1981. pp. 1285–1291.
- [11] **J. Reif, O. Varlamova, S. Varlamov, M. Bestehorn**, The role of asymmetric excitation in self-organized nanostructure formation upon femtosecond laser ablation // *AIP Conference Proceedings*. 2012. Vol. 1464. pp. 428–441.
- [12] **D. Breitting, A. Ruf, P.W. Berger, F.H. Dausinger, S.M. Klimentov, P.A. Pivovarov, T.V. Kononenko, V.I. Konov**, Plasma effects during ablation and drilling using pulsed solid-state lasers // *Laser Processing of Advanced Materials and Laser Microtechnologies*. 2003. Vol. 5121. pp. 24–33.
- [13] **A. Mazzi, A. Miotello**, Simulation of phase explosion in the nanosecond laser ablation of aluminum // *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 489, 2017. pp. 126–130.
- [14] **Z. Yan, X. Mei, W. Wang, A. Pan, Q. Lin, C. Huang**, Numerical simulation on nanosecond laser ablation of titanium considering plasma shield and evaporation-affected surface thermocapillary convection // *Optics Communications*, Vol. 453, 2019. P. 124384.
- [15] **P. Saltuganov, A.A. Ionin, S. Kudryashov, A. Rukhadze, A. Gavrilov, S. Makarov, A. Rudenko, D. Zayarnyi**, Fabrication of Superhydrophobic Coating on Stainless Steel Surface by Femtosecond Laser Texturing and Chemisorption of an Hydrophobic Agent // *Journal of Russian Laser Research*, Vol. 36, Jan 2015. pp. 81–85.
- [16] **A.V. Kurshakov, A.V. Ryzhenkov, A.A. Bodrov, O.V. Ryzhenkov, A.A. Patakin, Ye.F. Chernov**, Intensifikatsiya teploobmennyykh protsessov v kondensatorakh parovykh turbin s ispolzovaniyem poverkhnostno aktivnykh veshchestv // *Teploenergetika*, № 11, 2014. S. 16–20.
- [17] **V.A. Ryzhenkov, A.S. Sedlov, A.V. Ryzhenkov**, O vozmozhnosti snizheniya gidravlicheskogo soprotivleniya truboprovodov sistem teplosnabzheniya // *Energobezopasnost i vodopodgotovka*, №5, 2007. S. 22–26.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Artem V. RYZHENKOV – *National Research University "Moscow Power Engineering Institute".*
E-mail: RyzhenkovAV@mpei.ru

Alexander V. VOLKOV – *National Research University "Moscow Power Engineering Institute".*
E-mail: VolkovAV@mpei.ru

Evgeniy S. TRUSHIN – *National Research University "Moscow Power Engineering Institute".*
E-mail: TrushinYS@mpei.ru

Sergey P. CHEREPANOV – *National Research University "Moscow Power Engineering Institute".*
E-mail: CherepanovSP@mpei.ru

Поступила: 03.10.2022; Одобрена: 25.10.2022; Принята: 08.11.2022.
Submitted: 03.10.2022; Approved: 25.10.2022; Accepted: 08.11.2022.