

Том 30, №2, 2024



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

Сергеев В.В., главный редактор, д-р техн. наук, профессор, чл-корр РАН, первый проректор, 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;
Кищенко 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;
Федоров М.П., академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Сергеев В.В., главный редактор, д-р техн. наук, профессор, чл-корр РАН, первый проректор, Санкт-Петербургский политехнический университет 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;
Башкарёв 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;
Колсун 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;
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;
Цемко 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; И.Е. Лебедева – перевод на английский язык; Ф.К.С. Бастиан – редактор.

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

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

Дата выхода: 28.06.2024

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024

30 (2) 2024



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

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

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

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;

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

EDITORIAL BOARD

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

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 № ФС 77-78004 issued March 27, 2020.

Editorial office

O.A. Matenev – editorial manager;

A.A. Kononova – computer layout; I.E. Lebedeva – English translation; Ph.Ch.S. Bastian – editor.

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

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

Release date: 28.06.2024

© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2024

Содержание

Энергетика. Электротехника

Лю Ч. Углеродные нанотрубки.....	7
Кадие-Оглы Е.Ф., Коровкин Н.В. Методика расчета магнитного поля, токов и потерь в обмотке якоря электрической машины переменного тока на основе цепно-полевой постановки.....	22
Калашников А.М., Чернов Г.И., Евдокимов В.С. Математическая модель системы рекуперации тепловых потерь передвижной компрессорной станции на основе холодильной машины.....	35
Калютник А.А., Трещёв Д.А., Кравченко С.О. Использование RDF-топлива для выработки электроэнергии в парогазовой установке на ТЭЦ в Санкт-Петербурге.....	49
Мозжегорова Ю.В., Ильиных Г.В., Коротаев В.Н. Оценка жизненного цикла газотурбинной установки в Российской Федерации.....	74

Металлургия. Материаловедение

Рогожкин В.В., Горынин В.И., Житомирский М.А. Аналитическое решение уравнений теории Гинзбурга–Ландау для вихря Абрикосова в сверхпроводниках с произвольным значением $\kappa > 0,707$	88
Грачева А.М., Полозов И.А., Борисов А.Н., Суфияров В.Ш., Попович А.А. Исследование интерметаллидного титанового сплава с добавлением меди, изготовленного методом струйного нанесения связующего с последующим спеканием.....	96

Contents

Energetics. Electrical engineering

Liu C. Carbon nanotubes.....	15
Kadi-Ogly E.F., Korovkin N.V. Calculation method of magnetic field, currents and losses in the armature winding of AC electrical machine based on field-circuit formulation.....	22
Kalashnikov A.M., Chernov G.I., Evdokimov V.S. Mathematical model of the waste heat recovery system of a mobile compressor station based on a refrigeration unit.....	35
Kalyutik A.A., Treshchev D.A., Kravchenko S.O. Use of RDF to generate electricity in a combined cycle gas turbine plant at a CHP plant in St. Petersburg.....	49
Mozzhegorova Yu.V., Ilinykh G.V., Korotaev V.N. Life cycle assessment of a gas turbine installation in the Russian Federation.....	74

Metallurgy. Material Science

Rogozhkin V.V., Gorynin V.I., Zhitomirskiy M.A. Analytical solution of the Ginzburg–Landau equations for the Abrikosov vortex in superconductors with an arbitrary value of the parameter $\kappa > 0.707$	88
Gracheva A.M., Polozov I.A., Borisov A.N., Sufiarov V.S., Popovich A.A. Investigation of intermetallic titanium alloy with copper addition made by binder jetting with subsequent sintering.....	96

Материал был ранее опубликован. Ссылка для цитирования: Чан Лю Углеродные нанотрубки // 10 прорывных идей в энергетике на следующие 10 лет: 5-й юбилейный доклад Ассоциации по развитию международных исследований и проектов в области энергетики «Глобальная энергия», 2023. С. 12–19. Оригинальный полный текст доклада доступен по ссылке: <https://globalenergyprize.org/ru/2023/06/15/doklad-10-proryvnyh-idej-v-jenergetike-na-sledujushhie-10-let/>

Ч. Лю

Институт исследования металлов,
Китайская академия наук, Китай

УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ

Введение. Углеродные нанотрубки представляют собой одномерную трубчатую структуру, состоящую из sp^2 -гибридизированных атомов углерода. Диаметр нанотрубки находится в диапазоне от субнанометра до 100 нанометров, а их длина обычно измеряется микрометрами и может достигать десятков сантиметров. В зависимости от количества составляющих коаксиальных графитовых слоев, нанотрубки подразделяются на одностенные, двустенные и многостенные. Одностенные УНТ (ОСУНТ) имеют три различные структурные конфигурации: "кресло", "зигзаг" и "хиральная" (рис. 1). В трубках типа "зигзаг" и "кресло" две противоположные связи С-С параллельны или перпендикулярны оси трубки, соответственно, в то время как в хиральных трубках связи С-С находятся под углом к оси трубки. Благодаря уникальной трубчатой структуре и прочным ковалентным связям С-С, УНТ обладают превосходными физико-химическими свойствами, включая сверхвысокую прочность на разрыв и высокое значение модуля Юнга, высокую электропроводность, высокую теплопроводность, отличную гибкость, хорошую химическую стабильность и термостабильность. Поэтому прогнозируется, что УНТ найдут широкое применение в электронике, оптоэлектронике, аэрокосмической промышленности, композитных материалах, автомобилестроении, хранении и преобразовании энергии и т.д.

Получение УНТ

Метод дугового разряда

УНТ были открыты в 1991 году при изучении под просвечивающим электронным микроскопом сажи, полученной в дуговом разряде. При зажигании дуги между двумя графитовыми электродами в атмосфере инертного газа или водорода атомы углерода испаряются с анода и самостоятельно формируют многостенные УНТ (МСУНТ). В 1993 году исследователи добавили в графитовый анод порошки переходных металлов (Fe и Co), в результате чего кластеры/наночастицы металлов, испаряясь, становятся катализатором для выращивания ОСУНТ. Метод дугового разряда прост как в настройке, так и в использовании. Из-за высокой температуры (~4000 К) электрической дуги подготовленные УНТ обычно имеют высокую степень графитизации. Однако в выращенных УНТ, как правило, присутствует большое количество примесей графита, аморфного углерода и остатков металлического катализатора. Кроме того, из-за сложности управления температурой и зоной действия дуги, зажигаемой между двумя графитовыми электродами, трудно точно настроить структуру полученных таким образом УНТ.

Метод лазерной абляции

В 1996 году использовали метод лазерной абляции. Лазерный луч использовался для локального получения высокой температуры и совместного испарения графитовой мишени и порошков металлических катализаторов, помещенных в реактор трубчатой печи. В результате были получены

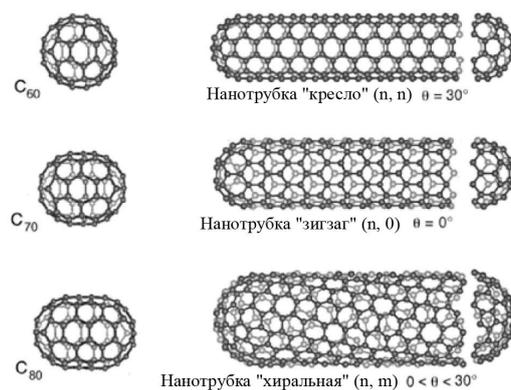


Рис. 1. Три типа ОСУНТ. (а) Кресло, (б) Зигзаг и (в) Хиральная

ОСУНТ с гораздо более высоким выходом продукта и чистотой по сравнению с теми, что были получены дуговым разрядом. Кроме того, было обнаружено, что под действием сил Ван-дер-Ваальса ОСУНТ для снижения общей поверхностной энергии собираются в пучки, содержащие до сотен отдельных нанотрубки. Пучки ОСУНТ с плотно упакованной регулярной структурой были названы кристаллическими канатами. Преимущество метода лазерной абляции заключается в более высоком выходе продукта и чистоте ОСУНТ, однако стоимость оборудования для лазерной генерации высока. Поэтому в настоящее время этот метод для получения УНТ используется редко.

Метод химического осаждения из паровой фазы

Химическое осаждение из паровой фазы (ХОП) в настоящее время является наиболее широко используемым методом получения УНТ. В отличие от графитового анода/мишени, используемых в методах дугового разряда и лазерной абляции, источниками углерода в ХОП обычно служат газофазные углеродсодержащие соединения, такие как метан, этилен, ацетилен, окись углерода, бензол, этаналь и др. С помощью катализаторов углеродсодержащие соединения при высоких температурах (обычно в диапазоне 600–1200 °С) разлагаются. Образующиеся атомы углерода растворяются в наночастицах катализатора и осаждаются при пересыщении. При этом катализатор служит также матрицей для роста УНТ, т.е. диаметр и хиральность УНТ тесно связаны с размером и структурой наночастиц катализатора. В зависимости от способа загрузки катализатора метод ХОП можно разделить на ХОП на носителе и ХОП с плавающим катализатором. В случае ХОП на носителе наночастицы катализатора предварительно осаждаются на поверхность пластин или пористых подложек, изготовленных, например, из MgO и SiO₂. В случае ХОП с плавающим катализатором прекурсор катализатора вместе с газом-носителем подается в высокотемпературную зону реактора, где он разлагается с образованием плавающих наночастиц, которые катализируют рост УНТ. Схема, показывающая процесс синтеза УНТ методом ХОП с плавающим катализатором (ПКХОП), представлена на рис. 2. ПКХОП, в зависимости от используемых параметров синтеза, может применяться для производства ОСУНТ, двустенных УНТ или многостенных УНТ (МСУНТ). Кроме того, процесс может быть непрерывным и включать в себя формирование частиц катализатора, зарождение и рост УНТ, а также прямой сбор УНТ. По сравнению с методами дугового разряда и лазерной абляции, метод ХОП обладает такими преимуществами, как низкая стоимость, крупномасштабное производство и хорошая контролируемость структуры продуктов УНТ. Например, используя метод ХОП, специально разработанные катализаторы и проводимое в процессе изготовления химическое травление, были синтезированы полупроводниковые ОСУНТ, металлические ОСУНТ и даже ОСУНТ со специфической хиральностью. Поэтому метод ХОП стал преобладающим методом синтеза УНТ как для академических, так и для промышленных целей.

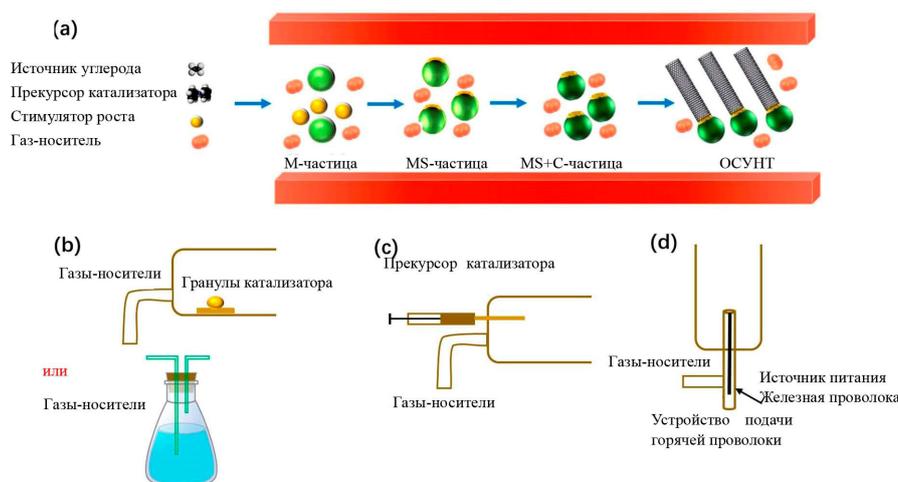


Рис. 2. а) Схема, показывающая синтез УНТ методом ПКХОП, и b-e) различные способы введения катализатора в реактор: (b) пересыщенный пар, (c) инъекция, (d) подача горячей проволоки и (e) генерация искровым разрядом

Очистка УНТ

Образцы УНТ сразу после приготовления обычно содержат такие примеси, как остатки металлического катализатора, аморфный углерод и другие формы нанougлерода. Поэтому во многих случаях для удовлетворения требованиям различных применений эти примеси необходимо удалить с помощью процесса очистки. УНТ могут быть очищены путем фильтрации с учетом их размеров, соотношения сторон и растворимости (как УНТ, так и наночастиц металлов и аморфного углерода). Хэддон и др. авторы сообщили об очистке УНТ центрифугированием, при использовании которого УНТ отделялись при соответствующей скорости центрифугирования ввиду разницы в плотности УНТ и примесей. Однако более широко используются не вышеупомянутые методы физической очистки, а химическая очистка. Углеродные наночастицы ввиду большого количества свободных связей и дефектов в аморфном углероде, а также высокой кривизны обычно химически более реакционноспособны, чем УНТ, и поэтому могут быть селективно удалены путем окисления. Наиболее простым и удобным газофазным окислителем является воздух. Эббесен и др. авторы прокаливали УНТ на воздухе при температуре 750 °С в течение 30 минут, в результате чего получили УНТ высокой чистоты. Хотя наночастицы металлических катализаторов можно легко удалить кислотной промывкой, они обычно покрыты слоями графитового углерода. Поэтому для одновременного удаления аморфного углерода и остаточных примесей катализатора наиболее эффективным оказалось сочетание окисления на воздухе и кислотной промывки. Также были разработаны методы жидкофазного окисления с использованием раствора перманганата калия, HNO_3 , H_2SO_4 или H_2O_2 в качестве окислителя. При очистке УНТ необходимо учитывать чистоту, выход продукта, стоимость, сложность и экологическую чистоту. Во многих случаях к желаемому результату может привести комбинация физической и химической очистки.

Электрохимические свойства УНТ

УНТ имеют уникальную трубчатую структуру, большую площадь поверхности, высокую электропроводность и прочность, поэтому они считаются идеальным материалом для использования в электродах литиевых аккумуляторах, обеспечивая требуемые электрохимические свойства.

УНТ анод для литий-ионных аккумуляторов

УНТ при его использовании в качестве анода литий-ионных аккумуляторов гарантируют, ввиду богатой порами структуры и большой площади поверхности, высокую литиевую емкость,

короткий путь диффузии ионов и высокую электропроводность, что обеспечивают быструю кинетику заряда-разряда. При этом высокая механическая прочность УНТ и их хорошая химическая стабильность обеспечивают длительный срок службы в циклическом режиме. Че и др. авторы впервые сообщили, что литиевая емкость УНТ анода достигла 490 мАч/г, что значительно выше, чем у традиционного графитового анода. Кроме того, было обнаружено, что емкость анода из УНТ тесно связана со степенью графитизации, т.е. хорошо кристаллизованные УНТ имеют более низкую литиевую емкость. Эом и др. авторы исследовали литиевую емкость при воздействии на УНТ сильной кислоты. Емкость при первом разряде и заряде достигала 1229 мАч/г и 681 мАч/г, соответственно. Повышенная литиевая емкость была объяснена наличием дефектов и открытыми полостями трубок. Ли и др. авторы подготовили вертикально выровненную матрицу УНТ на графеновой бумаге, которая показала обратимую литиевую емкость 290 мАч/г. Более того, поскольку графеновая бумага была использована для замены традиционного металлического токоприемника, общий вес аккумулятора снизился примерно на 80 %. Используя преимущества хорошей гибкости УНТ, Куи и др. авторы изготовили гибкий бумажный аккумулятор, где в качестве анода использовалась проводящая бумага, покрытая УНТ.

Благодаря высокой электропроводности и большой площади поверхности, УНТ продемонстрировали высокую емкость первого цикла и быструю кинетику заряда-разряда. При этом, однако, значительное количество лития расходуется на формирование границы раздела твердых электролитов, что приводит к высокой необратимой емкости. В результате прямое использование УНТ в качестве анода в литий-ионных аккумуляторах было сильно ограничено.

Гибридный анод УНТ для литий-ионных аккумуляторов

УНТ обладают превосходными физико-химическими свойствами, вследствие чего обладают следующими преимуществами при создании композитного анодного материала:

- (1) Будучи одномерным проводником, УНТ могут образовывать электропроводящую сетку, обеспечивающую быстрый перенос электронов в композитном электроде;
- (2) Трубчатая структура, высокая прочность и отличная гибкость УНТ помогают уменьшить изменение объема и внутреннее механическое напряжение в процессе заряда-разряда;
- (3) Активные анодные материалы хорошо диспергированы и равномерно распределены по сетке УНТ, что позволяет эффективно предотвращать их агрегацию и отслаивание.

Ванг и др. авторы сообщили о гибридном анодном материале УНТ@Fe₂O₃, продемонстрировавшим превосходные электрохимические свойства по сравнению с чистым Fe₂O₃. Это объясняется повышенной электропроводностью соединений Fe₂O₃ с УНТ и лучшей дисперсией Fe₂O₃ на каркасе УНТ. Чжоу и др. авторы приготовили бумагу с матрицей ОСУНТ, используя методом ПК-ХОП. После термической обработки на воздухе остатки катализатора Fe в образце окислились, в результате чего был получен гибкий композитный анод УНТ-Fe₂O₃. Благодаря отсутствию необходимости в добавлении дополнительных токоприемников и связующих, этот анодный материал показал высокую емкость 1243 мАч/г и желаемую скорость заряда. Цуй и др. авторы осадили Si на бумагу с УНТ, используя метод ХОП и SiH₄ в качестве паровой фазы. При использовании в качестве анода этот гибридный материал показал сверхвысокую емкость 1711 мАч/г после 50 циклов (82 % от первоначальной). Гохье и др. авторы нанесли наночастицы Si на внешнюю стенку вертикально выровненных УНТ. При скоростях заряда-разряда 1,3С, 5С и 15С емкость достигла 3000 мАч/г, 1900 мАч/г и 760 мАч/г, соответственно. Аджаян и др. авторы приготовили коаксиальный гибридный анодный материал MnO₂/УНТ, показав обратимую литиевую емкость после 15 циклов, равную 500 мАч/г.

Анод с УНТ-наполнителем для литий-ионных аккумуляторов

Как упоминалось выше, УНТ можно использовать в качестве каркаса для загрузки активных материалов высокой емкости. При этом анодный материал, нанесенный на внешнюю поверхность УНТ, будет непосредственно контактировать с электролитом, образуя твердый электролитный

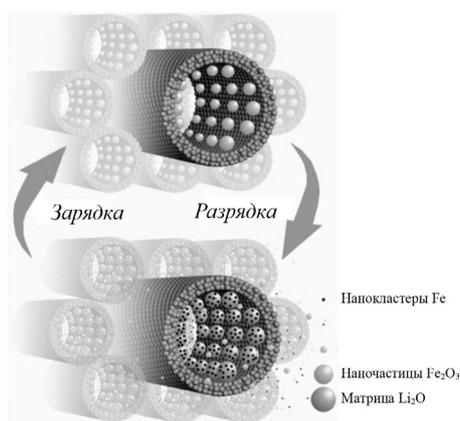


Рис. 3. Схематическое представление процесса заряда-разряда УНТ электрода, заполненного Fe_2O_3 , и роли УНТ в улучшении электрохимических характеристик

интерфейс, или отслаиваться от УНТ в процессе заряда-разряда. Но, поскольку, УНТ имеют уникальную полую трубчатую полость, можно заполнить УНТ электрохимически активными материалами, чтобы сформировать композитный анод. Такие аноды с наполнителем из УНТ обладают следующими преимуществами:

- (1) Изменение объема активного материала, используемого для заполнения УНТ, будет в значительной степени ограничено;
- (2) Обеспечивается хороший электрический контакт активного материала с сеткой УНТ и токоприемником;
- (3) Наноконтейнер из УНТ позволяет исключить агрегацию и выпадение наполнителя из активного материала.

Чжан и др. авторы подготовили УНТ, заполненные наночастицами Sn (Sn-внутри-УНТ), а также с нанесением наночастиц Sn на внешнюю стенку УНТ (Sn-снаружи-УНТ). Благодаря эффекту нанолокализации УНТ и лучшему электрическому контакту, Sn-внутри-УНТ показали высокую емкость 639,7 мАч/г после 170 циклов, превосходя по этому показателю Sn-снаружи-УНТ. Ю и др. авторы заполнили наночастицами Fe_2O_3 внутреннюю полость УНТ и продемонстрировали их сверхвысокую емкость, равную 2071 мА/ч. Процесс литификации и де-литификации УНТ, заполненных Fe_2O_3 , был изучен в процессе исследований с помощью просвечивающего электронного микроскопа. Значительно улучшенная литиевая емкость при использовании наночастиц Fe_2O_3 объясняется повышенным межфазным запасом лития, обратимой реакции LiOH с образованием LiH и межфазным превращением твердого электролита, происходящим из-за нанолокализации УНТ, а также очень малым размером частиц нанозерен $\text{Fe@Li}_2\text{O}$ и их хорошим электрическим контактом с УНТ [28]. Схематическое представление процесса заряда-разряда УНТ, заполненных Fe_2O_3 и роли УНТ в улучшении электрохимических характеристик показано на рис. 3.

Применение УНТ в литий-ионных аккумуляторах

Литий-ионные аккумуляторы стали наиболее распространенными перезаряжаемыми батареями, а углеродная сажа традиционно используется в качестве проводящей добавки для повышения электропроводности электродов. Эндо и др. авторы впервые добавили углеродные нановолокна в анод литий-ионного аккумулятора в качестве проводящего наполнителя с целью улучшения его циклических характеристик. Вскоре после этого Чжан и др. авторы разработали композитные электродные материалы кремний/графит/МСУНТ для литий-ионных аккумуляторов путем прямого смешивания. Фактически, в последние годы были коммерчески разработаны МСУНТ, используемые в качестве проводящей добавки для анодных и катодных материалов литий-ионных

аккумуляторов, таких как природные графитовые сферы и LiFePO_4 . Благодаря высокоэффективной электропроводящей сетки, образующейся при добавлении УНТ, значительно улучшаются скорость заряда и срок службы изготовленных литий-ионных аккумуляторов. С быстрым развитием электромобилей постоянно растет производство и использование УНТ в аккумуляторах большой мощности. МСУНТ массово производились несколькими компаниями в Китае, Корее, Японии и Европе. В 2023 году в Китае в электроды литий-ионных аккумуляторов будет добавлено более 7000 тонн МСУНТ.

Кремний обладает самой высокой теоретической литиевой емкостью – 4200 мАч/г, что более чем в 10 раз выше, чем у традиционного графитового анода (372 мАч/г). Он считается перспективным кандидатом на роль анода для литий-ионных аккумуляторов с высокой плотностью энергии. Однако серьезные изменения объема, вызванные внедрением/выведением лития, приводят к быстрому ухудшению характеристик кремниевого анода. Хотя сочетание кремния с МСУНТ было продемонстрировано как эффективное средство для увеличения срока службы аккумулятора, общие его характеристика, учитывавшая свойства, стоимость и сложность изготовления аккумулятора была неудовлетворительной. Недавно было обнаружено, что идеальной функциональной добавкой к кремниевому аноду могут быть ОСУНТ. Хи и др. авторы изучили электрохимические характеристики анодных материалов на основе ОСУНТ/Si и МСУНТ/Si. Было обнаружено, что для анода с добавлением ОСУНТ были достигнуты более высокая начальная разрядная емкость, более высокая начальная кулоновская эффективность и исключительно высокая циклическая стабильность. Это объясняется тем, что ОСУНТ могут поддерживать хороший контакт с активным материалом на основе Si даже при напряжении сжатия до 6,2 ГПа, в то время как МСУНТ теряют электрический контакт при длительном циклическом воздействии напряжения сжатия (до 8,9 ГПа) и напряжения растяжения (до 2,5 ГПа). При таких больших напряжениях более гибкие ОСУНТ, имеющие более значительные силы Ван-дер-Ваальса, обеспечивают хороший электрический контакт между активным материалом на основе кремния и токоприемником. На самом деле ОСУНТ уже коммерчески используются в кремниевых анодах и аккумуляторах с высокой плотностью энергии, а их объем рынка в Китае в 2024 году, по прогнозам, составит около 10 тонн.

Прогноз и перспективы

Прошло более 30 лет с момента открытия УНТ. За прошедшее время был достигнут заметный прогресс и получены значительные результаты. При этом, однако, остаются большие проблемы и открываются большие возможности. Контролируемый рост ОСУНТ с определенным диаметром, хиральностью и электронно-транспортными свойствами чрезвычайно важен как с точки зрения фундаментальных исследований, так и практического применения, особенно в наноэлектронике и нано-оптоэлектронике. Свойства ОСУНТ, особенно электропроводность, очень чувствительны к их структуре. До сих пор трудно реализовать требуемый точный контроль из-за узкого структурного различия и малых различий в энергии образования ОСУНТ с разными свойствами. Ключом к решению проблемы контролируемого роста станут точное раскрытие механизма роста ОСУНТ и разработка эффективного катализатора, метода и установки для роста. Применение УНТ – еще один постоянно вопрос, привлекающий все большее внимание. Современные области применения УНТ в основном основаны на превосходной электропроводности УНТ, применяемых в качестве наполнителя. Широкое использование в МСУНТ литий-ионных батареях в качестве замены традиционной углеродной сажи основано именно на этом преимуществе.

Кроме использования в аккумуляторах, возможно также применение УНТ в электронике, композитах, 3D-печати, теплоотводе, прозрачных электродах, усовершенствованных волокнах и т.д. Характеристики прозрачных проводящих пленок на основе УНТ уже достаточно хороши для применения в сенсорных панелях. Для удовлетворения требований высокотехнологичных приложений, таких как фотоэлектроды солнечных элементов, необходима оптимизация элект-

тропроводности и конфигурации сетки из УНТ. Еще одним важным преимуществом УНТ является их прочность и гибкость, поэтому УНТ могут использоваться в качестве деталей в различных недавно разработанных гибких устройствах. Кроме того, композиты, армированные УНТ, обладающие повышенной жесткостью и прочностью могут найти применение и в других специфических областях. Хорошо проводящие, прочные и легкие волокна УНТ показали перспективность использования в аэрокосмической отрасли, электронике и национальной обороне. Согласно прогнозам, в ближайшие десять лет рынок как МСУНТ, так и ОСУНТ будет стремительно расширяться. Стоит отметить, что для каждого из вышеперечисленных потенциальных применений важно иметь УНТ с желаемой структурой и свойствами, причем во многих случаях с низкой стоимостью изготовления.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Eklund P.C.** Science of fullerenes and carbon nanotubes. Academic Press, San Diego, 1996.
- [2] **Zhang R.F. et al.** Growth of half-meter long carbon nanotubes based on schulz-flory distribution. ACS Nano 2013. 7: 6156–6161.
- [3] **Dresselhaus M.S., Eklund P.C.** Phonons in carbon nanotubes. Adv. Phys. 2000. 49: 705–814.
- [4] **Iijima S.** Helical microtubules of graphitic carbon. Nature 1991. 354: 56–58.
- [5] **Liu C. et al.** Semi-continuous synthesis of single-walled carbon nanotubes by a hydrogen arc discharge method, Carbon 1999. 37: 1865–1868.
- [6] **Iijima S., Ichihashi T.** Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. Nature 1993. 363: 603–605.
- [7] **Bethune D.S. et al.** Cobalt-catalyzed growth of carbon nanotubes with single-atomic layer walls. Nature 1993. 363: 605–607.
- [8] **Thess A. et al.** Crystalline ropes of metallic carbon nanotubes. Science 1996. 273: 483–487.
- [9] **Li W.Z. et al.** Large-scale synthesis of aligned carbon nanotubes. Science 1996. 274: 1071–1073.
- [10] **Cheng H.M. et al.** Large-scale and low-cost synthesis of single-walled carbon nanotubes by the catalytic pyrolysis of hydrocarbons. Applied Physics Letters 1998. 72: 3282–3284.
- [11] **Hou P.X. et al.** Synthesis of carbon nanotubes by floating catalyst chemical vapor deposition and their applications. Advanced Functional Materials 2022. 32: 2108541.
- [12] **Liu C., Cheng H.M.** Controlled growth of semiconducting and metallic single-wall carbon nanotubes, Journal of the American Chemical Society 2016. 138: 6690–6698.
- [13] **Shelimov K.B. et al.** Purification of single-wall carbon nanotubes by ultrasonically assisted filtration. Chemical Physics Letters 1998. 282: 429–434.
- [14] **Yu A.P. et al.** Application of centrifugation to the large-scale purification of electric arc-produced single-walled carbon nanotubes. Journal of the American Chemical Society 2006. 128: 9902–9908.
- [15] **Ebbesen T.W. et al.** Purification of carbon nanotubes. Nature 1994. 367: 519.
- [16] **Hou P.X., Liu C., Cheng H.M.** Purification of carbon nanotubes. Carbon 2008. 46: 2003–2025.
- [17] **Che G.L. et al.** Carbon nanotubule membranes for electrochemical energy storage and production. Nature 1998. 393: 346–349.
- [18] **Wu G.T. et al.** Structural characterization and electrochemical lithium insertion properties of carbon nanotubes prepared by the catalytic decomposition of methane. Journal of Solid State Electrochemistry 2003. 7: 129–133.
- [19] **Eom J.Y. et al.** Lithium insertion into purified and etched multi-walled carbon nanotubes synthesized on supported catalysts by thermal CVD. Carbon 2004 42: 2589–2596.
- [20] **Li S.S. et al.** Vertically aligned carbon nanotubes grown on graphene paper as electrodes in lithium-ion batteries and dye-sensitized solar cells. Advanced Energy Materials 2011. 1: 486–490.

- [21] **Hu L.B. et al.** Highly conductive paper for energy-storage devices. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2009. 106: 21490–21494.
- [22] **Wang Z.Y. et al.** Assembling carbon-coated α -Fe₂O₃ hollow nanohorns on the CNT backbone for superior lithium storage capability. *Energy Environ Sci* 2012. 5: 5252–5256.
- [23] **Zhou G.M. et al.** A nanosized Fe₂O₃ decorated single-walled carbon nanotube membrane as a high-performance flexible anode for lithium ion batteries. *J Mater Chem* 2012. 22: 17942–17946.
- [24] **Cui L.F. et al.** Light-Weight Free-Standing Carbon Nanotube-Silicon Films for Anodes of Lithium Ion Batteries. *ACS Nano* 2010. 4: 3671–3678.
- [25] **Gohier A. et al.** High-Rate Capability Silicon Decorated Vertically Aligned Carbon Nanotubes for Li-Ion Batteries. *Adv Mater* 2012. 24: 2592–2597.
- [26] **Reddy A.L.M. et al.** Coaxial MnO₂/carbon nanotube array electrodes for high-performance lithium batteries. *Nano Lett* 2009. 9: 1002–1006.
- [27] **Zhang H.K. et al.** Enhanced lithium ion storage property of Sn nanoparticles: The confinement effect of few-walled carbon nanotubes. *J Phys Chem C* 2012. 116: 22774–22779.
- [28] **Yu W.J. et al.** High reversible lithium storage capacity and structural changes of Fe₂O₃ nanoparticles confined inside carbon nanotubes. *Adv Energy Mater* 2016. 6: 1501755.
- [29] **Yu W.J. et al.** Improved electrochemical performance of Fe₂O₃ nanoparticles confined in carbon nanotubes. *J Mater Chem* 2012. 22: 13756–13763.
- [30] **Endo M. et al.** Vapor-grown carbon fibers (VGCFs) - Basic properties and their battery applications. *Carbon* 2001. 39: 1287–1297.
- [31] **Zhang Y. et al.** Composite anode material of silicon/graphite/carbon nanotubes for Li-ion batteries. *Electrochim. Acta* 2006. 51:4994–5000.
- [32] **Yu W.J. et al.** Lithiation of silicon nanoparticles confined in carbon nanotubes. *ACS Nano* 2015. 9: 5063–5071.
- [33] **He Z.Y. et al.** Single-walled carbon nanotube film as an efficient conductive network for Si-based anodes. *Advanced Functional Materials* 2023. 33: 2300094.
- [34] **Liu C., Cheng H.M.** Carbon nanotubes: controlled growth and application. *Materials Today* 2013. 16: 19–28.
- [35] The Global Market for Graphene, Carbon Nanotubes, Carbon Nanofibers, Nanodiamonds, Fullerenes (Carbon Nanomaterials) and 2D Materials 2022–2032, *Carbon Nanomaterials Market Report*, 2022.

This article has been previously published. Citation link: Chang Liu Carbon nanotubes // 10 Breakthrough Ideas in Energy for the Next 10 Years: 5rd Annual Report of the Global Energy Association on development of international research and projects in the field of energy, 2023. PP. 3–10. The original full text of the report is available at the link: <https://globalenergyprize.org/ru/2023/06/15/doklad-10-proryvnyh-idej-v-jenergetike-na-sledujushhie-10-let/>

C. Liu

Institute of Metal Research,
Chinese Academy of Science, China

CARBON NANOTUBES

Introduction. Carbon nanotubes are a one-dimensional tubular structure composed of sp^2 hybridised carbon atoms. The diameters of CNTs are in the range of sub-nanometre to 100 nanometres, and their lengths are usually in micron scale and can be up to tens of centimetres. Depending on the number of composing coaxial graphitic layers, CNTs can be classified as single-walled, double-walled and multi-walled. Single-wall CNTs (SWCNTs) have three different structural configurations that are armchair, zigzag, and chiral (Fig. 1). Two opposite C-C bonds lie parallel and perpendicular to the tube axis in zigzag and armchair tubes, respectively, whereas C-C bonds make an angle with the tube axis in chiral tubes. Due to their unique tubular structure and strong C-C covalent bonding, CNTs have excellent physiochemical properties, including ultrahigh tensile strength and Young's modulus, high electrical conductivity, high thermal conductivity, excellent flexibility, good chemical stability and thermal stability. Therefore, CNTs are predicted to have a wide range of applications in the fields of electronics, optoelectronics, aerospace, composites, automobile, energy storage and conversion, etc.

Preparation of CNTs

Arc discharge method

CNT was discovered in 1991, when studying a soot material produced by arc discharge under transmission electron microscope. When an arc is initiated between two graphite electrodes under an inert gas or hydrogen atmosphere, carbon atoms are vapourised from the anode and self-assembled to form multi-wall CNTs (MWCNTs). In 1993, researchers further added some transition metal powders (Fe and Co) in the graphite anode, as a result, the co-vapourised metal clusters/nanoparticles serve as a catalyst to grow SWCNTs. The arc discharge method is simple, in both setup and operating process. Due to the high temperature (~ 4000 K) of the electric arc, the prepared CNTs usually have a high degree of graphitisation. However, there are usually a high content of impurities of graphite, amorphous carbon and residue metal catalyst accompanied with the grown CNTs. In addition, due to the difficulty in controlling the temperature and scope of an arc initiated between two graphite electrodes, it is difficult to tune the structure of the CNTs thus produced finely.

Laser ablation method

In 1996, in synthesis of SWCNTs a laser ablation method was used. A laser beam was employed to generate high temperature locally and to co-vapourise a graphite target and metal catalyst powders put in the reactor of a tubular furnace. As a result, SWCNTs with a much higher yield and purity compared to those produced by arc discharge were obtained. Furthermore, it was found that the SWCNTs self-assembled into bundles containing up to hundreds of individual nanotubes driven by Van der Waals force to decrease the total surface energy. The SWCNT bundles with densely packed regular structure were

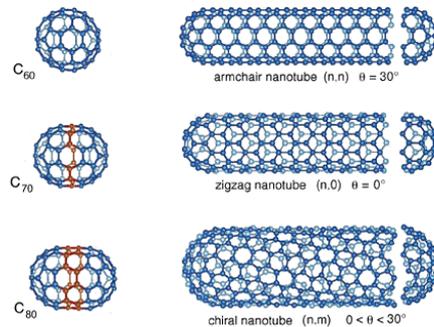


Fig. 1. Three types of SWCNTs. (a) Armchair, (b) Zigzag, and (c) Chiral

named as crystalline ropes. The laser ablation method shows advantage of higher SWCNT yield and purity, however, the cost of the laser generation equipment is high. Therefore, this technique has been rarely used to produce CNTs now.

Chemical vapour deposition method

Chemical vapour deposition (CVD) is currently the most widely used method for CNT production. Different from the graphite anode/target employed in arc discharge and laser ablation methods, the carbon sources used in CVD are usually gas-phase carbon-containing compounds, like methane, ethylene, acetylene, carbon monoxide, benzene, ethanal, etc. With the aid of catalysts, the carbon-containing compounds are decomposed at high temperatures (usually in the range of 600–1200 °C). The yielding carbon atoms dissolve in the catalyst nanoparticles and precipitate when supersaturated, where the catalyst also serves as a template guiding the growth of CNTs, i.e. the diameter and chirality of CNTs are closely related to the size and structure of the catalyst nanoparticles. According to the way of catalyst loading, CVD method can be further classified as supported CVD and floating catalyst CVD. For supported CVD, catalyst nanoparticles are pre-deposited on the surface of wafers or porous substrates like MgO and SiO₂. For floating catalyst CVD, a catalyst precursor together with the carrier gas is fed into the high-temperature zone of a reactor and is then decomposed to form floating nanoparticles that catalyse the growth of CNTs. A schematic showing the synthesis process of CNTs by FCCVD is shown in Fig. 2. FCCVD is valid for the production of SWCNTs, double-wall CNTs, or multi-wall CNTs (MWCNTs) depending on the different synthesis parameters used. In addition, the process can be continuous, involving catalyst particle formation, CNT nucleation, and growth, and the direct collection of the CNTs. Compared with the arc discharge and laser ablation methods, CVD method shows advantages of low cost, large-scale production, and good controllability on the structure of CNT products. For example, semiconducting SWCNTs, metallic SWCNTs and even SWCNTs with specific chiralities have been synthesised using CVD method by catalyst design and *in situ* chemical etching. Therefore, CVD has become a prevailing technique for the synthesis of CNTs in both academic and industrial areas.

Purification of CNTs

The as-prepared CNT samples usually contain impurities like residue metal catalyst, amorphous carbon and other forms of nanocarbons. Therefore, in many cases, it is necessary to remove these impurities through a purification process to fulfil the requirements of various applications. Based on the different size, aspect ratio and solubility of CNTs, metal nanoparticles, and amorphous carbon, CNTs can be purified by filtration. Haddon et al. reported the purification of CNTs by centrifugation, where CNTs were separated at an appropriate centrifugal speed due to the density difference between CNTs and the impurities. Compared to the abovementioned physical purification techniques, chemical purification is more widely used. Because of the abundant dangling bonds and defects in amorphous carbon

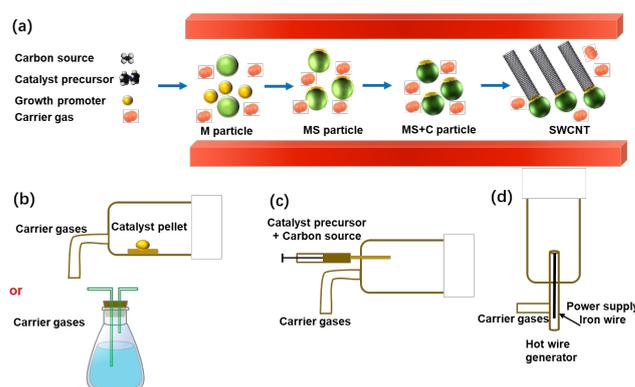


Fig. 2. a) Schematic showing the synthesis of CNTs by FCCVD, and b–e) various ways of introducing the catalyst into the reactor: (b) supersaturated vapour, (c) injection, (d) hot wire generation, and (e) spark-discharge generation

and the high curvature of carbon nanoparticles, they are usually chemically more reactive than CNTs and therefore, can be selectively removed by oxidation. Air is the most simple and convenient gas-phase oxidant. Ebbesen et al. burned CNTs in air at 750 °C for 30 minutes and obtained high purity CNTs. Although metal catalyst nanoparticles can be easily solved by acid washing, they are usually covered with graphitic carbon layers. Therefore, a combination of air oxidation and acid washing has been proved effective in simultaneously removing the amorphous carbon and residue catalyst impurities. Liquid-phase oxidation techniques using potassium permanganate solution, HNO_3 , H_2SO_4 , or H_2O_2 as a oxidant have also been developed. During the purification of CNTs, the purity, yield, cost, complexity and environmental friendliness need to be taken into account. In many cases a combination of physical purification and chemical purification may lead to a desirable result.

Electrochemical properties of CNTs

CNTs have unique tubular structure, large surface area, high electrical conductivity, and high strength and therefore, they are considered as an ideal material for use in the electrodes of lithium batteries with desirable electrochemical properties.

CNT anode for lithium-ion batteries

When used as an anode of lithium-ion batteries, the abundant pore structure and large surface area of CNTs guarantee a high lithium storage capacity, the short ion diffusion path and high electrical conductivity enable a fast charge-discharge kinetics, and the high mechanical strength and good chemical stability lead to a long cycling life. Che et al. first reported the lithium storage capacity of a CNT anode reached 490 mAh/g, much higher than that of the traditional graphite anode. Furthermore, it was found that the capacity of CNT anode is closely related to its degree of graphitisation, i.e. well crystallised CNTs have lower lithium storage capacity. Eom et al. studied the lithium storage ability of the CNTs short cut by strong acid, and the first discharge and charge capacities reached 1229 mAh/g and 681 mAh/g, respectively. The enhanced lithium storage capacity was attributed to the introduced defects and opened tube cavity. Li et al. prepared a vertically aligned CNT array on a graphene paper, which showed a reversible lithium storage capacity of 290 mAh/g. More importantly, because the graphene paper was used to replace the traditional metal current collector, the total weight of the battery decreased by about 80%. Taking advantage of the good flexibility of CNTs, Cui et al. fabricated a flexible paper battery, where a conductive CNT-painted paper was used as an anode.

Owing to the high electrical conductivity and large surface area, CNTs have shown high first round capacity and fast charge-discharge kinetics. However, a considerable amount of stored lithium is consumed in forming the solid electrolyte interface, leading to a high irreversible capacity. As a result, the direct use of CNTs as an anode in lithium-ion batteries has been greatly limited.

CNT hybrid anode for lithium-ion batteries

CNTs have excellent physiochemical properties and therefore, they have the following merits in building a composite anode material:

- (1) As a one-dimensional conductor, CNTs can form an electrically conductive network that permit fast electron transport in the composite electrode;
- (2) The tubular structure, high strength and excellent flexibility of CNTs help in alleviating the volume change and internal stress during the charge-discharge process;
- (3) Active anode materials are well dispersed and uniformly distributed on the CNT network, which prevents their aggregation and peeling off effectively.

Wang et al. reported a CNT@Fe₂O₃ hybrid anode material, which showed superior electrochemical property compare with pure Fe₂O₃. This was attributed to the enhanced electrical conductivity of the CNT-connected Fe₂O₃ unites and the better dispersion of Fe₂O₃ on the CNT scaffold. Zhou et al. prepared a SWCNT bucky paper by FCCVD method. After heat treated in air, the residue Fe catalyst in the sample was oxidised, and a flexible CNT-Fe₂O₃ composite anode was obtained. Because no additional current collector and binder need added, this anode material showed a high capacity of 1243 mAh/g and desirable rate capability. Cui et al. deposited Si on a free-standing CNT paper by the CVD of SiH₄. When used as an anode, this hybrid material showed a ultrahigh capacity of 1711 mAh/g after 50 cycles (82% of the initial). Gohier et al. loaded Si nanoparticles on the outer wall of vertically aligned CNTs. At charge-discharge rates of 1.3C, 5C, and 15C, the capacity reached 3000 mAh/g, 1900 mAh/g and 760 mAh/g, respectively. Ajayan et al. prepared a coaxial MnO₂/CNT hybrid anode material, which showed a reversible lithium storage capacity of 500 mAh/g after 15 cycles.

CNT-filling anode for lithium-ion batteries

As mentioned above, CNTs can be used as a scaffold to load high-capacity active materials. However, the anode material loaded on the outer surface of CNTs would directly contact with the electrolyte and form the solid electrolyte interface or peel off from the CNTs during the charge-discharge process. Since CNTs have a unique hollow tubular cavity, it is possible to fill electrochemically active materials inside CNTs to form a composite anode. Such CNT-filling anodes have the following advantages:

- (1) The volume change of the active material filled inside CNTs would be largely restrained;
- (2) A good electrical contact of active material with the CNT net work and the current collector can be guaranteed;
- (3) With the aid of the CNT nanocontainer, the aggregation and fall off of the filled active material can be avoided.

Zhang et al. prepared Sn nanoparticle-filled CNTs (Sn-in-CNT) and Sn nanoparticles loaded on the outer wall of CNTs (Sn-out-CNT). Due to the nanoconfinement effect of CNTs and the better electrical contact, Sn-in-CNT showed a high capacity of 639.7 mAh/g after 170 cycles, outperforming the Sn-out-CNT. Yu et al. filled Fe₂O₃ nanoparticles inside the inner cavity of CNTs, and an ultrahigh capacity of 2071 mA/h was demonstrated. The lithiation and de-lithiation process of the Fe₂O₃-filled CNTs was studied by *in situ* TEM. And the significantly improved lithium storage capacity of the Fe₂O₃ nanoparticles is attributed to the extra lithium storage due to the enhanced interfacial lithium storage and reversible reaction of LiOH to form LiH and solid-electrolyte-interphase conversion originating from the nanoconfinement of CNTs as well as the very small particle size of the Fe@Li₂O nanograins and their good electrical contact with CNTs [28]. A schematic illustration showing the charge-discharge process for the Fe₂O₃-filled CNTs and the role of CNTs in improving its electrochemical performance is shown in Fig. 3.

Application of CNTs in lithium-ion batteries

Lithium-ion batteries have become the most widely used rechargeable batteries, and carbon black is traditionally used as a conducting additive to increase the electrical conductivity of the electrodes. Endo et al. first added carbon nanofibers into the anode of lithium-ion battery as a conductive filler to improve

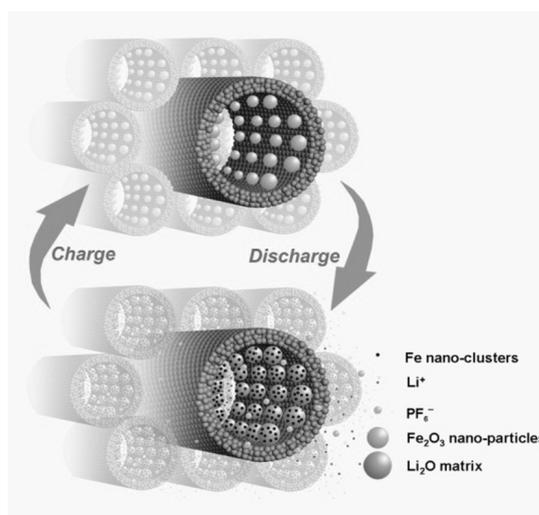


Fig. 3. A schematic illustration of the charge–discharge process for the electrode of Fe_2O_3 -filled CNTs and the role of CNTs in improving its electrochemical performance

its cyclic performance. Soon after that Zhang et al. developed silicon/graphite/MWCNT composite electrode materials for lithium-ion batteries by directly mixing. In fact, in recent years, MWCNTs have been commercially developed as a conducting additive for the anode and cathode materials of lithium-ion batteries such as natural graphite spheres and LiFePO_4 . Thanks to the highly efficient electrically conductive network formed by the CNTs added, the rate capability and cycling life of the fabricated lithium-ion batteries are significantly improved. With the rapid development of electrical vehicles, the production and use of CNTs in high power batteries have been keeping increasing. MWCNTs have been produced in a large quantity by a few companies based in China, Korea, Japan, and Europe. In 2023, more than 7000 tons of MWCNTs are being added to the electrodes of lithium-ion batteries in China.

Silicon has the highest theoretical lithium storage capacity of 4200 mAh/g, more than 10 times higher than that of traditional graphite anode (372 mAh/g). Therefore, it is considered a promising candidate as the anode of high energy density lithium-ion batteries. However, serious volume changes caused by lithium insertion/deinsertion lead to a rapid decay of the performance of the Si anode. Although a combination of silicon with MWCNTs have been demonstrated effective in improving the cycling life of the battery, the overall performance in terms of property, cost, and processing complexity has been unsatisfactory. Recently, it was found that SWCNT could be an ideal functional additive to the silicon anode. He et al. studied the electrochemical performance of SWCNT/Si-based and MWCNT/Si-based anode materials. It was found that higher initial discharge capacity, higher initial Coulombic efficiency and outstanding cyclic stability were achieved for the anode with SWCNT added. This is because that SWCNTs can maintain good contact with Si-based active material even under a tensile stress up to 6.2 GPa, while MWCNTs lose electrical contact due to alternating compressive stress up to 8.9 GPa and tensile stress up to 2.5 GPa during long-term cycling. Under such very large stresses, the more flexible SWCNTs and their stronger van der Waals forces ensure a good electrical contact between the silicon based active material and current collector. Actually, SWCNTs have been commercially used in silicon-based anode and high energy density batteries, and the market is predicted to be around 10 tons in 2024 in China.

Outlook and perspective

It has been more than 30 years since the discovery of CNTs. Notable progress and significant achievements have been made, however, great challenges and opportunities remain. Controlled growth of SWCNTs with specific diameter, chirality, and transport properties is extremely important from the viewpoint of both

fundament research and practical applications, particularly in nanoelectronics and nano-optoelectronics. The properties, especially the electrical conductivity, of SWCNTs are highly sensitive to their structures. To this day, it is still difficult to realise such fine control due to the narrow structural difference and formation energy of SWCNTs with distinct properties. Precisely revealing the growth mechanism of SWCNTs and developing efficient catalyst and growth method and setup would be a key to tackle the controlled growth problem. The application of CNTs is another ever-increasing issue of concern. The current applications of CNTs are mainly based on the superior electrical conductivity of CNTs when serving as a filler. Using this advantage, MWCNTs have been widely used in lithium-ion batteries, replacing the traditional carbon black additive.

Except for use in batteries, CNTs have also potential applications in electronics, composites, 3D-printing, heat-dissipation, transparent electrodes, advanced fibers, etc. The performance of CNT-based transparent conductive films is already good enough for touch panel applications. To meet the requirements of high-end applications, such as the photoelectrodes of solar cells, the optimisation of electrical conductivity, and network configuration of CNTs is required. Another important advantage of CNTs is their toughness and flexibility, thus CNTs have the potential to be used as parts in various newly developed flexible devices. In addition, CNT-reinforced composites with increased toughness and strength may find important applications in other specific areas. Highly conductive, strong and lightweight CNT fibers have shown promise for use in aerospace, electronics and national defense areas. According to predictions, both MWCNTs and SWCNTs would have a rapidly expanding market in the next ten years. It is worth noting that for each of the above potential applications, it is important to have CNTs with the desired structures and properties, and in many cases, at a low preparation cost.

REFERENCES

- [1] **M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, P.C. Eklund**, Science of fullerenes and carbon nanotubes. Academic Press, San Diego, 1996.
- [2] **R.F. Zhang et al.**, Growth of half-meter long carbon nanotubes based on schulz-flory distribution. ACS Nano 2013. 7: 6156–6161.
- [3] **M.S. Dresselhaus, P.C. Eklund**, Phonons in carbon nanotubes. Adv. Phys. 2000. 49: 705–814.
- [4] **S. Iijima**, Helical microtubules of graphitic carbon. Nature 1991. 354: 56–58.
- [5] **C. Liu et al.**, Semi-continuous synthesis of single-walled carbon nanotubes by a hydrogen arc discharge method, Carbon 1999. 37: 1865–1868.
- [6] **S. Iijima, T. Ichihashi**, Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. Nature 1993. 363: 603–605.
- [7] **D.S. Bethune et al.**, Cobalt-catalyzed growth of carbon nanotubes with single-atomic layer walls. Nature 1993. 363: 605–607.
- [8] **A. Thess et al.**, Crystalline ropes of metallic carbon nanotubes. Science 1996. 273: 483–487.
- [9] **W.Z. Li et al.**, Large-scale synthesis of aligned carbon nanotubes. Science 1996. 274: 1071–1073.
- [10] **H.M. Cheng et al.**, Large-scale and low-cost synthesis of single-walled carbon nanotubes by the catalytic pyrolysis of hydrocarbons. Applied Physics Letters 1998. 72: 3282–3284.
- [11] **P.X. Hou et al.**, Synthesis of carbon nanotubes by floating catalyst chemical vapor deposition and their applications. Advanced Functional Materials 2022. 32: 2108541.
- [12] **C. Liu, H.M. Cheng**, Controlled growth of semiconducting and metallic single-wall carbon nanotubes, Journal of the American Chemical Society 2016. 138: 6690–6698.
- [13] **K.B. Shelimov et al.**, Purification of single-wall carbon nanotubes by ultrasonically assisted filtration. Chemical Physics Letters 1998. 282: 429–434.
- [14] **A.P. Yu et al.**, Application of centrifugation to the large-scale purification of electric arc-produced single-walled carbon nanotubes. Journal of the American Chemical Society 2006. 128: 9902–9908.

- [15] **T.W. Ebbesen et al.**, Purification of carbon nanotubes. *Nature* 1994. 367: 519.
- [16] **P.X. Hou, C. Liu, H.M. Cheng**, Purification of carbon nanotubes. *Carbon* 2008. 46: 2003–2025.
- [17] **G.L. Che et al.**, Carbon nanotubule membranes for electrochemical energy storage and production. *Nature* 1998. 393: 346–349.
- [18] **G.T. Wu et al.**, Structural characterization and electrochemical lithium insertion properties of carbon nanotubes prepared by the catalytic decomposition of methane. *Journal of Solid State Electrochemistry* 2003. 7: 129–133.
- [19] **J.Y. Eom et al.**, Lithium insertion into purified and etched multi-walled carbon nanotubes synthesized on supported catalysts by thermal CVD. *Carbon* 2004 42: 2589–2596.
- [20] **S.S. Li et al.**, Vertically aligned carbon nanotubes grown on graphene paper as electrodes in lithium-ion batteries and dye-sensitized solar cells. *Advanced Energy Materials* 2011. 1: 486–490.
- [21] **L.B. Hu et al.**, Highly conductive paper for energy-storage devices. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2009. 106: 21490–21494.
- [22] **Z.Y. Wang et al.**, Assembling carbon-coated α - Fe_2O_3 hollow nanohorns on the CNT backbone for superior lithium storage capability. *Energy Environ Sci* 2012. 5: 5252–5256.
- [23] **G.M. Zhou et al.**, A nanosized Fe_2O_3 decorated single-walled carbon nanotube membrane as a high-performance flexible anode for lithium ion batteries. *J Mater Chem* 2012. 22: 17942–17946.
- [24] **L.F. Cui et al.**, Light-Weight Free-Standing Carbon Nanotube-Silicon Films for Anodes of Lithium Ion Batteries. *ACS Nano* 2010. 4: 3671–3678.
- [25] **A. Gohier et al.**, High-Rate Capability Silicon Decorated Vertically Aligned Carbon Nanotubes for Li-Ion Batteries. *Adv Mater* 2012. 24: 2592–2597.
- [26] **A.L.M. Reddy et al.**, Coaxial MnO_2 /carbon nanotube array electrodes for high-performance lithium batteries. *Nano Lett* 2009. 9: 1002–1006.
- [27] **H.K. Zhang et al.**, Enhanced lithium ion storage property of Sn nanoparticles: The confinement effect of few-walled carbon nanotubes. *J Phys Chem C* 2012. 116: 22774–22779.
- [28] **W.J. Yu et al.**, High reversible lithium storage capacity and structural changes of Fe_2O_3 nanoparticles confined inside carbon nanotubes. *Adv Energy Mater* 2016. 6: 1501755.
- [29] **W.J. Yu et al.**, Improved electrochemical performance of Fe_2O_3 nanoparticles confined in carbon nanotubes. *J Mater Chem* 2012. 22: 13756–13763.
- [30] **M. Endo et al.**, Vapor-grown carbon fibers (VGCFs) – Basic properties and their battery applications. *Carbon* 2001. 39: 1287–1297.
- [31] **Y. Zhang et al.**, Composite anode material of silicon/graphite/carbon nanotubes for Li-ion batteries. *Electrochim. Acta* 2006. 51:4994–5000.
- [32] **W.J. Yu et al.**, Lithiation of silicon nanoparticles confined in carbon nanotubes. *ACS Nano* 2015. 9: 5063–5071.
- [33] **Z.Y. He et al.**, Single-walled carbon nanotube film as an efficient conductive network for Si-based anodes. *Advanced Functional Materials* 2023. 33: 2300094.
- [34] **C. Liu, H.M. Cheng**, Carbon nanotubes: controlled growth and application. *Materials Today* 2013. 16: 19–28.
- [35] The Global Market for Graphene, Carbon Nanotubes, Carbon Nanofibers, Nanodiamonds, Fullerenes (Carbon Nanomaterials) and 2D Materials 2022–2032, Carbon Nanomaterials Market Report, 2022.

Энергетика. Электротехника Energetics. Electrical engineering

Научная статья

УДК 621.313.322

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30201>



*Е.Ф. Кади-Оглы*¹ ✉, *Н.В. Коровкин*²

¹ ООО «Турбинные технологии ААЭМ», Санкт-Петербург, Россия;

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ e.f.kadi-ogly@aaemturbines.com

МЕТОДИКА РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ТОКОВ И ПОТЕРЬ В ОБМОТКЕ ЯКОРЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ЦЕПНО-ПОЛЕВОЙ ПОСТАНОВКИ

Аннотация. В данной статье изложена методика расчета распределения магнитного поля, токов и потерь в пазовых частях стержневых обмоток якоря машин переменного тока. Методика основана на моделировании магнитного поля переменных токов методом конечных элементов в плоской постановке с присоединенной электрической цепью и учитывает транспозицию элементарных проводников стержней по длине пазовой части, кривизну магнитопровода, расположение стержней в пазу статора, особенности пазовой геометрии машины и схему соединения обмотки якоря. Методика позволяет моделировать различные режимы работы обмотки. Сравнительный анализ результатов расчета на основе обобщенной электрической машины переменного тока показывает приемлемость предлагаемой методики. Она может быть рекомендована при расчете потерь транспонированных обмоток переменного тока при проектировании и анализе электрических машин.

Ключевые слова: электрическая машина, магнитное поле, обмотка якоря, транспозиция проводников, потери в обмотке.

Для цитирования:

Кади-Оглы Е.Ф., Коровкин Н.В. Методика расчета магнитного поля, токов и потерь в обмотке якоря электрической машины переменного тока на основе цепно-полевой постановки // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 2. С. 22–34. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30201>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30201>*E.F. Kadi-Ogly*¹ ✉, *N.V. Korovkin*²¹ “Turbine technologies AAEM” LLC, St. Petersburg, Russia;² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia✉ e.f.kadi-ogly@aaemturbines.com

CALCULATION METHOD OF MAGNETIC FIELD, CURRENTS AND LOSSES IN THE ARMATURE WINDING OF AC ELECTRICAL MACHINE BASED ON FIELD-CIRCUIT FORMULATION

Abstract. This paper describes a calculation method of distribution of the magnetic field, currents and losses in the slot parts of AC machines armature winding bars. The method is based on modeling of AC magnetic field by finite element method in 2D formulation with linked electrical circuit and taking into account the transposition of strands along the length of the bar slot part, the curvature of magnetic core, the location of the bars in the stator slot, the features of the machine slot geometry and the diagram of armature winding connections. The method allows simulating different conditions of the winding operation. A comparative analysis of the calculation results based on a generalized AC electric machine shows the acceptability of the proposed method. This method could be recommended for calculating of the losses of transposed AC windings in the design and analysis of electrical machines.

Keywords: Electrical machine, magnetic field, armature winding, strands transposition, losses in winding.

Citation:

E.F. Kadi-Ogly, N.V. Korovkin, Calculation method of magnetic field, currents and losses in the armature winding of AC electrical machine based on field-circuit formulation, *Global Energy*, 30 (02) (2024) 22–34, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30201>

Введение. Современный уровень развития вычислительной техники и математического аппарата позволяет исследователям в области электроэнергетики расширять знания, проводить многовариантные и оптимизационные исследования с целью улучшения характеристик оборудования и повышения его энергетических показателей. Важным аспектом в современных условиях является применение российского программного обеспечения.

Исследование распределения магнитных полей, токов и потерь в пазовых частях стержневых обмоток якоря машин переменного тока является задачей актуальной, поскольку данный вопрос непосредственно связан с ростом КПД, прежде всего генерирующего оборудования, повышением надежности и снижением уровня эксплуатационных затрат [3, 4]. По данной теме опубликован ряд известных работ отечественных и зарубежных авторов, например [5–7, 12–15], которые основаны преимущественно на аналитических методах расчета. Большая часть современных работ направлена на решение этих задач в трехмерной постановке [8–11].

В данной статье изложена методика расчета данной задачи в конечно-элементном пакете ELCUT (<https://elcut.ru>), которая основана на моделировании магнитного поля переменных токов методом конечных элементов в плоской постановке с учетом электрической цепи и учитывает особенности транспозиции проводников стержней обмотки якоря, кривизну магнитопровода, расположение

стержней в пазе статора, особенности пазовой геометрии машины и схему соединения обмотки якоря. С учетом этого методика позволяет моделировать как симметричные, так и несимметричные режимы работы обмотки.

Для разработки данной методики принята модель электрической машины переменного тока, имеющей обобщенные эквивалентные параметры, не отнесенные к конкретной машине, но учитывающей основные конструктивные и физические соотношения, применимые к якорям электрических машин переменного тока с многофазными стержневыми обмотками [1, 2].

Материалы и методы исследования

Постановка задачи

Для решения задач магнитного поля переменных токов (гармонических магнитных полей) рассматриваются следующие уравнения в комплексных переменных, где функции представляют собой комплексные отображения гармонически изменяющихся величин с постоянной частотой:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} H = \delta \\ \operatorname{rot} E = -j\omega B \\ \operatorname{div} B = 0 \\ B = \operatorname{rot} A \\ B = \mu H \\ \delta = \gamma E \end{cases},$$

где, E – комплексный вектор напряженности электрического поля; H – комплексный вектор напряженности магнитного поля; B – комплексный вектор индукции магнитного поля; A – комплексный векторный магнитный потенциал; $\delta = \delta_{\text{ext}} + \delta_{\text{eddy}}$ – комплексный вектор плотности полного тока, который включает комплексные векторы плотности стороннего $\delta_{\text{ext}} = \gamma E$ и вихревого тока $\delta_{\text{eddy}} = j\omega \gamma A$; μ – тензор магнитной проницаемости среды (в общем случае зависит от координат и напряженности магнитного поля); γ – удельная электрическая проводимость среды (в общем случае зависит от температуры, а в трехмерной постановке – от направления координат); $\omega = 2\pi f$ – окружная частота; f – частота переменного тока; j – мнимая единица.

В плоской постановке (x, y) задача формулируется в символах комплексного векторного магнитного потенциала:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - j\omega \gamma A = -\delta_{\text{ext}}.$$

При постановке настоящей задачи приняты следующие допущения, не приводящие в общем случае к значительным погрешностям результатов расчета:

1. Поле плоскопараллельное. Рассматривается поперечное сечение машины.
2. Магнитная система ненасыщенная, однородная, изотропная. Принимается, что для стали якоря $\mu = 1000\mu_0$.
3. Линии магнитного поля не выходят за периферию сердечника якоря.
4. Моделируется только магнитное поле, возбужденное обмоткой якоря.
5. Ротор моделируется ферромагнитным цилиндром.
6. Сердечник якоря моделируется непроводящим, так как листы сердечника якоря изолируются между собой, а аксиальные (направление z) вихревые токи в железе статора по длине машины отсутствуют.

7. Пазовые клинья, изоляция элементарных проводников и переходов транспозиции, корпусная изоляция, все полупроводящие и непроводящие элементы выкладки паза моделируются воздушными промежутками.

8. Элементарные проводники медные.

9. Рассматривается только пазовая часть обмотки статора.

10. Не учитываются процессы, связанные с увеличением активного сопротивления проводников обмотки статора ввиду их нагрева.

Параметры обобщенной электрической машины

Обобщенная машина имеет следующие параметры:

- число пазов якоря $Z_1 = 12$;
- число фаз обмотки $m = 3$;
- число пар полюсов $2p = 2$;
- число пазов на полюс и фазу $q = 2$;
- укорочение обмотки $5/6$;
- число стержней в пазе $S_n = 2$;
- число параллельных ветвей обмотки $a = 2$;
- число элементарных проводников в стержне $M = 4$;
- транспозиция пазовой части стержней – 360° ;
- обмотка соединена в звезду;
- высота паза якоря $h_n = 83$ мм;
- ширина паза якоря $b_n = 30$ мм;
- ширина элементарного проводника стержня $a_{np} = 12$ мм;
- высота элементарного проводника $b_{np} = 10$ мм;
- диаметр расточки статора $D_1 = 200$ мм;
- внешний диаметр статора $D' = 450$ мм;
- диаметр ротора $D_2 = 170$ мм.

Принятые размеры поперечного сечения обобщенной электрической машины, размеры элементарных проводников, количество сечений, учитывающих дискретность переходов элементарных проводников, установлены из соображения минимизации сетки конечных элементов модели, простоты ее реализации и никакого принципиального влияния на методику расчета не оказывают.

Конечно-элементная модель и электрическая цепь

На рис. 1 представлена геометрическая модель данной задачи с конечно-элементной дискретизацией областей. Модель состоит из четырех сечений, каждое из которых моделирует дискретно участок, на котором определенные проводники в пределах своего стержня занимают положение в пазе в зависимости от их перемещения по длине машины при транспозиции с шагом $0, 90, \dots 360^\circ$. Одновременно в одной модели ELCUT рассматриваются различные сечения, связанные друг с другом электрической цепью. Принимается, что переходы элементарных проводников из одного положения проводников в другое в рамках одного стержня происходят дискретно. В нижней части данного рисунка представлен пример построения геометрии одного из сечений данной задачи с указанием граничных условий и построенной сеткой конечных элементов. Принят автоматический выбор шага сетки конечно-элементной дискретизации.

Граничные условия, обусловленные допущением 3, подразумевают установку на внешней границе расчетной области равенство нулю нормальной составляющей поля (граничное условие Дирихле) – $A = 0$.

Соединения элементарных проводников стержней, витков обмотки, а также питание обмотки осуществляется при помощи электрической цепи, сопряженной с конечно-элементной моделью. Электрическая цепь модели представлена на рис. 2.

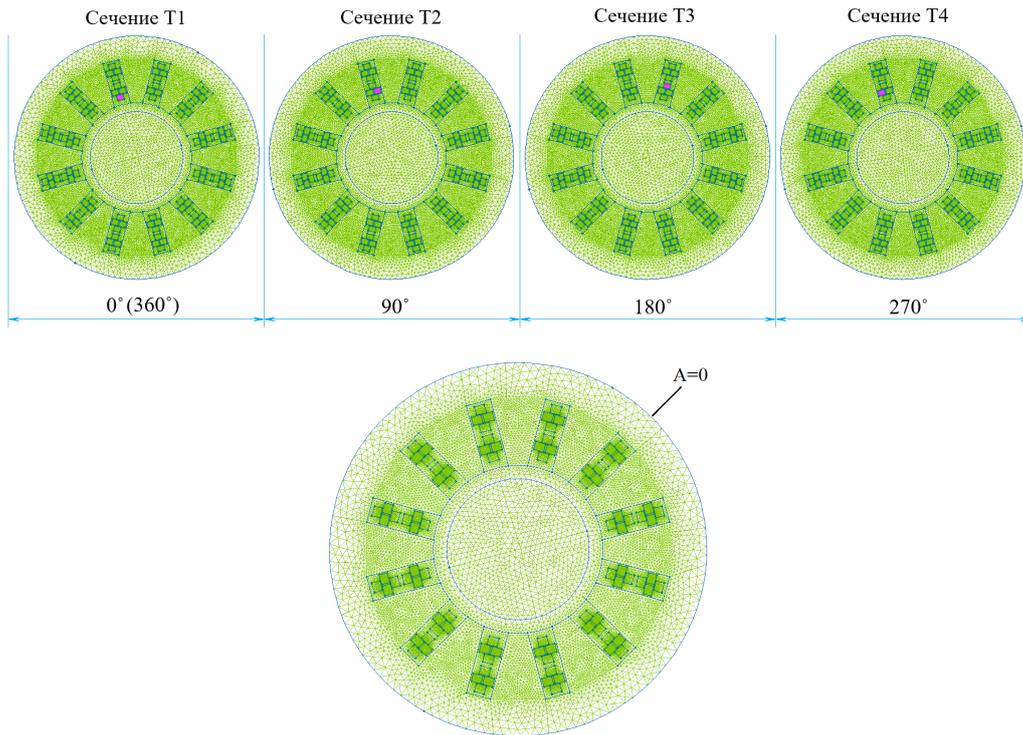


Рис. 1. Геометрическая модель и конечно-элементная дискретизация поперечного сечения электрической машины

Fig. 1. Geometric model and finite element discretization of the cross section of an electrical machine

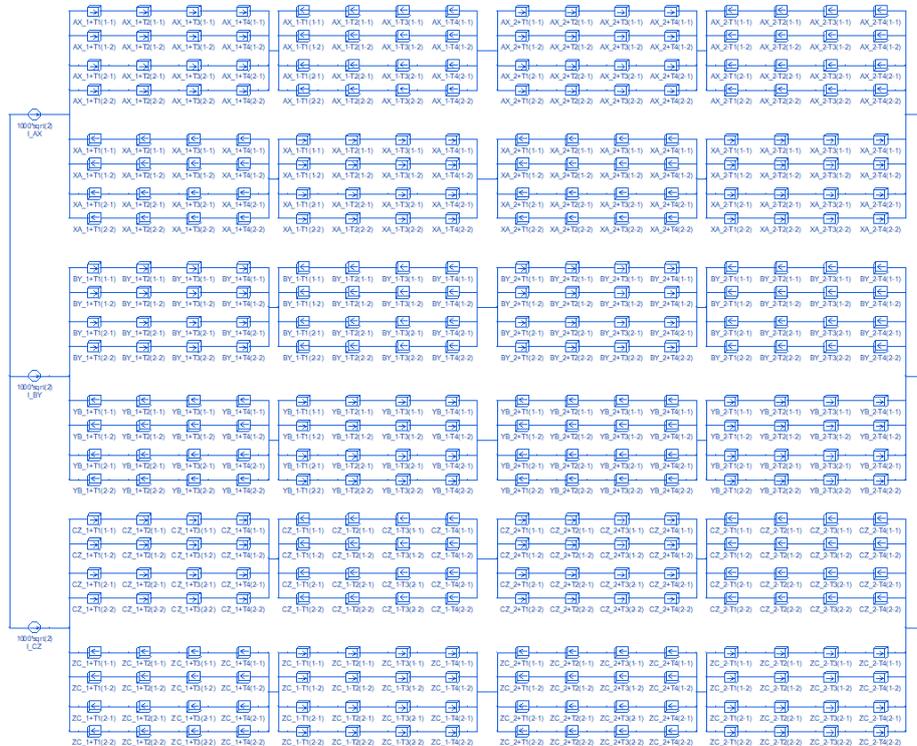


Рис. 2. Электрическая цепь модели

Fig. 2. Electrical circuit of the model

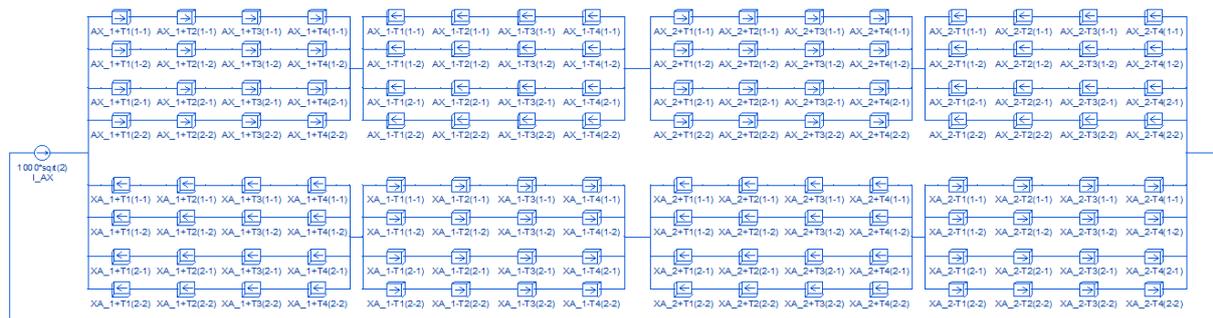


Рис. 3. Электрическая цепь одной фазы обмотки якоря
 Fig. 3. Electrical circuit of one phase of the armature winding

На рис. 3 представлена электрическая цепь одной фазы обмотки.

На рис. 2 и 3: $AX_1, AX_2, BY_1, BY_2, CZ_1, CZ_2, XA_1, XA_2, YB_1, YB_2, ZC_1, ZC_2$ – элементы фаз обмотки статора (в соответствии с правилами звезды); 1 и 2 – номера последовательного витка обмотки статора; «+» – обозначение верхнего стержня в пазе, «-» – обозначение нижнего стержня в пазе, последовательно соединенного с стержнем +; $T1, \dots, T4$ – номера сечений в соответствии с рис. 2; (1–1), (1–2), (1–3), (1–4) – обозначения проводников. В зависимости от сечения положения проводников в пазе меняются в соответствии с транспозицией. Направления стрелок на элементах цепи указывают на их положительное или отрицательное подключение, что позволяет учесть направление тока в конкретном элементе, моделируя таким образом изменение направления тока в сечении модели при переходе с одной части витка (верхней) в другую (нижнюю).

К началам (клеммам) фаз обмотки статора подключены источники тока, которые имеют следующие параметры:

$$\begin{aligned} i_{AX} &= 1000\sqrt{2} \cos(\omega t); \\ i_{BY} &= 1000\sqrt{2} \cos(\omega t - 120); \\ i_{CZ} &= 1000\sqrt{2} \cos(\omega t + 120). \end{aligned}$$

Концы фаз обмотки соединены в звезду.

Результаты расчета и обсуждение

На рис. 4 представлены результаты расчета распределения магнитного поля и плотности тока в элементарных проводниках стержней обмотки якоря. Представленная шкала соответствует действующему значению плотности полного тока с размерностью $[A/mm^2]$. Верхний рисунок соответствует начальной фазе по переменному току 0 эл. град., нижний – 90 эл. град. Перемещение картины полюсов магнитного поля в пространстве на 90° иллюстрирует вращающийся во времени характер магнитного поля с частотой вращения $n = 60 f/p$.

Цепно-полевая постановка позволяет получить не только пространственное распределение «полевых» характеристик с учетом соединения участков электрической цепи, включающих элементы, описываемые магнитным полем и моделируемые конечно-элементным методом, но и количественные значения токов, протекающих через все элементы электрической цепи, и напряжений, приложенных к данным элементам цепи.

На рис. 5 показаны некоторые результаты расчета электрической цепи рассматриваемой модели. В частности, на схеме представлена величина действующего значения полного тока через проводники (1–1) стержня AX_{1+} в сечениях $T1, \dots, T4$ и действующего значения напряжения,

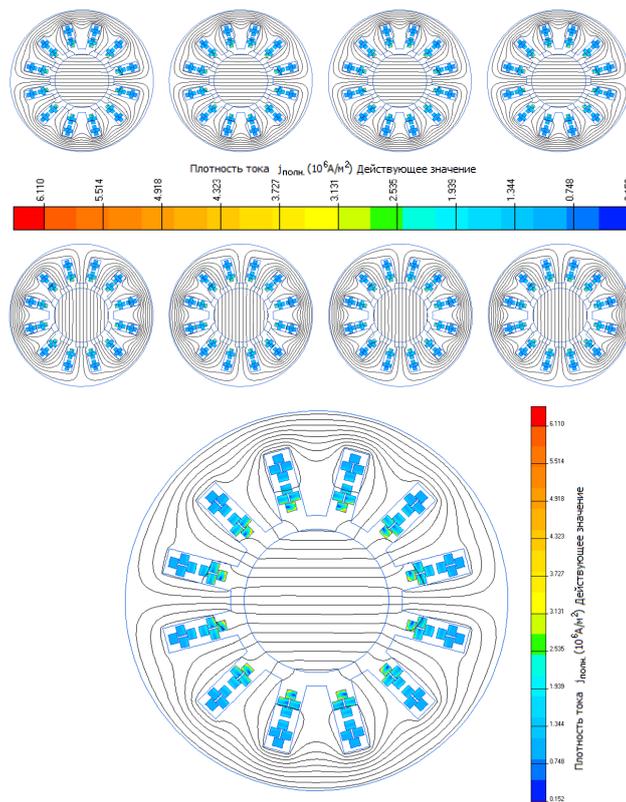


Рис. 4. Распределение магнитного поля и плотности полного тока всей модели (сверху) и в первом сечении $T1$ модели (снизу)

Fig. 4. Distribution of the magnetic field and total current density of the entire model (top) and in the first section $T1$ of the model (bottom)

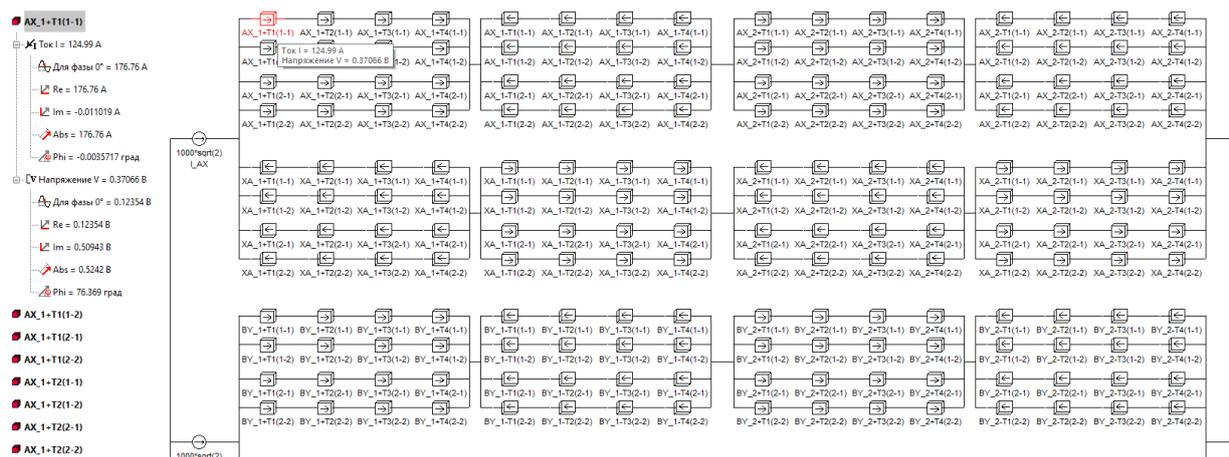


Рис. 5. Результаты расчета цепи
Fig. 5. Circuit calculation results

приложенного к проводнику $AX_{1+, T1(1-1)}$ в сечении $T1$. Кроме того, представлены мгновенное значение полного тока при фазе 0 эл. град., амплитуда, начальная фаза и комплексные составляющие полного тока через проводник $AX_{1+, T1(1-1)}$ и мгновенное значение напряжения при фазе

0 эл. град., амплитуда, начальная фаза и комплексные составляющие напряжения, приложенные к данному проводнику. Величина напряжения определяется параметрами каждого проводника в зависимости от его положения в конкретном месте в пазах для конкретного сечения модели.

Отношение комплексного напряжения, приложенного к каждому элементу к комплексному полному току, протекающему через него, дает возможность определить активные и индуктивные параметры каждого из элементарных проводников на любом участке модели: $z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \text{Re}(z) + j \text{Im}(z)$, где \dot{U} – комплексное значение напряжения, \dot{I} – комплексное значение тока, z – импеданс проводника.

При правильном построении модели суммы комплексных напряжений, приложенных к участкам цепи, образующим полный стержень обмотки (полувиток) через все сечения модели T1, ... T4 (например, $AX_{1+, T1(1-1)}, \dots, AX_{1+, T4(1-1)}, AX_{1-, T1(1-1)}, \dots, AX_{1-, T4(1-1)}$), должны быть равны. Равны должны быть также суммы напряжений, приложенных ко всем полным виткам (включая верхний и нижний стержень). То есть элементарные проводники каждого полувитка, проходя через все сечения, обеспечивают транспозицию стержней, отсутствие циркуляционных токов и равномерность потерь в них, а параметры обеих частей витка определяют суммарные потери во всем витке. Импеданс, активное и полное индуктивное сопротивление каждого проводника по длине стержня будут одинаковыми ($z_1 = z_k, R_1 = R_k, X_1 = X_k$), и равны алгебраической сумме указанных параметров по длине стержня. Результаты расчета, полученные на основании представленной модели, подтверждают данные выводы. В качестве иллюстрации в табл. 1 приведены расчетные параметры комплексных напряжений, приложенных к некоторым проводникам модели, относящимся к стержням AX_{1+} и AX_{1-} , образующим полный виток.

Таблица 1

Падение напряжения в проводниках модели, [В]

Table 1

Voltage drop in model strands, [V]

№ сечения	$AX_{1+, \dots (1-1)}$					$AX_{1-, \dots (1-1)}$				
	T1	T2	T3	T4	$\Sigma T1...T4$	T1	T2	T3	T4	$\Sigma T1...T4$
Re (\dot{U})	0.124	0.124	0.126	0.127	0.501	0.113	0.112	0.112	0.112	0.449
Im (\dot{U})	0.509	0.526	0.538	0.525	2.098	0.552	0.558	0.561	0.569	2.240
№ сечения	$AX_{1+, \dots (1-2)}$					$AX_{1-, \dots (1-2)}$				
	T1	T2	T3	T4	$\Sigma T1...T4$	T1	T2	T3	T4	$\Sigma T1...T4$
Re (\dot{U})	0.127	0.124	0.124	0.126	0.501	0.112	0.113	0.112	0.112	0.449
Im (\dot{U})	0.525	0.509	0.526	0.538	2.098	0.558	0.552	0.569	0.561	2.240

Из таблицы видно, что:

- активные составляющие напряжений в нижнем стержне меньше, чем в верхнем, поскольку суммарные потери (омические плюс добавочные) в верхних проводниках выше;
- индуктивные составляющие напряжений в нижнем стержне больше, чем в верхнем, поскольку индуктивность проводников, находящихся на дне паза, выше.

Это не противоречит принятым в практике теоретическим положениям [4].

Следует отметить также, что полные токи, протекающие в каждом из проводников, также равны между собой, а ток в каждом k -м проводнике равен:

$i_k = i / (a \cdot M)$, где i – фазный ток. Если $M = 4$, $a = 2$, $i = 1000$ А, то $i_k = 125$ А.

Для получения энергетических характеристик и оптимизации характеристик оборудования в области электромеханики представляет интерес ряд критериев, основным из которых является величина потерь в обмотке.

При расчете задач магнитного поля переменных токов величина потерь (мощности тепловыделения) вычисляется, исходя из выражения $P = \int_V \frac{\delta^2}{\gamma} dV$, где $\frac{\delta^2}{\gamma}$ – удельные потери, определяемые распределением плотности тока и рассчитанные на периоде переменного тока с учетом «глубины» модели (в плоской постановке – в направлении координаты z).

На рис. 6 представлено распределение удельных потерь (тепловыделения) в сечении $T1$ модели. Критерием для верификации модели является равенство интегральных потерь в проводниках и суммарные потери во всех проводниках стержней, находящихся в одинаковом положении в пазах якоря и относящихся к разным фазам.

В табл. 2 представлены сравнительные результаты расчета потерь (тепловыделения) в некоторых проводниках модели в сечении $T1$, отвечающих описанным критериям.

Таблица 2

Потери в проводниках модели, [Вт]

Table 2

Losses in model strands, [W]

	Номер проводника в стержне				$\Sigma AX_{1+, T1}$
	(1–1)	(1–2)	(2–1)	(2–2)	
$AX_{1+, T1}$	1.317	0.801	0.716	0.516	3.35
$ZC_{1+, T1}$	1.318	0.801	0.716	0.515	3.35

Интерес также представляет количественная оценка «разделенных» на составляющие потерь в стержнях обмотки якоря (омических и добавочных) и сравнение с классической оценкой коэффициента добавочных потерь (Фильда), представляющего собой отношение потерь при переменном токе к потерям при постоянном токе $k_{\Phi} = \frac{P_{\sim}}{P_{\underline{}}}$. При этом омические потери в данной методике определяются из расчета поля, используя имеющуюся модель. Потери P_{\sim} определяются интегрированием удельных потерь в стержне через все сечения при расчетной частоте модели (50 Гц). Потери $P_{\underline{}}$ определяются тем же методом при частоте, близкой к нулю (например, 0.0001 Гц).

В табл. 3 представлены результаты расчета потерь и коэффициенты Фильда, рассчитанные из расчета поля во всех рассмотренных выше вариантах моделирования и по аналитической методике [2].

Высокая величина коэффициента Фильда в сплошных проводниках (более 2) связана с их большой высотой, что, с одной стороны, необычно, но, с другой – на постановку задачи и методику расчета влияния не оказывает. Для всех вариантов расчета величина омических потерь является величиной постоянной, поскольку не определяется изменением магнитного поля.

Расхождение между результатом аналитического расчета коэффициента Фильда и численным расчетом (25%) для верхнего стержня является приемлемым. В случае расчета задачи с более тонкими проводниками эта разница уменьшится.

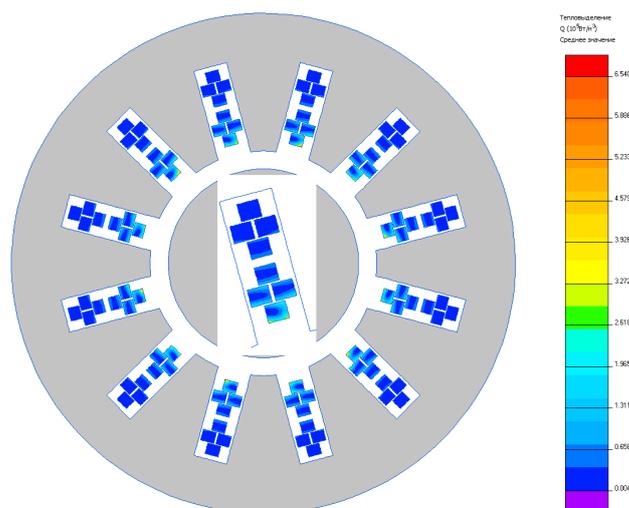


Рис. 6. Распределение удельных потерь (тепловыделения) в сечении T1 модели
 Fig. 6. Distribution of specific losses (heat release) in section T1 of the model

Таблица 3

Потери и коэффициенты Филда в стержнях обмотки якоря

Table 3

Losses and Field coefficients in armature winding bars

Стержень	Тип расчета	Потери, Вт		Коэффициент Филда	
		P_{\perp}	P_{\parallel}	k_{Φ}	Расхождение, %
AX_{1+}	Численный расчет	13.40	3.66	3.66	—
	Аналитический расчет [2]	—	—	2.92	25
ZC_{1+}	Численный расчет	4.76	3.65	1.30	—
	Аналитический расчет [2]	—	—	1.27	2.7

Заключение

1. В данной статье изложена методика расчета обмотки якоря электрической машины переменного тока на основе решения задачи магнитного поля переменных токов в цепно-полевой постановке в программном комплексе ELCUT.

2. Предложенная методика обладает рядом важных преимуществ над аналитическими методами, поскольку позволяет достаточно детально учесть транспозицию элементарных проводников стержней, шаг транспозиции, схему соединения стержней, схему соединения и питания обмотки якоря, и современными 3D-моделями, поскольку является математически более простой с точки зрения постановки, маневренной с точки зрения реализации режимов и позволяющей получить результат в наиболее короткие сроки.

3. Для оценки обоснованности постановки и достоверности результатов разработанной модели выполнен ряд численных экспериментов, показывающих, что:

- при симметричном питании поле является равномерно вращающимся;
 - падения напряжения в элементарных проводниках модели определяются их положением в пазе и стержне (в зависимости от рассматриваемого сечения) и соответствуют физическому представлению;
 - полные токи, протекающие в каждом из проводников, также равны между собой;
 - элементарные проводники каждого полувитка, проходя через все сечения, обеспечивают транспозицию стержней, отсутствие циркуляционных токов и равномерность потерь в них, а параметры обеих частей витка определяют суммарные потери во всем витке;
 - интегральные потери в проводниках и суммарные потери во всех проводниках стержней, находящихся в одинаковом положении в пазе якоря и относящихся к разным фазам, равны.
4. Сравнительный анализ результатов расчета показывает приемлемость предлагаемой методики, а методика может быть рекомендована при расчете потерь транспонированных обмоток переменного тока при проектировании и анализе электрических машин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Домбровский В.В., Хуторецкий Г.М.** Основы проектирования электрических машин переменного тока. Л.: Энергия, 1974. 504 с.
- [2] **Титов В.В., Хуторецкий Г.М. и др.** Турбогенераторы. Расчет и конструкция. Л.: Энергия, 1967. 895 с.
- [3] **Klempner G., Kerszenbaum I.** Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance (IEEE Press Series on Power Engineering). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008. 800 p.
- [4] **Кадис-Оглы Е.Ф., Цветков А.М., Plaza M., Sabater Y., Tromenschlager J.** Интеграция стандартных решений Astom по турбогенераторам для российских АЭС // Новое в российской электроэнергетике. 2015. № 7. С. 23–38.
- [5] **Haldemann J.** Transposition in Stator Bars of Large Turbogenerators. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2004. Vol. 19. No. P. 555–560. <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.832067>
- [6] **Iseli M.A., Reichert K., Neidhöfer G.** Calculation of current distribution and stray losses in arbitrarily transposed stator coils // Proceedings of the International Conference on Electrical Machines. Pisa, Italy. 1988. Vol. 2. P. 47–52.
- [7] **Бобков Ю.А.** Метод исследования транспозиции проводников стержня обмотки статора по обобщенным схемам // Электричество. 1987. № 8. С. 55–58.
- [8] **Кадис-Оглы Е.Ф., Шуваев И.Н.** Моделирование электромагнитного поля стержней обмотки статора электрических машин с различными типами транспозиции проводников // Электрические станции. 2022. № 11. С. 46–51. <https://doi.org/10.34831/EP.2022.1096.11.006>
- [9] **Kadi-Ogly E.F., Shuvaev I.N.** Simulation of Electromagnetic Field of Stator Winding Bars with Different Types of Strands Transposition // Power Technology and Engineering. 2023. Vol. 57. P. 163–168. <https://doi.org/10.1007/s10749-023-01637-2>
- [10] **Дергачев П.А., Венцеров М.С., Астафьев В.В.** Моделирование потерь в пазовой части обмотки статора турбогенератора с транспозицией элементарных проводников. Интеллектуальная электротехника // Интеллектуальная электроника. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород. 2023. № 4 (24). С. 4–17.
- [11] **Ryzhov V.V., Molokanov O.N., Dergachev P.A., Osipkin S.V., Kurbatova E.P., Kurbatov P.A.** Three-dimensional Mathematical Simulation of the Stator Slot of a Turbogenerator, Including Thermal Modeling and Flow Fluid Dynamics // 2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Jul. 01–04, 2021. Sofia: IEEE, 2021. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ELMA52514.2021.9502987>

[12] Wang C., Liang Y., Ni L., Wang D., Bian X. Calculation and Analysis of the Strands Short-Circuit in Stator Transposition Bar for Large Generators // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 36132–36139. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2905362>

[13] Bian X., Liang Y. Analysis on Eddy Current Losses in Stator Windings of Large Hydro-Generator Considering Transposed Structure Based on Analytical Calculation Method // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 163948–163957. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2949301>

[14] Selema A., Ibrahim M.N., Sergeant P. Mitigation of High-Frequency Eddy Current Losses in Hairpin Winding Machines // Machines. 2022. Vol. 10 (5). 328. <https://doi.org/10.3390/machines10050328>

[15] Hebala A., Nuzzo S., Connor P.H., Volpe G., Gerada C., Galea M. Analysis and Mitigation of AC Losses in High Performance Propulsion Motors // Machines. 2022. Vol. 10 (9). 780. <https://doi.org/10.3390/machines10090780>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КАДИ-ОГЛЫ Евгений Федорович – директор по электроэнергетическому оборудованию, Общество с ограниченной ответственностью «Турбинные технологии ААЭМ», канд. техн. наук.
E-mail: e.f.kadi-ogly@aaemturbines.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6042-8195>

КОРОВКИН Николай Владимирович – заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.
E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

REFERENCES

[1] V.V. Dombrovskiy, G.M. Hutoretskiy, *Osnovy proektirovaniia elektricheskikh mashin peremennogo toka* [Design basics of alternative current electrical machines], Energia, Leningrad, 1974.

[2] V.V. Titov, G.M. Hutoretskiy et al., *Turbogenerator. Raschet i konstruktsiia* [Turbogenerators. Calculation and design], Energia, Leningrad, 1967.

[3] G. Klemptner, I. Kerszenbaum, *Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2008.

[4] E.F. Kadi-Ogly, A.M. Tsvetkov, M. Plaza, Y. Sabater, J. Tromenschlager, *Integratsiia standartnykh reshenii Astom po turbogeneratoram dlia rossiiskikh AES* [Integration of Alstom standard Turbogenerators solutions for Russian NPPs], *New in the Russian Electrical Power-Engineering*, 7 (2015) 23–38.

[5] J. Haldemann, *Transposition in Stator Bars of Large Turbogenerators*. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(3) (2004) 553–560. <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.832067>

[6] M.A. Iseli, K. Reichert, G. Neidhöfer, *Calculation of Current Distribution and Stray Losses in Arbitrarily Transposed Stator Coils*, *Proceedings of the International Conference on Electrical Machines*, Pisa, Italy, 2 (1988) 47–52.

[7] U.A. Bobkov, *Generalized Schematic Analysis of Conductor Transposition on the Stator Winding Core*, *Electrichestvo* [Electricity], 8 (1987) 55–58.

[8] E.F. Kadi-Ogly, I.N. Shuvaev, *Modelirovanie elektromagnitnogo polia sterzhnei obmotki statora elektricheskikh mashin s razlichnymi tipami transpozitsii provodnikov* [Simulation of Electromagnetic Field of Electrical machines Stator Winding Bars with Different Types of Strands Transposition], *Electrical stations*, 11 (2022) 46–51. <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2022.1096.11.006>

[9] E.F. Kadi-Ogly, I.N. Shuvaev, *Simulation of Electromagnetic Field of Stator Winding Bars with Different Types of Strands Transposition*. *Power Technology and Engineering*, 57 (1) (2023) 163–168. <https://doi.org/10.1007/s10749-023-01637-2>

- [10] P.A. Dergachev, M.S. Ventserev, V.V. Astafjev, Modeling of Losses in Stator Windings Slot Part of Turbo Generator with Transposition of Strands. *Smart Electrical Engineering*, 4 (2023) 4–17. https://doi.org/10.46960/2658-6754_2023_4_04
- [11] V.V. Ryzhov, O.N. Molokanov, P.A. Dergachev, S.V. Osipkin, E.P. Kurbatova, P.A. Kurbatov, Three-dimensional mathematical simulation of the stator slot of a turbogenerator, including thermal modeling and flow fluid dynamics, 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Sofia, Bulgaria, (2021) 1–4. <https://doi.org/10.1109/ELMA52514.2021.9502987>
- [12] C. Wang, Y. Liang, L. Ni, D. Wang, X. Bian, Calculation and Analysis of the Strands Short-Circuit in Stator Transposition Bar for Large Generators, *IEEE Access*, 7 (2019) 36132–36139. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2905362>
- [13] X. Bian, Y. Liang, Analysis on Eddy Current Losses in Stator Windings of Large Hydro-Generator Considering Transposed Structure Based on Analytical Calculation Method, *IEEE Access*, 7 (2019) 163948–163957. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2949301>
- [14] A. Selema, M.N. Ibrahim, P. Sergeant, Mitigation of High-Frequency Eddy Current Losses in Hairpin Winding Machines, *Machines*, 10 (5) (2022) 328. <https://doi.org/10.3390/machines10050328>
- [15] A. Hebala, S. Nuzzo, P.H. Connor, G. Volpe, C. Gerada, M. Galea, Analysis and Mitigation of AC Losses in High Performance Propulsion Motors, *Machines*, 10 (9) (2022) 780. <https://doi.org/10.3390/machines10090780>

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Evgeny F. KADI-OGLY – *“Turbine technologies AAEM” Limited Liability Company.*
 E-mail: e.f.kadi-ogly@aaemturbines.com
 ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6042-8195>

Nikolay V. KOROVKIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
 E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

Поступила: 04.04.2024; Одобрена: 01.05.2024; Принята: 03.05.2024.
 Submitted: 04.04.2024; Approved: 01.05.2024; Accepted: 03.05.2024.

Научная статья

УДК 621.43 + 621.51

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30202>



А.М. Калашников ✉, *Г.И. Чернов*, *В.С. Евдокимов*

Омский государственный технический университет,
г. Омск, Россия

✉ kalashnikov_omgtu@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ПЕРЕДВИЖНОЙ КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ НА ОСНОВЕ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

Аннотация. В данной работе проводится анализ влияния на эффективность системы рекуперации тепловых потерь (СРТП) передвижной компрессорной станции (ПКС) основных параметров системы. В работе представлена схема СРТП передвижной компрессорной станции на основе использования холодильной машины для предварительного охлаждения сжимаемого газа. Также представлена разработанная математическая модель, позволяющая определить эффективность этой системы и провести расчет аппаратов и агрегатов, входящих в состав системы. На основе разработанной математической модели был проведен анализ зависимости коэффициента экономии топлива от КПД аппаратов и агрегатов СРТП. Полученные результаты показали, что основной вклад в работу СРТП на основе холодильной машины вносит теплота, отводимая от двигателя – привода компрессора, а также, что повышение эффективности аппаратов СРТП приводит к росту доли экономии топлива, которая может достигать 25%.

Ключевые слова: передвижная компрессорная станция, цикл Ренкина, система рекуперации тепловых потерь, холодильная машина, математическая модель.

Для цитирования:

Калашников А.М., Чернов Г.И., Евдокимов В.С. Математическая модель системы рекуперации тепловых потерь передвижной компрессорной станции на основе холодильной машины // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 2. С. 35–48. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30202>



A.M. Kalashnikov , G.I. Chernov, V.S. Evdokimov

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

 kalashnikov_omgtu@mail.ru

MATHEMATICAL MODEL OF THE WASTE HEAT RECOVERY SYSTEM OF A MOBILE COMPRESSOR STATION BASED ON A REFRIGERATION UNIT

Abstract. This paper analyzes the influence of the main parameters of the waste heat recovery system (WHRS) of a mobile compressor station (MCS) on its efficiency. The paper presents a WHRS chart of MCS based on the use of a refrigeration unit for pre-cooling of the compressed gas. Additionally, a mathematical model has been developed to determine the efficiency of the system and to calculate the devices and units that are part of the system. Based on the developed mathematical model, an analysis of the dependence of the fuel efficiency coefficient on the efficiency of the WHRS devices and units was conducted. The results obtained showed that the primary contribution to the operation of the WHRS based on the refrigeration unit is made by the heat discharged from the engine – the compressor drive, and it was demonstrated that an increase in the efficiency of the WHRS devices led to an increase in the fuel efficiency ratio, which can reach 25%.

Keywords: mobile compressor station, Rankine cycle, waste heat recovery system, refrigeration unit, mathematical model.

Citation:

A.M. Kalashnikov, G.I. Chernov, V.S. Evdokimov, Mathematical model of the waste heat recovery system of a mobile compressor station based on a refrigeration unit, *Global Energy*, 30 (02) (2024) 35–48, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30202>

Введение. Подавляющее количество энергии, генерируемой при сжигании углеводородного топлива в силовых агрегатах передвижных компрессорных станций (ПКС) выбрасывается в окружающую среду в виде тепла [1–3]. Возврат части этой энергии в технологическую схему ПКС за счет применения встроенных систем рекуперации позволяет существенно снизить удельный расход топлива, идущего на привод силового агрегата, а значит, повысить эффективность работы установки в целом. Анализ современной научно-технической литературы показал, что разработкам систем утилизации тепловых потерь энергетических и технологических установок уделяется большое внимание [4–16]. Вместе с тем передвижная компрессорная станция как объект применения системы рекуперации тепловых потерь (СРТП) до сих пор не рассматривалась. Это обстоятельство делает представленную работу актуальной.

Объектом исследования является ПКС с приводом от двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и СРТП на основе холодильной машины. Предметом исследования является энергетическая эффективность этой установки.

Математическая модель

Повышение экономичности мобильной компрессорной установки с приводом от ДВС и рекуперации тепловых потерь происходит за счет понижения температуры газа, подаваемого на всасывание в компрессор. При этом ограничимся рассмотрением такого режима работы, при котором температура нагнетаемого газа не ниже температуры окружающей среды. В основе этого способа лежит выражение для мощности политропного компрессора:

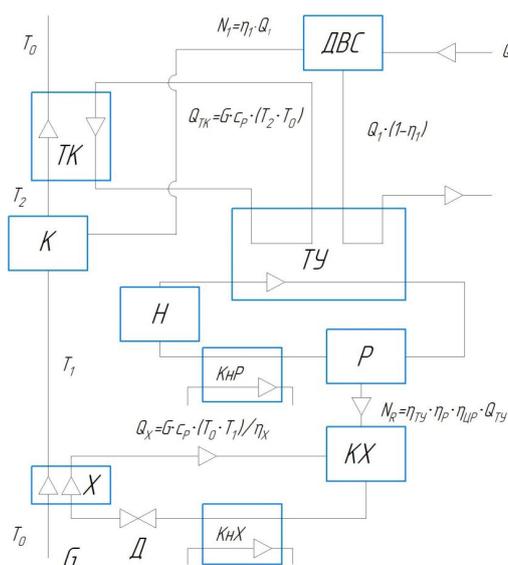


Рис. 1. Схема работы ПКС с СРТП на основе холодильной машины

Fig. 1. Operation scheme of the mobile compressor station (MCS) with a waste heat recovery system (WHRS) based on a refrigeration machine

$$N_0 = \frac{n}{n-1} \cdot G \cdot R \cdot T_0 \cdot \left(\pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right). \quad (1)$$

Из этого выражения следует, что при сохранении постоянными расхода газа G и степени повышения давления ($\pi = \text{Const}$) мощность, затрачиваемая на привод компрессора, может быть уменьшена за счет понижения температуры сжимаемого газа на входе в компрессор T_0 (в этом выражении n – показатель политропы, характеризующий интенсивность охлаждения сжимаемого в компрессоре газа, а R – газовая постоянная сжимаемого газа). Снижение мощности на привод компрессора уменьшает расход топлива в двигателе внутреннего сгорания, осуществляющего этот привод.

Понижение температуры газа может обеспечиваться отводом от него тепла, который реализует холодильная машина (ХМ). При этом энергию, подводимую к холодильной машине для обеспечения ее работы, генерирует теплосиловая установка, реализующая цикл Ренкина, которая преобразует тепловую энергию, отводимую от компрессорной установки и ее привода, в механическую энергию.

Схема, реализующая работу ПКС с СРТП, представлена на рис. 1.

На этой схеме: К – компрессор; ДВС – двигатель внутреннего сгорания, привод компрессора; Х – холодильный теплообменник, охлаждающий газ перед его сжатием в компрессоре К; ТК – концевой теплообменник, отводящий тепло от сжатого газа; Н – насос в контуре Ренкина; ТУ – теплообменник-утилизатор контура Ренкина; Р – расширительная машина контура Ренкина; КнР – конденсатор контура Ренкина; КХ – компрессор холодильного контура; КнХ – конденсатор холодильного контура; Д – дроссельный клапан холодильного контура.

Анализ работы СРТП строится на известных термодинамических уравнениях и соотношениях¹. Поток сжимаемого газа с массовым расходом G и температурой T_0 предварительно охлаждается в теплообменнике Х до температуры T_1 и поступает на сжатие в компрессор К, в котором повышает свое давление в π раз и температуру до значения T_2 . После компрессора сжатый

¹ Архаров А.М. Теплотехника. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 712 с.

газ поступает в концевой холодильник ТК, в котором охлаждается до температуры окружающей среды. Отведенная от потока сжатого газа в концевом холодильнике ТК тепловая мощность в количестве $\eta_{\text{ТК}} \cdot G \cdot c_p \cdot (T_2 - T_0)$ идет на нагрев в теплообменнике-утилизаторе ТУ рабочего вещества цикла Ренкина. В этом же теплообменнике-утилизаторе рабочее вещество дополнительно нагревается тепловым потоком, отведенным от двигателя внутреннего сгорания Д в количестве $Q_1 \cdot (1 - \eta_1)$. Подведенный к контуру Ренкина в теплообменнике-утилизаторе тепловой поток в количестве

$$Q_{\text{ТУ}} = \eta_{\text{ТК}} \cdot G \cdot c_p \cdot (T_2 - T_0) + Q_1 \cdot (1 - \eta_1) \quad (2)$$

преобразуется за счет реализации теплосилового цикла Ренкина в механическую мощность

$$N_p = \eta_{\text{ТУ}} \cdot \eta_p \cdot \eta_{\text{ЦР}} \cdot Q_{\text{ТУ}} \quad (3)$$

Эта мощность идет на привод холодильного компрессора КХ, который входит в состав холодильного контура, реализующего цикл ПКХМ. Этот контур содержит холодильный компрессор КХ, конденсатор КнХ, дроссельный вентиль Д и холодильный теплообменник Х, охлаждающий газ перед его сжатием в компрессоре К, отводя от газа тепловой поток в количестве

$$Q_x = \frac{G \cdot c_p}{\eta_x} \cdot (T_0 - T_1) \quad (4)$$

Холодильный коэффициент холодильного контура определяется соотношением

$$\varepsilon = \frac{Q_x}{N_p} \quad (5)$$

Предварительное охлаждение сжимаемого газа до температуры T_1 снижает затрачиваемую мощность от величины N_0 до значения

$$N_1 = \frac{n}{n-1} \cdot G \cdot R \cdot T_1 \cdot \left(\pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \quad (6)$$

Снижение потребной мощности до значения N_1 приводит к уменьшению тепловой мощности, выделяемой в ДВС от значения Q_0 до величины Q_1

$$N_0 = \eta_0 \cdot Q_0, \quad (7)$$

$$N_1 = \eta_1 \cdot Q_1, \quad (8)$$

что в свою очередь приводит к снижению расхода топлива от значения M_0 до величины M_1 , который связан с тепловой мощностью соотношением

$$Q = q \cdot M \quad (9)$$

В выражениях (7) – (9) q – удельная теплота сгорания топлива; η_0 и η_1 – КПД двигателя Д при режимах работы, обеспечивающих мощности N_0 и N_1 . В выражениях (2) – (4) c_p – удельная массовая изобарная теплоемкость; η_x , $\eta_{\text{ТУ}}$, $\eta_{\text{ТК}}$, η_p , $\eta_{\text{ЦР}}$ – КПД соответственно холодильного

теплообменника, теплообменника-утилизатора, конечного холодильника, расширительной машины, цикла Ренкина.

Целью построения математической модели является определение экономии топлива, которое можно выразить коэффициентом расхода топлива $\frac{M_1}{M_0}$.

Подставив (9) в выражения (7) и (8) и деля полученные уравнения друг на друга, получим

$$\frac{N_1}{N_0} = \frac{\eta_1 \cdot M_1}{\eta_0 \cdot M_0}. \quad (10)$$

С другой стороны, отношение выражений (6) и (1) равно:

$$\frac{N_1}{N_0} = \frac{T_1}{T_0}. \quad (11)$$

Сравнивая (10) и (11), получим

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{\eta_1 \cdot M_1}{\eta_0 \cdot M_0}$$

или

$$\frac{M_1}{M_0} = \frac{T_1}{T_0} \cdot \frac{\eta_0}{\eta_1}. \quad (12)$$

Выражение (12) показывает, что коэффициент расхода топлива пропорционален отношению температур сжимаемого газа на входе в компрессор. Таким образом, задача решения математической модели состоит в определении отношения температур $\frac{T_1}{T_0}$.

Исходными данными для этой задачи являются величины $\eta_0, \eta_1, T_0, \zeta, \eta_{TK}, \eta_{TY}, \eta_p, \eta_{ЦР}, \eta_X, k, n$.

Умножим числитель и знаменатель холодильного коэффициента на мощность соответствующего цикла Карно:

$$\varepsilon = \frac{Q_X}{N_p} \cdot \frac{N_K}{N_K} = \frac{Q_X}{N_K} \cdot \frac{N_K}{N_p}.$$

Отношение $\frac{Q_X}{N_K}$ представляет собой холодильный коэффициент холодильного цикла Карно, который можно представить в виде

$$\varepsilon_K = \frac{Q_X}{N_p} = \frac{T_1}{T_0 - T_1}.$$

Отношение $\frac{N_K}{N_p}$ можно назвать коэффициентом подобия действительного холодильного холодильному циклу Карно, который характеризует энергетическую эффективность затрат мощности в холодильном цикле. Это соотношение можно обозначить

$$\zeta = \frac{N_K}{N_P}$$

Таким образом, холодильный коэффициент холодильного контура можно представить в виде

$$\varepsilon = \frac{T_1}{T_0 - T_1} \cdot \zeta. \quad (13)$$

Приравняем выражения (5) и (13):

$$\frac{T_1}{T_0 - T_1} \cdot \zeta = \frac{Q_X}{N_P},$$

и в полученное уравнение подставим (3) и (4):

$$\frac{T_1}{T_0 - T_1} \cdot \zeta = \frac{G \cdot c_p \cdot (T_0 - T_1)}{\eta_X \cdot \eta_{ТУ} \cdot \eta_P \cdot \eta_{ЦП} \cdot Q_{ТУ}}$$

В это выражение вместо $Q_{ТУ}$ подставим (2):

$$\frac{T_1}{T_0 - T_1} \cdot \zeta = \frac{G \cdot c_p \cdot (T_0 - T_1)}{\eta_X \cdot \eta_{ТУ} \cdot \eta_P \cdot \eta_{ЦП} \cdot [\eta_{ТК} \cdot G \cdot c_p \cdot (T_2 - T_0) + Q_1 \cdot (1 - \eta_l)]}$$

T_2 заменим в соответствии с $T_2 = T_1 \cdot \pi^{\frac{n-1}{n}}$:

$$\frac{T_1}{T_0 - T_1} \cdot \zeta = \frac{G \cdot c_p \cdot (T_0 - T_1)}{\eta_X \cdot \eta_{ТУ} \cdot \eta_P \cdot \eta_{ЦП} \cdot \left[\eta_{ТК} \cdot G \cdot c_p \cdot \left(T_1 \cdot \pi^{\frac{n-1}{n}} - T_0 \right) + Q_1 \cdot (1 - \eta_l) \right]}$$

Вынесем за скобки числителя и знаменателя T_0 и сократим обе части уравнения на эту величину:

$$\frac{T_1/T_0}{1 - T_1/T_0} \cdot \zeta = \frac{G \cdot c_p \cdot \left(1 - \frac{T_1}{T_0} \right)}{\eta_X \cdot \eta_{ТУ} \cdot \eta_P \cdot \eta_{ЦП} \cdot \left[\eta_{ТК} \cdot G \cdot c_p \cdot \left(\frac{T_1}{T_0} \cdot \pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) + Q_1 \cdot (1 - \eta_l) \right]}$$

Приведем последнее уравнение к общему знаменателю:

$$\frac{T_1}{T_0} \cdot \zeta \cdot \eta_{ТУ} \cdot \eta_P \cdot \eta_{ЦП} \cdot \left[\eta_{ТК} \cdot G \cdot c_p \cdot \left(\frac{T_1}{T_0} \cdot \pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) + \frac{Q_1}{T_0} \cdot (1 - \eta_l) \right] = \eta_X \cdot G \cdot c_p \cdot \left(1 - \frac{T_1}{T_0} \right)^2$$

Заменим Q_1 в соответствии с

$$Q_1 = \frac{N_1}{\eta_l} = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{G \cdot R \cdot T_1}{\eta_l} \cdot \left(\pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right).$$

Получим

$$\begin{aligned} & \frac{T_1}{T_0} \cdot \zeta \cdot \eta_X \cdot \eta_{TY} \cdot \eta_P \cdot \eta_{ЦП} \times \\ & \times \left[\eta_{ТК} \cdot G \cdot c_P \cdot \left(\frac{T_1}{T_0} \cdot \pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) + \frac{n}{n+1} \cdot \frac{G \cdot R}{\eta_l} \cdot \frac{T_1}{T_0} \cdot \left(\pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \cdot (1 - \eta_l) \right] = \\ & = G \cdot c_P \cdot \left(1 - \frac{T_1}{T_0} \right)^2. \end{aligned}$$

После математических преобразований последнее уравнение сведем к квадратному уравнению относительно соотношения $\frac{T_1}{T_0}$:

$$\begin{aligned} & \left\{ \zeta \cdot \eta_X \cdot \eta_{TY} \cdot \eta_P \cdot \eta_{ЦП} \cdot \left[\eta_{ТК} \cdot \pi^{\frac{n-1}{n}} + \frac{n}{n-1} \cdot \frac{k-1}{k} \cdot \left(\pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{\eta_l} - 1 \right) \right] - 1 \right\} \times \\ & \times \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^2 + (2 - \zeta \cdot \eta_X \cdot \eta_{TY} \cdot \eta_P \cdot \eta_{ЦП} \cdot \eta_{ТК}) \cdot \frac{T_1}{T_0} - 1 = 0. \end{aligned}$$

Решая это квадратное уравнение через дискриминант, получим

$$\begin{aligned} \frac{T_1}{T_0} = & \left(\frac{-\left(2 - \zeta \cdot \eta_{TY} \cdot \eta_P \cdot \eta_{ЦП} \cdot \eta_{ТК} \right) + \sqrt{\left(2 - \zeta \cdot \eta_X \cdot \eta_{TY} \cdot \eta_P \cdot \eta_{ЦП} \cdot \eta_{ТК} \right)^2 + 4 \cdot \left\{ \zeta \cdot \eta_X \cdot \eta_{TY} \cdot \eta_P \cdot \eta_{ЦП} \cdot \left[\eta_{ТК} \cdot \pi^{\frac{n-1}{n}} + \frac{n}{n-1} \cdot \frac{k-1}{k} \cdot \left(\pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{\eta_l} - 1 \right) \right] - 1 \right\}}}{2 \cdot \left\{ \zeta \cdot \eta_X \cdot \eta_{TY} \cdot \eta_P \cdot \eta_{ЦП} \cdot \left[\eta_{ТК} \cdot \pi^{\frac{n-1}{n}} + \frac{n}{n-1} \cdot \frac{k-1}{k} \cdot \left(\pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{\eta_l} - 1 \right) \right] - 1 \right\}} \right) \times \\ & \times \frac{1}{2 \cdot \left\{ \zeta \cdot \eta_X \cdot \eta_{TY} \cdot \eta_P \cdot \eta_{ЦП} \cdot \left[\eta_{ТК} \cdot \pi^{\frac{n-1}{n}} + \frac{n}{n-1} \cdot \frac{k-1}{k} \cdot \left(\pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{\eta_l} - 1 \right) \right] - 1 \right\}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Зная отношение $\frac{T_1}{T_0}$, в соответствии с (12) находим коэффициент расхода топлива $\frac{M_1}{M_0}$, а также коэффициент экономии топлива (долю сэкономленного топлива):

$$K_{\mathcal{E}} = 1 - \frac{M_1}{M_0}. \quad (15)$$

Также можно найти потребную мощность двигателя – привода N_1 :

$$N_1 = \frac{n}{n-1} \cdot G \cdot R \cdot T_1 \cdot \left(\pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right),$$

тепловые нагрузки на основные аппараты:

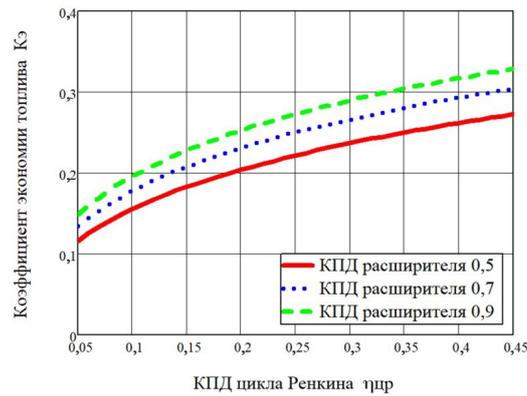


Рис. 2. Зависимость коэффициента экономии топлива K_3 от КПД цикла Ренкина $\eta_{ЦР}$ при разных значениях КПД расширителя

Fig. 2. Dependence of the fuel efficiency coefficient (FEC) K_3 on the Rankine cycle efficiency η_{CR} at different values of expander efficiency

$$Q_{ТУ} = \eta_{ТК} \cdot G \cdot c_p \cdot \left(T_1 \cdot \pi^{\frac{n-1}{n}} - T_0 \right) + \frac{n}{n-1} \cdot \frac{G \cdot R \cdot T_1}{\eta_1} \cdot \left(\pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \cdot (1 - \eta_1),$$

$$Q_X = \eta_X \cdot G \cdot c_p \cdot (T_0 - T_1),$$

$$Q_{ТК} = \eta_{ТК} \cdot G \cdot c_p \cdot \left(T_1 \cdot \pi^{\frac{n-1}{n}} - T_0 \right),$$

и мощность расширителя контура Ренкина, которая одновременно является мощностью холодильного компрессора:

$$N_{КХ} = N_R = \eta_{ТУ} \cdot \eta_p \cdot \eta_{ЦР} \cdot Q_{ТУ}.$$

Результаты исследований

На основе выражения (15) можно получить зависимости коэффициента экономии топлива КЭ от основных параметров, таких как η_X , $\eta_{ТУ}$, $\eta_{ТК}$, η_p , $\eta_{ЦР}$ – КПД холодильного теплообменника, теплообменника-утилизатора, конечного холодильника, расширительной машины, цикла Ренкина. Эти зависимости представлены на рис. 2–5. Если КПД теплообменника при построении этих зависимостей рассматривался как постоянная величина, он принимался равным 0,8. Постоянный КПД расширителя принимался равным 0,5, КПД двигателя – привода компрессора равен 0,25, постоянный КПД цикла Ренкина равен 0,2. Коэффициент подобия холодильного цикла ζ определялся сравнением площадей в $T-S$ диаграмме цикла одноступенчатой холодильной машины (с учетом потерь работоспособности на дросселирование) и холодильного цикла Карно той же холодопроизводительности. На основе этого сравнения ζ принимался равным 0,5 и его можно принять постоянным на всем температурном диапазоне применения холодильных установок на основе одноступенчатого парокомпрессионного цикла.

На рис. 6 представлены графики зависимостей коэффициента экономии топлива K_3 от КПД цикла Ренкина $\eta_{ЦР}$ при использовании тепла сжатию и тепла двигателя, а также при использовании тепла только двигателя.

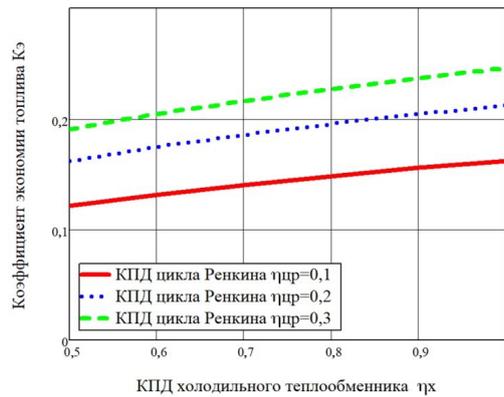


Рис. 3. Зависимость коэффициента экономии топлива $K_{э}$ от КПД холодильного теплообменника $\eta_{х}$ при разных значениях КПД цикла Ренкина $\eta_{ЦР}$

Fig. 3. Dependence of the FEC $K_{э}$ on the efficiency of the refrigeration heat exchanger $\eta_{х}$ at different values of the Rankine cycle efficiency η_{CR}

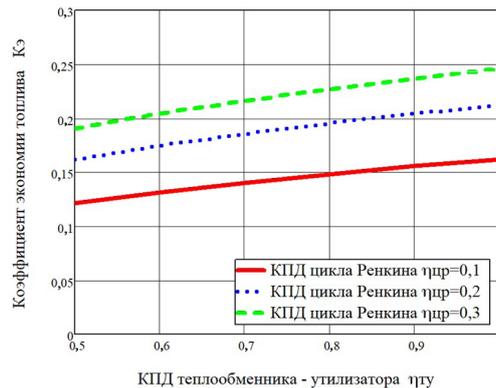


Рис. 4. Зависимость коэффициента экономии топлива $K_{э}$ от КПД теплообменника-утилизатора $\eta_{ТУ}$ при разных значениях КПД цикла Ренкина $\eta_{ЦР}$

Fig. 4. Dependence of the FEC $K_{э}$ on the efficiency of the heat exchanger-utilizer $\eta_{У}$ at different values of the Rankine cycle efficiency η_{CR}

Анализ полученных результатов

Из графиков рис. 4 видно, что значение коэффициента экономии топлива $K_{э}$ возрастает при росте величин $\eta_{ТУ}$, $\eta_{ТК}$. Увеличение КПД теплообменников приводит к росту теплового потока, подводимому к контуру Ренкина, что увеличивает механическую мощность контура, т.е. мощность холодильного компрессора. В итоге достигается более глубокое охлаждение входящего в компрессор газа, а значит, снижается мощность сжатия и уменьшается расход топлива в двигателе – приводе компрессора.

Из графиков рис. 3 следует, что рост КПД холодильного теплообменника $\eta_{х}$ приводит к росту экономии топлива, так как рост интенсивности отвода тепла от сжимаемого газа приводит к более глубокому его охлаждению.

На графиках рис. 2, 5 видно, что увеличение КПД расширителя $\eta_{р}$ и КПД цикла Ренкина $\eta_{ЦР}$ приводит к росту коэффициента экономии топлива $K_{э}$, так как улучшение характеристик конура

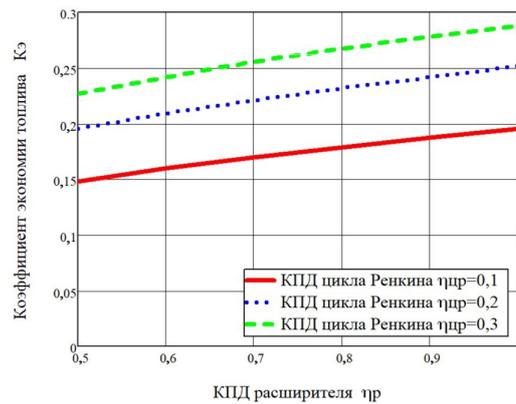


Рис. 5. Зависимость коэффициента экономии топлива K_s от КПД расширителя η_p при разных значениях КПД цикла Ренкина η_{CR}

Fig. 5. Dependence of the FEC K_s on the efficiency of the expander η_p at different values of the Rankine cycle efficiency η_{CR}

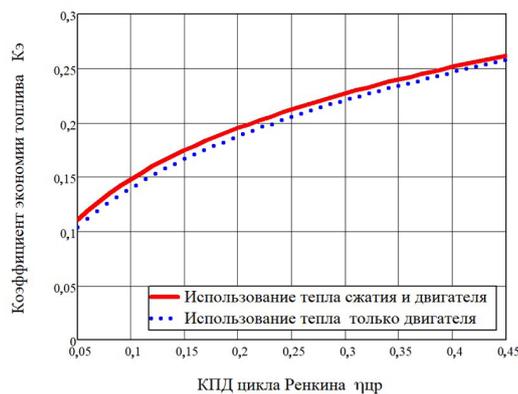


Рис. 6. Зависимость коэффициента экономии топлива K_s от КПД цикла Ренкина η_{CR} при использовании тепла сжатия и тепла двигателя, а также при использовании тепла только двигателя

Fig. 6. Dependence of the FEC K_s on the Rankine cycle efficiency η_{CR} when using heat from compression and engine, as well as when using only engine heat

Ренкина приводит к росту его мощности, а значит, к холодопроизводительности холодильного цикла и глубине охлаждения на входе в компрессор сжимаемого газа.

Из рис. 6 видно, что использование тепла сжатия, отводимого через концевой теплообменник, значительно увеличивает экономию топлива. Поэтому основной вклад в работу СРТП на основе холодильной машины вносит теплота, отводимая от двигателя – привода компрессора.

Заключение

В представленной работе приведена схема системы рекуперации тепловых потерь передвижной компрессорной станции на основе использования холодильной машины для предварительного охлаждения перед компрессором сжимаемого газа. Исходя из этой схемы и основных термодинамических соотношений, была построена математическая модель, позволяющая определить эффективность этой системы и провести расчет аппаратов и агрегатов, входящих в состав системы. На основе разработанной математической модели был проведен анализ влияния на эффективность

СРТП характеристик ее аппаратов и агрегатов. Он показал, что повышение их эффективности приводит к росту доли экономии топлива, которая может достигать 25%, что видно из графиков рис. 2–5.

Список обозначений

К – компрессор;
 ДВС – двигатель внутреннего сгорания, привод компрессора К;
 Х – холодильный теплообменник, охлаждающий газ перед его сжатием в компрессоре К;
 ТК – концевой теплообменник, отводящий тепло от сжатого газа;
 Н – насос в контуре Ренкина;
 ТУ – теплообменник-утилизатор контура Ренкина;
 Р – расширительная машина контура Ренкина;
 КнР – конденсатор контура Ренкина;
 КХ – компрессор холодильного контура;
 КнХ – конденсатор холодильного контура;
 Д – дроссельный клапан холодильного контура.
 G – массовый расход газа;
 Π – степень повышения давления;
 T_0 – температура окружающей среды;
 n – показатель политропы, характеризующий интенсивность охлаждения сжимаемого в компрессоре газа;
 R – газовая постоянная сжимаемого газа;
 q – удельная теплота сгорания топлива;
 η_0 – КПД двигателя Д при режиме работы, обеспечивающем мощность N_0 ;
 η_1 – КПД двигателя Д при режиме работы, обеспечивающем мощность N_1 ;
 c_p – удельная массовая изобарная теплоемкость;
 η_X – КПД холодильного теплообменника;
 $\eta_{ТУ}$ – КПД теплообменника-утилизатора;
 $\eta_{ТК}$ – КПД концевой холодильника;
 η_P – КПД расширительной машины;
 $\eta_{ЦР}$ – КПД цикла Ренкина;
 ε – холодильный коэффициент холодильного контура;
 Q_0 – тепловая мощность, выделяемая в ДВС без рекуперации тепла;
 Q_1 – тепловая мощность, выделяемая в ДВС при рекуперации тепла;
 M_0 – расход топлива в ДВС без рекуперации тепла;
 M_1 – расход топлива в ДВС при рекуперации тепла;
 $Q_{ТУ}$ – тепловой поток, подведенный к контуру Ренкина в теплообменнике-утилизаторе;
 Q_X – тепловой поток, отводимый от газа перед его сжатием в компрессоре К;
 N_K – мощность обратимого холодильного цикла Карно;
 N_P – мощность контура Ренкина;
 T_1 – температура охлажденного газа перед компрессором.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Луканин В.Н. Двигатели внутреннего сгорания: теория рабочих процессов. М.: Высшая школа, 2007. 479 с.
- [2] Селиверстов В.М. Утилизация тепла в судовых дизельных установках. Л.: Судостроение, 1973. 256 с.

- [3] **Cha J.E., Park J.H., Lee G., Seo H., Lee S., Chung H.-J., Lee S. W.** 500 kW supercritical CO₂ power generation system for waste heat recovery: System design and compressor performance test results // *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 194. 117028. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117028>
- [4] **Yusha V.L., Chernov G.I., Kalashnikov A.M.** Analysis of the thermal efficiency of solid and vacuum thermal insulation in an exchanger of the heat losses recovery system in mobile com-pressor units // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2141 (1). 030069. <https://doi.org/10.1063/1.5122119>
- [5] **Kalashnikov A.M., A.A., Kapelyukhovskaya A.A.** Analysis of the application of the heat loss recovery system for the drive of process equipment // *AIP Conference Proceedings*. 2021. Vol. 2412 (1). 30033. <https://doi.org/10.1063/5.0075032>
- [6] **Юша В.Л., Чернов Г.И.** Анализ термодинамической эффективности применения цикла Ренкина в системе рекуперации тепловых потерь компрессорной установки с приводным двигателем внутреннего сгорания // *Омский научный вестник. Серия «Приборы, машины и технологии»*. 2013. № 2 (120). С. 254–261.
- [7] **Tsai B.-J., Wang Y.L.** A novel Swiss-Roll recuperator for the microturbine engine // *Applied Thermal Engineering*. 2009. Vol. 29. Iss. 2–3. P. 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.02.028>
- [8] **Xia C., Zhang Z., Huang G., Xu Y.** Study on the new hybrid thermodynamic cycle for an improved micro swing engine with heat recovery process // *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 129. P. 1135–1149. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.123>
- [9] **Negash A., Kim Y.M., Shin D.G., Cho G.B.** Optimization of organic Rankine cycle used for waste heat recovery of construction equipment engine with additional waste heat of hydraulic oil cooler // *Energy*. 2018. Vol. 143. P. 797–811. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.004>
- [10] **Sadeghi S., Ghandehariun S., Naterer G.F.** Exergoeconomic and multi-objective optimization of a solar thermochemical hydrogen production plant with heat recovery // *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 225. 113441. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113441>
- [11] **Elmas E.T.** Design and production of high temperature heat pipe heat recovery units // *Journal of Molecular Structure*. 2020. Vol. 1212. 127927. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.127927>
- [12] **Zhang X., Xiang N., Pan H., Yang X., Wu J., Zhang Y., Luo H., Xu C.** Performance comparison of cement production before and after implementing heat recovery power generation based on energy analysis and economic evaluation: A case from China // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 290. 125901. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125901>
- [13] **Cioccolanti L., Renzi M., Comodi G.** District heating potential in the case of low-grade waste heat recovery from energy intensive industries // *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 191. 116851. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116851>
- [14] **Aboelazayem O., Gadalla M., Alhajri I., Saha B.** Advanced process integration for supercritical production of biodiesel: Residual waste heat recovery via organic Rankine cycle (ORC) // *Renewable Energy*. 2021. Vol. 164. P. 433–443. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.058>
- [15] **Kumar A., Rakshit D.** A critical review on waste heat recovery utilization with special focus on Organic Rankine Cycle applications // *Cleaner Engineering and Technology*. 2021. Vol. 5.292. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100292>
- [16] **Wang F., Wang L., Zhang H., Xia L., Miao H., Yuan J.** Design and optimization of hydrogen production by solid oxide electrolyzer with marine engine waste heat recovery and ORC cycle // *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 229. 113775. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113775>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КАЛАШНИКОВ Александр Михайлович – старший преподаватель, Омский государственный технический университет, без степени.

E-mail: kalashnikov_omgtu@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6847-4937>

ЧЕРНОВ Герман Игоревич – доцент, Омский государственный технический университет, канд. техн. наук.

E-mail: gi_chernov2002@mail.ru

ЕВДОКИМОВ Владимир Сергеевич – старший преподаватель, Омский государственный технический университет, без степени.

E-mail: omgtu_evdokimov@mail.ru

REFERENCES

- [1] **V.N. Lukanin**, Dvigateli vnutrennego sgoraniia: teoriia rabochikh protsessov [Internal combustion engines: theory of work processes], Vysshaya shkola Publ., Moscow, 2007.
- [2] **V.M. Seliverstov**, Utilizatsiia tepla v sudovykh dizel'nykh ustanovkakh [Heat recovery in marine diesel plants], Sudostroenie, Leningrad, 1973.
- [3] **J.E. Cha, J.H. Park, G. Lee, H. Seo, S. Lee, H.-J. Chung, S. W. Lee**, 500 kW supercritical CO₂ power generation system for waste heat recovery: System design and compressor performance test results, Applied Thermal Engineering, 194 (2021) 117028. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117028>
- [4] **V.L. Yusha, G.I. Chernov, A.M. Kalashnikov**, Analysis of the thermal efficiency of solid and vacuum thermal insulation in an exchanger of the heat losses recovery system in mobile compressor units, AIP Conference Proceedings, 2141 (1) (2019) 030069. <https://doi.org/10.1063/1.5122119>
- [5] **A.M. Kalashnikov, A.A. Kapelyukhovskaya**, Analysis of the application of the heat loss recovery system for the drive of process equipment, AIP Conference Proceedings, 2412 (1) (2021) 030033. <https://doi.org/10.1063/5.0075032>
- [6] **V.L. Yusha, G.I. Chernov**, Analiz termodinamicheskoi effektivnosti primeneniia tsikla Rankina v sisteme rekuperatsii teplovykh poter' kompressornoii ustanovki s privodnym dvigatelem vnutrennego sgoraniia [Analysis of the thermodynamic efficiency of using the Rankine cycle in a heat loss recovery system of a compressor unit with an internal combustion drive engine], Omskii nauchnyi vestnik, 2 (120) (2013) 254–261.
- [7] **B.-J. Tsai, Y.L. Wang**, A novel Swiss-Roll recuperator for the microturbine engine, Applied Thermal Engineering, 29 (2–3) (2009) 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.02.028>
- [8] **C. Xia, Z. Zhang, G. Huang, Y. Xu**, Study on the new hybrid thermodynamic cycle for an improved micro swing engine with heat recovery process, Applied Thermal Engineering, 129 (2018) 1135–1149. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.123>
- [9] **A. Negash, Y.M. Kim, D.G. Shin, G.B. Cho**, Optimization of organic Rankine cycle used for waste heat recovery of construction equipment engine with additional waste heat of hydraulic oil cooler, Energy, 143 (2018) 797–811. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.004>
- [10] **S. Sadeghi, S. Ghandehariun, G.F. Naterer**, Exergoeconomic and multi-objective optimization of a solar thermochemical hydrogen production plant with heat recovery, Energy Conversion and Management, 225 (2020) 113441. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113441>
- [11] **E.T. Elmas**, Design and production of high temperature heat pipe heat recovery units, Journal of Molecular Structure, 1212 (2020) 127927. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.127927>
- [12] **X. Zhang, N. Xiang, H. Pan, X. Yang, J. Wu, Y. Zhang, H. Luo, C. Xu**, Performance comparison of cement production before and after implementing heat recovery power generation based on energy analysis

and economic evaluation: A case from China, *Journal of Cleaner Production*, 290 (2021) 125901. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125901>

[13] **L. Cioccolanti, M. Renzi, G. Comodi, M. Rossi**, District heating potential in the case of low-grade waste heat recovery from energy intensive industries, *Applied Thermal Engineering*, 191 (2021) 116851. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116851>

[14] **O. Aboelazayem, M. Gadalla, I. Alhajri, B. Saha**, Advanced process integration for supercritical production of biodiesel: Residual waste heat recovery via organic Rankine cycle (ORC), *Renewable Energy*, 164 (2021) 433–443. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.058>

[15] **A. Kumar, D. Rakshit**, A critical review on waste heat recovery utilization with special focus on Organic Rankine Cycle applications, *Cleaner Engineering and Technology*, 5 (2021) 100292. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100292>

[16] **F. Wang, L. Wang, H. Zhang, L. Xia, H. Miao, J. Yuan**, Design and optimization of hydrogen production by solid oxide electrolyzer with marine engine waste heat recovery and ORC cycle, *Energy Conversion and Management*, 229 (2021) 113775. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113775>

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Aleksandr M. KALASHNIKOV – *Omsk State Technical University*.

E-mail: kalashnikov_omgtu@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6847-4937>

German I. CHERNOV – *Omsk State Technical University*.

E-mail: gi_chernov2002@mail.ru

Vladimir S. EVDOKIMOV – *Omsk State Technical University*.

E-mail: omgtu_evdokimov@mail.ru

Поступила: 07.02.2024; Одобрена: 21.03.2024; Принята: 09.04.2024.

Submitted: 07.02.2024; Approved: 21.03.2024; Accepted: 09.04.2024.

Научная статья

УДК 662.76;662.6

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30203>



А.А. Калютик, Д.А. Трещёв, С.О. Кравченко ✉

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

✉ kravchenko.s.o@yandex.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ RDF-ТОПЛИВА ДЛЯ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКЕ НА ТЭЦ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

Аннотация. Исследование посвящено обоснованию технологии, способствующей вовлечению твердых коммунальных отходов (ТКО) в процесс производства электрической и тепловой энергии посредством газификации. Цель исследования заключается в выборе технологии газификации RDF-топлива для последующего использования генераторного газа в производстве электрической и тепловой энергии в парогазовом цикле на ТЭЦ для условий г. Санкт-Петербурга. В ходе выполнения исследования был оценен ориентировочный состав и потенциальный выход RDF-топлива; определены возможные типы газогенератора, тип газифицирующего агента и количество получаемого генераторного газа на единицу RDF-топлива; выявлен энергетический потенциал парогазового цикла на единицу RDF-топлива. Потенциальный выход RDF-топлива для условий г. Санкт-Петербурга составляет 311 тыс. т.у.т./год. Наибольший выход генераторного газа получен при паровоздушном дутье атмосферного давления – 2,994 м³/кг RDF; при этом наивысший энергетический потенциал генераторного газа при парокислородной газификации. Достижимая электрическая мощность парогазовой установки (ПГУ) при использовании генераторного газа, полученного путем газификации RDF-топлива в условиях г. Санкт-Петербурга, оценивается в пределах 70 ÷ 150 МВт.

Ключевые слова: газификация, твердые коммунальные отходы, RDF-топливо, генераторный газ, парогазовый цикл, теплоэлектростанция.

Благодарности: Исследование профинансировано Министерством науки и высшего образования РФ в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (соглашение № 075-15-2024-201 от 6 февраля 2024 г.).

Для цитирования:

Калютик А.А., Трещёв Д.А., Кравченко С.О. Использование RDF-топлива для выработки электроэнергии в парогазовой установке на ТЭЦ в Санкт-Петербурге // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 2. С. 49–73. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30203>



A.A. Kalyutik, D.A. Treshchev, S.O. Kravchenko ✉

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

✉ kravchenko.s.o@yandex.ru

USE OF RDF TO GENERATE ELECTRICITY IN A COMBINED CYCLE GAS TURBINE PLANT AT A CHP PLANT IN ST. PETERSBURG

Abstract. The study is devoted to the substantiation of a technology that promotes the involvement of municipal solid waste (MSW) in the production of electric and thermal energy through gasification. The purpose of the study is to select the technology of gasification of RDF for the subsequent use of producer gas in the production of electric and thermal energy in the combined cycle at a CHP plant for the conditions of St. Petersburg city. During the research, the approximate composition and potential yield of RDF are evaluated. The possible types of gasifier, the type of gasifying agent and the amount of producer gas produced per unit of RDF are determined. The energy potential of the combined cycle per unit of RDF is identified. The potential output of RDF for the conditions of St. Petersburg is 311 thousand tons of standard fuel per year. The highest output of producer gas is obtained with steam-air blasting at atmospheric pressure – 2,994 m³/kg of RDF. At the same time, the highest energy potential of producer gas is obtained with steam-oxygen gasification. The achievable electric power of a combined cycle gas turbine (CCGT) plant using producer gas obtained by gasification of RDF in the conditions of St. Petersburg is estimated at 70 ÷ 150 MW.

Keywords: gasification, municipal solid waste, RDF, producer gas, steam-gas cycle.

Acknowledgements: The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the Strategic Academic Leadership Program “Priority-2030” (Agreement No. 075-15-2024-201 dated February 6, 2024).

Citation:

A.A. Kalyutik, D.A. Treshchev, S.O. Kravchenko, Use of RDF to generate electricity in a combined cycle gas turbine plant at a CHP plant in St. Petersburg, *Global Energy*, 30 (02) (2024) 49–73, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30203>

Введение. В соответствии со Стратегией развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года одной из стратегических задач на федеральном и региональном уровнях в РФ является создание инновационной технико-экономической системы, позволяющей минимизировать количество захораниваемых твердых коммунальных отходов (ТКО), максимально обеспечив при этом ресурсосбережение, путем превращения отходов во вторичное сырье для получения энергии¹. Данное утверждение находит отражение и в смежных стратегических документах, что подчеркивает актуальность исследования. Так, одним из направлений Стратегии научно-технологического развития РФ является переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии. В соответствии с Энергетической стратегией России до 2035 года должно предусматриваться высокоэффективное использование традиционных

¹ Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года, утв. Распоряжением Правительства РФ № 84-р от 25.01.2018 г.

энергетических ресурсов и новых углеводородных и других источников энергии (к которым относятся ТКО).

Однако использование ТКО в неподготовленном виде осложнено рядом технологических и экологических трудностей, что связано с непостоянством состава и гранулометрических характеристик отходов, высоким содержанием токсичных веществ и низкой теплотворной способностью топлива. Данных недостатков лишено предварительно подготовленное топливо из отходов, называемое *refuse-derived fuel (RDF)* [1]. В соответствии с Единой концепцией обращения с ТКО на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области количество образовавшихся отходов ежегодно составляет 1,7 млн т². Также в соответствии с перспективными планами³ на территории Ленинградской области предусматривается создание четырех мусороперерабатывающих заводов с производством *RDF*-топлива, что создает предпосылки к территориальному выбору объекта исследования.

Наиболее распространенными компонентами *RDF*-топлива являются древесина, бумага, картон, пластмассы и текстиль [2]. Вследствие предварительной обработки *RDF*-топливо обладает меньшей влажностью и зольностью, а также более высокой теплотворной способностью по сравнению с ТКО и может использоваться как для прямого сжигания в энергетических котлах, так и в качестве сырья для газификации с последующим использованием генераторного газа.

Сравнение технологии прямого сжигания отходов и газификации на основе оценки жизненного цикла [3] показывает, что применение газификации позволяет сократить выбросы дымовых газов и повысить энергетическую эффективность производства итогового продукта по сравнению с прямым сжиганием. Это связано с тем, что после газификации полученный генераторный газ проходит стадию очистки, что позволяет достичь более высоких температур горения в топке и получить пар более высоких параметров (540 °C и 120 бар для газогенератора *Valmet* и 400 °C и 45 бар на заводе по сжиганию ТКО в *Lakeside, London*) [4]. Еще одним преимуществом газификации по сравнению с прямым сжиганием отходов является то, что полученный генераторный газ может быть использован для выработки электрической и тепловой энергии, как в традиционном паросиловом цикле, так и парогазовой установке (ПГУ). Парогазовый цикл обладает большим коэффициентом полезного действия, чем паросиловой, что обеспечивает конкурентоспособность новых ТЭЦ на оптовом рынке. А наличие пилотных образцов отечественных газовых турбин (таких как ГТЭ-170.1 производства ПАО «Силловые Машины»), аналоги которых в мировой практике используются, в том числе для сжигания альтернативных видов топлива [5], позволяют обоснованно принять в качестве предмета исследования парогазовую установку.

Анализ литературных источников показывает, что технологии термической переработки ТКО, в том числе газификации, являются актуальным направлением научных исследований. Так, в работе [6] дана обширная характеристика современных технологий термической утилизации ТКО и рассмотрен мировой и отечественный опыт по их внедрению. В работах [7–9] проведен анализ технологий газификации твердых топлив и выделены основные тенденции развития данного направления в мире. Подробное описание существующих газогенераторов, принципов их работы и особенности эксплуатации применительно к газификации ТКО представлены в работах [10, 11]. В [12] проведено экспериментальное исследование процесса газификации *RDF*-топлива в слоевом реакторе с использованием различного газифицирующего агента, проведена оценка влияния температуры процесса и различных соотношений подаваемого топлива и газифицирующего агента. В работах [2, 13–15] проводится численное и экспериментальное исследование процесса газификации *RDF*-топлива на пилотной установке, в результате чего определяют выход генераторного газа, его компонентный состав и характеристики газа. В [16] особое внимание при моделировании

² Единая концепция обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области (с возможностью разделения потоков ТКО).

³ Территориальная схема обращения с отходами Ленинградской области, утв. Приказом Правительства Ленинградской области № 13 от 13.12.2023 г.

процесса газификации на лабораторном стенде уделяется изменению компонентного состава генераторного газа в зависимости от давления и температуры газифицирующего агента. В исследованиях [17, 18] разработаны методики расчета состава и характеристик генераторного газа по уравнениям равновесия реакций газификации.

В исследовании [19] рассматриваются проблемы создания ТЭС на ТКО, предложены рекомендации по выбору оптимальной энергетической структуры ТЭС. В [20] проведен анализ показателей работы ТЭС на ТКО с использованием расчетного комплекса *Boiler Designer* и определена нелинейная зависимость между производительностью ТЭС и электрической мощностью.

В работе [21] дана сравнительная характеристика различных методов утилизации ТКО, среди которых захоронение, сжигание, газификация и пиролиз, а также выделены их основные достоинства и недостатки. Показано, что газификация отходов является наиболее перспективным способом утилизации ТКО для последующего использования генераторного газа в газотурбинной установке. Также в работе в программном комплексе *Aspen Plus* был проведен расчет процесса газификации ТКО с дальнейшим сжиганием полученного газа в камере газотурбинной установки (ГТУ) и выработкой тепловой и электрической энергии. В результате расчета установлено, что коэффициент полезного использования теплоты топлива (КИТТ) сопоставим по значениям с КИТТ подобных установок, работающих на другом альтернативном топливе (торф, древесина и т.д.).

В [22] была предложена схема когенерационной ГТУ малой мощности с измененной последовательностью процессов для повышения КПД установки, работающей на продуктах газификации ТКО.

В исследовании [23] выполнен расчет энергетического и эксергетического балансов котла ТПП-210А при его работе на генераторном газе после газификации смеси твердых бытовых и сельскохозяйственных отходов и показано, что внедрение газификации позволит повысить термический и эксергетический КПД котла и заменить уголь и природный газ.

В работе [24] авторами проведен энергетический и эксергетический анализ тригенерационного цикла, работающего на ТКО, который включает в себя установку газификации, газотурбинный цикл, установку нагрева и холодильный цикл, в результате получен КИТТ, близкий по значению к КИТТ ТЭС на угле.

Анализируя существующие исследования по газификации ТКО для ПГУ можно отметить, что в настоящее время отсутствуют комплексные подходы к обоснованию наиболее приемлемой технологии газификации *RDF*-топлива для парогазовых установок утилизационного профиля.

Таким образом, цель данного исследования заключается в выборе технологии газификации *RDF*-топлива для последующего использования генераторного газа в производстве электрической и тепловой энергии в парогазовом цикле на ТЭЦ в г. Санкт-Петербурге.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- 1) на основании региональных данных о располагаемом количестве исходных ТКО оценить ориентировочный состав и потенциальный выход *RDF*-топлива;
- 2) на основании анализа мирового и отечественного опыта по обращению с ТКО определить возможные типы газогенератора, тип газифицирующего агента;
- 3) оценить количество получаемого генераторного газа на единицу *RDF*-топлива и достигимый энергетический потенциал парогазового цикла на единицу *RDF*-топлива.

Материалы и методы

Усредненный морфологический состав для ТКО Санкт-Петербурга по данным на 2020 год из «Единой концепции обращения с ТКО на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области (с возможностью разделения потоков ТКО)» представлен в табл. 1.

Диапазон химического состава *RDF*-топлива и его теплотворной способности представлен в табл. 2 [3–5].

Таблица 1

Морфологический состав ТКО

Table 1

Morphological composition of MSW

Компонент	Содержание, масс. %	Низшая теплота сгорания, МДж/кг
Бумага	13,5	13,4
Картон	4,5	20,0
Полимеры:	18	33,7
Полиэтилентерефталат (ПЭТ)	5	22
Полиэтиленовая пленка	7	46,6
Прочая пленка	2	45,7
Пластик низкого давления (ПНД)	2	43,5
Пластик высокого давления (ПВД)	0,1	43
Поливинилхлорид (ПВХ)	0,1	19
Прочие пластики	1,8	22
Тетра-пак	1,5	24
Металл черный	3	0,05
Металл цветной	0,6	0,7
Стекло	10	0,15
Биоразлагаемая органика	22	12,5
Текстиль, кожа и резина	3,4	22,3
Дерево	2	13,8
Прочее	5,5	12
Крупногабаритный, более 450 мм	3	12
Отсев 0–20 мм	13	7
Итого	100	15,4

Таблица 2

Характеристики RDF-топлива

Table 2

RDF characteristics

Элементарный химический состав, %							Выход летучих V, %	Теплота сгорания Q, МДж/кг
C	H	N	S	O	W	A		
40 ÷ 80	5 ÷ 8	0 ÷ 2	0 ÷ 4	10 ÷ 40	0,5 ÷ 5	2 ÷ 35	30 ÷ 80	12 ÷ 30

При выборе типа газогенератора для парогазового цикла следует учитывать требования к получаемому генераторному газу:

- высокое давление генераторного газа;
- высокая теплотворная способность газа;
- очистка газа перед использованием его в газовой турбине.

Теплотворная способность получаемого генераторного газа и его компонентный состав во многом определяется не конструктивом установки, а типом газифицирующего агента. Наиболее доступным окислителем является воздух, однако при газификации воздухом генераторный газ получается с высоким содержанием балластных газов и низкокалорийным. В связи с этим предлагается использовать смесь водяного пара и воздуха.

Для оценки характеристик генераторного газа, получаемого при различном дутье, был проведен расчет процесса газификации по равновесным реакциям по методу Д.Б. Гинзбурга [25]. Суть метода заключается в определении парциальных давлений компонентов генераторного газа с помощью расчета констант равновесия характерных обратимых реакций газификации и определения парциальных давлений газифицирующей смеси. В качестве реакций равновесия выбраны следующие:



Выход сухого газа рассчитывается по балансу углерода, м³/кг:

$$V_{\text{сух}} = \frac{C^p - (C_{\text{ун}} + C_{\text{шл}})}{\frac{12}{22,4} \cdot (CO + CO_2 + CH_4)}, \quad (4)$$

где $C_{\text{ун}}$, $C_{\text{шл}}$ – потери углерода с уносом и шлаком соответственно, %; CO, CO₂, CH₄ – содержание монооксида углерода, углекислого газа и метана в газе, об. %.

В качестве летучих газов в зоне газификации, помимо углеродосодержащих компонентов, выделяются сероводород, азот, водяной пар и водород, объемный выход которых определяется по формулам, м³/кг:

$$V_{H_2S} = 0,007 \cdot S^p, \quad (5)$$

$$V_{N_2} = 0,008 \cdot N^p, \quad (6)$$

$$V_{H_2O} = 0,0124 \cdot W^p + 0,111 \cdot \frac{H^p}{2}, \quad (7)$$

$$V_{H_2} = 0,111 \cdot \frac{H^p}{2}. \quad (8)$$

Суммарный выход генераторного газа с 1 кг RDF-топлива, м³/кг:

$$V = V_{\text{сух}} + V_{H_2S} + V_{N_2} + V_{H_2O} + V_{H_2}. \quad (9)$$

При этом принимается, что половина водорода топлива переходит во влагу, вторая половина – в водяной пар.

Расчет проводился для нескольких типов газифицирующего агента и его различного давления: воздух ($P = 1$ атм), воздух + водяной пар ($P = 1$ атм), воздух + водяной пар ($P = 20$ атм), кислород + пар ($P = 1$ атм), кислород + пар ($P = 20$ атм).

В качестве исходных данных задавалась температура процесса газификации $t = 850$ °С, соотношение воздух/пар и кислород/пар, давление газифицирующего агента. Константы равновесия определялись по табличным данным в зависимости от температуры.

Зная выход генераторного газа V и его теплотворную способность Q_n^p и принимая КПД парогазовой установки $\eta_{пгв} = 50\%$, можно определить удельную выработку электроэнергии в парогазовом цикле в расчете на 1 кг/с *RDF*-топлива, МВт:

$$N_{пгв} = V \cdot Q_n^p \cdot \eta_{пгв}. \quad (10)$$

Удельные затраты электроэнергии на привод дожимного компрессора генераторного газа при атмосферном дутье определяются по формуле, МВт/кг *RDF*:

$$N_{дк} = c_p \cdot T_1 \cdot (\pi^{m/\eta_{oi}} - 1) \cdot G_T,$$

где c_p – теплоемкость генераторного газа, кДж/(кг·К); T_1 – температура газа на входе в компрессор, К; $\pi = p_2/p_1$ – степень сжатия газа в компрессоре от начального давления p_1 до конечного p_2 ; $m = R/c_p$ – коэффициент; R – характеристическая газовая постоянная генераторного газа, кДж/(кг·К); η_{oi} – относительный внутренний КПД компрессора; G_T – массовый выход генераторного газа, кг/кг *RDF*.

Результаты и обсуждение

Обзор существующих технологий газификации

Состав получаемого генераторного газа во многом определяется не только свойствами исходного сырья, но и технологией газификации. Поэтому методы газификации принято классифицировать по признакам [26], приведенным на рис. 1.

В автотермических газогенераторах теплота для эндотермических реакций процесса газификации подводится за счет сжигания части топлива непосредственно в газогенераторе, а в аллотермических – теплота подводится извне. Наиболее распространенным способом является автотермический, так как процессы в реакторе протекают самопроизвольно и нет необходимости в постоянном источнике теплоты для поддержания температуры газификации.

Газогенераторы с атмосферным давлением используются для непосредственного сжигания генераторного газа в топке котла и выработки тепловой и электрической энергии. В случае, когда газогенератор работает в сочетании с газовой турбиной, более предпочтительным вариантом является газификация при среднем и высоком давлении, так как это позволит снизить затраты на привод в дожимных компрессорах.

В зависимости от газифицирующего агента получаемый генераторный газ имеет различный компонентный состав и теплотворную способность, что влияет на отрасль использования полученного газа. Так, при осуществлении воздушного дутья более 50% газа будет составлять инертный азот, вследствие чего низкая теплота сгорания (менее 6 МДж/м³) такого генераторного газа позволит использовать его только для сжигания в котлах и выработки электроэнергии и теплоты как альтернативу природному газу. Кислородное и парокислородное дутье способствует образованию высокой доли горючих компонентов газа – СО и Н₂, а отсутствие балластных газов не вызовет снижение его теплотворной способности. Такой генераторный газ может быть использован в силовых машинах (газовые турбины, двигатели внутреннего сгорания) для производства синтез-газа с последующим выделением водорода и для химического производства [27]. Газификация углекислым газом или водяным паром осуществляется в аллотермических реакторах, так как реакции процесса эндотермические и требуют подвода тепла извне.



Рис. 1. Методы газификации ТКО и RDF-топлива

Fig. 1. Gasification methods for MSW and RDF

Процесс газификации является многостадийным, вследствие чего объем газогенератора условно разделяют на несколько зон, в которых происходят характерные реакции, представленные в табл. 3 [8, 28, 29]. Свежее топливо подается в газогенератор и поступает в зону сушки, где при температуре до 120 °С происходит удаление влаги, после чего попадает в зону пиролиза, где при температурах 120 ÷ 700 °С происходит выделение летучих, кокса и смол, а также частичное окисление. Далее продукты пиролиза поступают в зону горения и газификации, где при температурах 800 ÷ 1200 °С протекают реакции окисления углеродосодержащих соединений [8]. В зависимости от типа газифицирующего агента в процессе будут преобладать разные реакции. Так, для воздушного дутья характерно только протекание реакций 1–6, для кислородного – реакции 1–7, 14, 15, для паровоздушного и парокислородного дутья характерны все реакции, представленные в табл. 3.

Слоевые газогенераторы с обращенным процессом составляют примерно 75% всех газогенераторов, продаваемых на коммерческом рынке, за ними следуют газогенераторы с кипящим слоем (20%), газогенераторы прямого процесса (2,5%) и остальные (2,5%) [30]. Процесс получения генераторного газа осуществляется в реакторе цилиндрической формы в течение 900 ÷ 1800 с при высоких давлениях (0,1 ÷ 10 МПа) и температурах (500 ÷ 1200 °С) [31]. В слоевых газогенераторах с прямым процессом топливо и газифицирующий агент движутся навстречу друг другу и газ отбирается из верхней части генератора (рис. 2а), а с обращенным процессом – параллельно и газ отбирается из нижней части газогенератора (рис. 2б). При поперечном процессе подача топлива осуществляется сверху, дутье – сбоку, а газ отбирается на уровне подачи дутья с противоположной стороны установки (рис. 2в).

Мощность слоевых газогенераторов обычно не превышает 10 МВт, что связано с низкой рентабельностью строительства более мощных генераторов и сложностью масштабирования установок. Слоевые газогенераторы как на ТКО, так и на биомассе нашли совместное применение с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) для децентрализованного производства электроэнергии [32]. Газогенераторы обращенного процесса используются в коммерческих целях в случае, когда требования к качеству генераторного газа не строгие, а газогенераторы с поперечным процессом не считаются конкурентоспособными и практически не используются [33].

Внедрение технологии газификации в кипящем слое позволяет увеличить мощность установки до 20 МВт и более, незначительно усложняя конструкцию и сложность эксплуатации.

Таблица 3

Основные реакции процесса газификации

Table 3

Basic reactions of the gasification process

№ реакции	Наименование реакции	Реакция	Тепловой эффект реакции
1	Зона сушки	$RDF_{вл.} \rightarrow RDF_{сух.} + H_2O$	
2	Зона пиролиза (выход летучих)	$RDF_{сух.} + Q \rightarrow \text{кокс} + \text{летучие}$	
3	Зона горения (реакции окисления)	$C + 0,5O_2 \rightarrow CO$	– 111 кДж/моль
4		$CO + O_2 \rightarrow CO_2$	– 283 кДж/моль
5		$C + O_2 \rightarrow CO_2$	– 394 кДж/моль
Зона газификации:			
6	Реакция Будуара	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	+ 172 кДж/моль
7	Реакции метанизации	$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	– 242 кДж/моль
8		$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$	– 227 кДж/моль
9		$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	+ 165 кДж/моль
10	Реакция паровой конверсии	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	– 41 кДж/моль
11	Реакция парового риформинга	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	+ 131 кДж/моль
12	Реакции реформинга метана	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	+ 227 кДж/моль
13		$2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2$	+ 247 кДж/моль
14		$CH_4 + 0,5O_2 \rightarrow CO + 2H_2$	– 36 кДж/моль
15		$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	– 803 кДж/моль

Газогенераторы кипящего слоя представляют собой установку, в которую сверху подается топливо, а снизу вводится псевдоожижающая среда вместе с инертным твердым теплоносителем, что способствует активации реакций газификации при температурах $800 \div 1000$ °С [10]. В газогенераторе со стационарным кипящим слоем (рис. 3а) скорость частиц топлива уравнивается со скоростью набегающего на них потока газифицирующего агента, вследствие чего достигается скорость витания частиц и слой кипит. Скорость газифицирующего агента для данного типа газогенераторов составляет $1 \div 3$ м/с [33]. Инертный материал используется для поддержания кипящего слоя, а также способствует интенсификации теплообмена между слоем и газифицируемым топливом, вследствие чего ускоряет процесс газификации. В газогенераторах с циркулирующим кипящим слоем (рис. 3б) скорость газифицирующего агента достигает $3 \div 10$ м/с, вследствие чего частицы топлива выносятся из зоны реакции в газоход, где улавливаются циклоном и возвращаются в слой. Такая рециркуляция обеспечивает высокую степень газификации топлива [34].

Поточные газогенераторы (рис. 3в) позволяют получить генераторный газ, который находит применение в установках с внутрицикловой газификацией (ПГУ-ВЦГ), мощность которых достигает 600 МВт [35]. Пылевидное топливо и газифицирующий агент подается через горелочное устройство в газогенератор, где обеспечивается большой реакционный объем и интенсивное перемешивание частиц. В качестве газифицирующего агента чаще всего используется кислород,

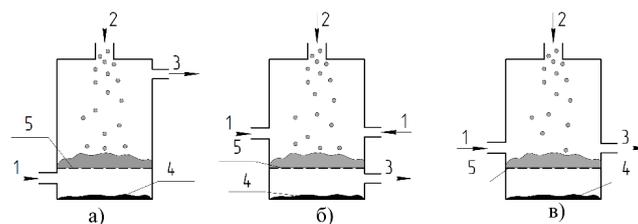


Рис. 2. Принципиальные схемы слоевых газогенераторов: а) прямого противоточного процесса; б) обращенного проточного процесса; в) поперечного процесса: 1 – газифицирующий агент; 2 – топливо; 3 – генераторный газ; 4 – зола; 5 – решетка

Fig. 2. Schematic diagrams of gasifiers: a) with counter-current fixed bed (“up draft”); b) with co-current fixed bed (“down draft”); c) cross flow: 1 – gasifying agent; 2 – fuel; 3 – producer gas; 4 – ash; 5 – grid

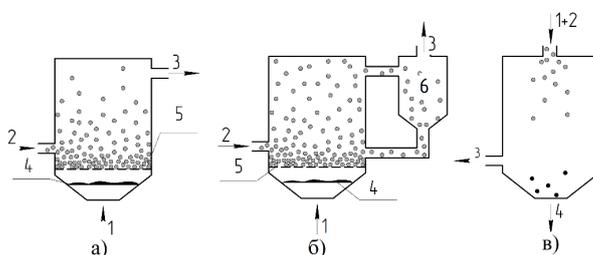


Рис. 3. Принципиальные схемы газогенераторов: а) с кипящим слоем; б) с циркулирующим кипящим слоем; в) поточный: 1 – газифицирующий агент; 2 – топливо; 3 – генераторный газ; 4 – зола; 5 – решетка; 6 – циклон

Fig. 3. Schematic diagrams of gasifiers: a) with fluidized bed; b) with circulating fluidized bed; c) entrained flow: 1 – gasifying agent; 2 – fuel; 3 – producer gas; 4 – ash; 5 – grid; 6 – cyclone

а рабочие температуры достигают $1200 \div 1500$ °С. Хотя эффективность преобразования топлива близка к 100%, его применимость остается ограниченной вследствие необходимости тонкого помола топлива.

Для повышения эффективности технологии газификации ведутся разработки многоступенчатой газификации, где стадии процесса разделены между собой и могут быть организованы в отдельных реакторах.

Наиболее распространенным в этом направлении является двухстадийный газогенератор с двойным циркулирующим кипящим слоем (рис. 4), который включает в себя два реактора с псевдоожиженным слоем: в первом реакторе происходит процесс газификации, где газифицирующий агент – пар, а во втором – процесс горения, которое осуществляется на воздушном дутье [36]. Тепло, которое выделяется в процессе горения, используется для обеспечения стабильности эндотермических реакций газификации паром, за счет чего получается генераторный газ с высоким содержанием горючих компонентов и низким содержанием балластных газов. Также отмечается большой выход смол в продуктивном газе [32]. Данный тип газогенераторов используется для газификации биомассы, например, в Гюссинге и Оберварте, Австрия (8 и 8,5 МВт), и Ульме, Германия (15 МВт) [31]. Также проводятся испытания пилотных установок по газификации пластика в двухстадийных реакторах кипящего слоя [37], которые показывают высокую теплотворную способность генераторного газа (более 16 МДж/м³) и большой выход смол (до 100 г/нм³).

Известны также разработки двухстадийной газификации в установках с неподвижным слоем обращенного процесса (рис. 5), где зоны пиролиза и газификации разделены и проводятся в отдельных реакторах с промежуточной высокотемпературной зоной крекинга смолы [37]. Данный

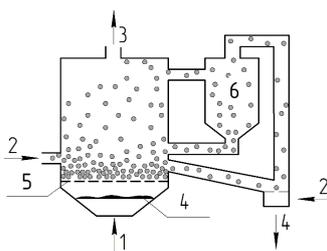


Рис. 4. Принципиальная схема газогенератора с двойным циркулирующим кипящим слоем:
1 – газифицирующий агент; 2 – топливо; 3 – генераторный газ; 4 – зола; 5 – решетка; 6 – циклон

Fig. 4. Schematic diagram of gasifier with double circulating fluidized bed:
1 – gasifying agent; 2 – fuel; 3 – producer gas; 4 – ash; 5 – grid; 6 – cyclone

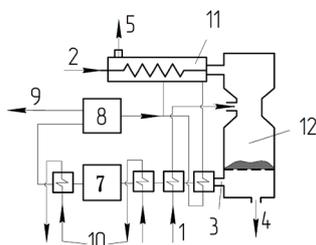


Рис. 5. Принципиальная схема газогенератора *Viking*: 1 – воздух; 2 – биомасса; 3 – генераторный газ;
4 – зола; 5 – решетка; 6 – дымовые газы; 7 – фильтр; 8 – двигатель; 9 – электроэнергия;
10 – теплофикация; 11 – зона пиролиза; 12 – зона газификации

Fig. 5. Schematic diagram of the *Viking* gasifier: 1 – air; 2 – biomass; 3 – producer gas; 4 – ash; 5 – grid; 6 – flue gases;
7 – filter; 8 – engine; 9 – electrical energy; 10 – district heating; 11 – pyrolysis zone; 12 – gasification zone

тип газогенераторов хорошо показал себя при работе на биомассе на установке *Viking* (200 кВт), где отмечается низкая концентрация смол ($< 15 \text{ мг/нм}^3$) в генераторном газе.

Основные преимущества и недостатки конструкций газогенераторов представлены в табл. 4 [7, 30, 11]. Состав генераторного газа для различных конструкций газогенераторов представлен в табл. 5 [10].

Анализ мирового опыта газификации твердых коммунальных отходов и RDF-топлива

Наибольшее промышленное распространение газификация отходов и RDF-топлива получила в Японии, где построено и эксплуатируется более 100 заводов [4]. Главными поставщиками оборудования для газификации отходов являются следующие компании: *Nippon Steel*, *Kobelco-Eco*, *JFE*, *Hitachi Zosen*, *Ebara* и *Mitsui Engineering & Shipbuilding*.

Компания *Nippon Steel* является лидером по количеству установленных мощностей по газификации отходов – 47 действующих заводов, крупнейший из которых мощностью 23,5 МВт, и три завода на этапе строительства [39]. Технология *Nippon Steel* основана на слоевых газогенераторах прямого процесса с жидким шлакоудалением и кислородно-воздушным дутьем (рис. 6). Топливо вместе с коксом и известняком подается в верхней части газогенератора и опускается на колосниковую решетку. В нижнюю часть слоя подается воздух, обогащенный кислородом (около 36%). Кислород взаимодействует с углеродосодержащей частью отходов и коксом, что способствует поддержанию высокой температуры в нижней части газогенератора – до 1800 °С, благодаря чему неорганическая часть отходов плавится и выводится с помощью системы жидкого шлакоудаления. Полученный генераторный газ с температурой около 1100 °С сразу подается в котел, где сжигается и нагревает пар, который вращает турбину [40].

Таблица 4

Преимущества и недостатки основных типов газогенераторов

Table 4

Advantages and disadvantages of the main types of gasifiers

Тип газогенератора	Технические условия	Преимущества	Недостатки
Слоевой газогенератор с прямым процессом	Содержание влаги < 50%; Объемная плотность > 400 кг/м ³ ; Зольность на сухую массу < 15%; Давление 0,1 ÷ 10 МПа.	Простота конструкции; высокая степень конверсии углерода; низкое содержание золы; использование влажного топлива.	Большой выход смол (> 100 г/нм ³); низкая управляемость процесса.
Слоевой газогенератор с обращенным процессом	Содержание влаги < 20%; Объемная плотность > 500 кг/м ³ ; Зольность на сухую массу < 5%; Давление 0,1 ÷ 10 МПа.	Простота конструкции; высокая степень конверсии углерода; низкое содержание смол (< 10 г/нм ³).	Ограничения по увеличению мощности; высокая температура генераторного газа; высокие требования к влажности и зольности топлива.
Слоевой газогенератор с поперечным процессом	Содержание влаги < 25%; Объемная плотность > 500 кг/м ³ ; Зольность на сухую массу < 10%; Давление 0,1 ÷ 10 МПа.	Простота конструкции; низкое содержание смол (0,01 ÷ 0,1 г/нм ³).	Ограничения по увеличению мощности; высокие требования к влажности и зольности топлива.
Газогенератор со стационарным кипящим слоем	Содержание влаги < 55%; Объемная плотность > 100 кг/м ³ ; Зольность на сухую массу < 25%; Давление 0,1 ÷ 0,3 МПа.	Высокая степень смешения топлива и газифицирующего агента; высокая конверсия углерода; хороший контроль температуры; низкие требования к качеству топлива; хорошая масштабируемость.	Запыленность газа; содержание смолы (< 10 г/нм ³); образование агломераций частиц инертного материала с золой; ограничения по размеру частиц топлива; относительно низкая температура процесса; высокие инвестиции.
Газогенератор с циркулирующим кипящим слоем	Содержание влаги < 55%; Объемная плотность > 100 кг/м ³ ; Зольность на сухую массу < 25%; Давление 0,1 ÷ 0,3 МПа.	Гибкость процесса; высокая конверсия углерода; низкий выход смол; хорошая способность к масштабированию.	Коррозия и истирание поверхности реактора; высокий унос с золой; высокая температура газа; ограничения по размеру частиц топлива; высокие инвестиции.
Поточный газогенератор	Содержание влаги < 15%; Объемная плотность > 400 кг/м ³ ; Зольность на сухую массу < 20%; Давление 0,2 ÷ 0,8 МПа.	Быстрая и высокая конверсия углерода; отсутствие смолы; подходит для больших масштабов.	Отложения золы на стенках газогенератора; высокие инвестиции; ограничения по размеру частиц топлива; предварительная подготовка топлива.
Газогенератор с двойным циркулирующим кипящим слоем	Содержание влаги < 50%; Объемная плотность > 100 кг/м ³ ; Зольность на сухую массу < 25%; Давление 0,1 ÷ 0,3 МПа.	Гибкость процесса; высокая конверсия углерода; низкая запыленность газа; высокая теплота сгорания газа; низкая температура газа.	Высокий выход смол; коррозия стенок реактора; ограничения по размеру частиц топлива; высокие инвестиции.

Компания *Kobelco-Eco* реализует технологию газификации в стационарном кипящем слое в сочетании с плавильной печью, где в качестве твердого теплоносителя используется песок, а в качестве газифицирующего агента – воздух (рис. 7). Газогенератор с плавильной печью работает

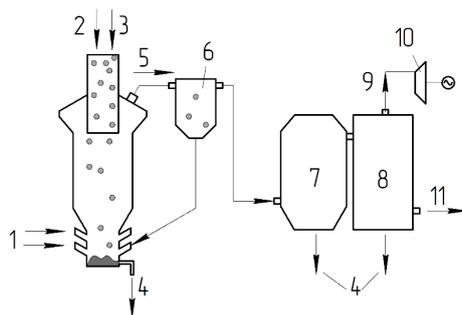


Рис. 6. Принципиальная схема газогенератора *Nippon Steel*: 1 – воздух, обогащенный кислородом; 2 – отходы; 3 – кокс + известняк; 4 – шлак; 5 – генераторный газ; 6 – циклон; 7 – камера сгорания; 8 – котел; 9 – водяной пар; 10 – турбина; 11 – уходящие дымовые газы

Fig. 6. Schematic diagram of the *Nippon Steel* gasifier: 1 – oxygen enriched air; 2 – waste; 3 – coke + limestone; 4 – slag; 5 – producer gas; 6 – cyclone; 7 – combustion chamber; 8 – boiler; 9 – water steam; 10 – turbine; 11 – exhaust flue gases

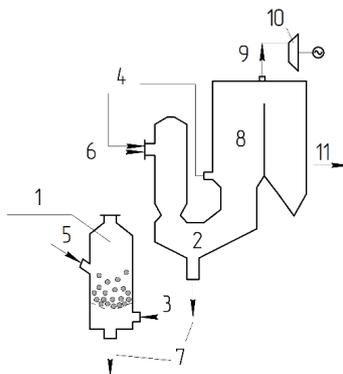


Рис. 7. Принципиальная схема газогенератора *Kobelco-Eco*: 1 – газогенератор; 2 – плавильная печь; 3 – первичный воздух; 4 – вторичный воздух; 5 – отходы; 6 – генераторный газ; 7 – шлак; 8 – котел; 9 – пар; 10 – турбина; 11 – уходящие дымовые газы

Fig. 7. Schematic diagram of the *Kobelco-Eco* gasifier: 1 – gasifier; 2 – melting furnace; 3 – primary air; 4 – secondary air; 5 – waste; 6 – producer gas; 7 – slag; 8 – boiler; 9 – steam; 10 – turbine; 11 – exhaust flue gases

следующим образом: топливо попадает в газогенератор, где происходит газификация в кипящем слое; образовавшийся генераторный газ подается в плавильную печь, где сжигается при высокой температуре, при этом зола, которая образовалась в результате газификации, плавится и выводится вместе с расплавленным шлаком с помощью системы жидкого шлакоудаления [41]. Полученный генераторный газ сжигается в последующих ступенях установки, отдавая тепло пару, который отправляется на турбину. На счету у компании числится 18 заводов, крупнейший из которых мощностью 10 МВт.

Компания *JEF* предлагает технологию газификации в реакторе кипящего слоя с зоной плавления шлака при температурах $1200 \div 1600$ °C (рис. 8). Топливо и незначительная часть кокса (около 5%) подается в верхней части газогенератора, а газифицирующий агент (воздух) – через фурмы в боковых стенках газогенератора. Первичный воздух обогащается кислородом (до 30%) и подается в нижнюю часть генератора – зону плавления шлака, откуда расплавленный шлак выводится с помощью системы жидкого шлакоудаления [42]. Полученный генераторный газ реализуют двумя способами: 1) очищают и направляют на газовую турбину; 2) направляют в

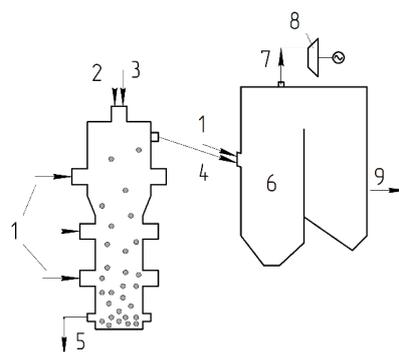


Рис. 8. Принципиальная схема газогенератора *JEF*: 1 – первичный, вторичный и третичный воздух; 2 – топливо; 3 – кокс + известняк; 4 – генераторный газ; 5 – шлак; 6 – котел; 7 – пар; 8 – турбина; 9 – уходящие дымовые газы

Fig. 8. Schematic diagram of the *JEF* gasifier: 1 – primary, secondary and tertiary air; 2 – fuel; 3 – coke + limestone; 4 – producer gas; 5 – slag; 6 – boiler; 7 – steam; 8 – turbine; 9 – exhaust flue gases

котел, где он сжигается и отдает тепло пару, который вращает паровую турбину. Сейчас у компании десять действующих заводов с максимальной мощностью 20 МВт.

Компания *Hitachi Zosen Inova* построила более десяти заводов, реализующих технологию кипящего слоя с технологией плавления шлака [4]. В целом же данная технология не существенно отличается от представленной установки компании *Kobelco-Eco*.

Таблица 5

Характеристики генераторного газа для различных типов газогенераторов

Table 5

Characteristics of producer gas for various types of gasifiers

Тип газогенератора (газифицирующий агент)	Состав газа, %					Теплота сгорания Q, МДж/м ³
	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	N ₂	
Слоевой (воздух)	13 ÷ 18	12 ÷ 16	11 ÷ 16	2 ÷ 6	45 ÷ 60	4 ÷ 6
Кипящий слой (пар)	25 ÷ 30	20 ÷ 25	35 ÷ 40	9 ÷ 11	0 ÷ 5	12 ÷ 14
Поточная (кислород)	45 ÷ 55	10 ÷ 15	23 ÷ 28	0 ÷ 1	0 ÷ 1	10 ÷ 12

Компания *Ebara* представляет технологий двухстадийной газификации в кипящем слое с внутренней циркуляцией. Топливо вместе с инертным теплоносителем (песок) подается с боковой части газогенератора, а воздух подается снизу для обеспечения псевдооживления слоя. Процесс газификации происходит при температуре 500 ÷ 600 °С. Наклонная конфигурация стенок газогенератора непосредственно над зоной кипящего слоя способствует завихрению потока в центре, что сдерживает расширение слоя и минимизирует вынос мелких частиц. Так как температуры процесса довольно низкие, то образующаяся зола не спекается. Генераторный газ выходит из газогенератора и попадает в циклонную камеру сгорания, где сжигается при температурах 1350 ÷ 1450 °С с добавлением вторичного воздуха. Неорганические компоненты золы плавятся в циклонной камере и выводятся с расплавленным шлаком. Генераторный газ направляется на сжигание и осуществляется паросиловой цикл [43]. Компания построила 15 заводов на основе данной технологии, крупнейший из которых мощностью 21 МВт.

В целом следует отметить, что японские компании при разработках технологий газификации делают упор не только на полезное использование полученного генераторного газа, но и на

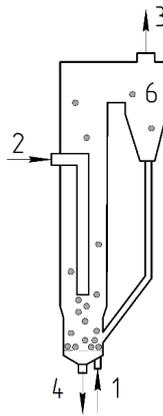


Рис. 9. Принципиальная схема газогенератора *Valmet*:

1 – воздух; 2 – топливо; 3 – генераторный газ; 4 – шлак; 5 – цикло

Fig. 9. Schematic diagram of the *Valmet* gasifier: 1 – air; 2 – fuel; 3 – producer gas; 4 – slag; 5 – cyclone

извлечение ценных компонентов из шлака и возможность его последующей утилизации. Именно в связи с политикой рационального использования шлака связано повсеместное применение в японских технологиях плавильной зоны в газогенераторе или отдельной плавильной печи.

Среди Западных стран можно выделить следующие компании-поставщики технологий и оборудования для газификации отходов: *Valmet* (Финляндия), *Energos* (Норвегия) и *EQTEC* (Испания).

Крупнейшим производителем газогенераторов на европейском рынке является компания *Valmet*, которая реализует технологию газификации в циркулирующем кипящем слое [44]. В качестве газифицирующего агента используется воздух, который подается из нижней зоны газогенератора. Топливо и инертный теплоноситель (известняк) подается в верхней части реактора (рис. 9). Температура газификации составляет примерно 850 °С, что не позволяет плавиться золе. Смесь генераторного газа, несгоревшей части топлива и золы направляется в циклон, где происходит отделение крупной фракции от газообразных веществ. Газообразные компоненты с мелкой фракцией пыли выводятся из газогенератора, а крупная фракция возвращается на дно реактора. Крупнейшей станцией по газификации отходов является электростанция в г. Лахти (Финляндия), установленная мощность которой 160 МВт.

Компания *Energos* реализует технологию газификации в неподвижном слое с камерой сгорания, которая установлена сразу после газогенератора [45]. В качестве газифицирующего агента подается воздух, также в газогенераторе осуществляется рециркуляция генераторного газа, что позволяет поддерживать постоянной температуры процесса – около 850 °С. Компания построила семь заводов на основе данных установок, мощность которых достигает 16,4 МВт.

Компания *EQTEC* предлагает газогенератор со стационарным кипящим слоем, где газифицирующим агентом выступает воздух и водяной пар, а процесс протекает при температурах 850 ÷ 900 °С [46]. Компания уже реализовала два проекта на 6 МВт мощности, и семь станций находятся на этапе строительства.

Таким образом, западный рынок технологий газификации развивается в сторону повышения эффективности энергетической утилизации отходов. Извлечение ценных компонентов из золы не ставится приоритетной задачей и поэтому технологии плавления шлака не реализуются.

Анализ отечественного опыта обращения с твердыми коммунальными отходами

Термическая утилизация ТКО в России является логичным и перспективным способом обращения с отходами, однако пока что развитие данного направления находится на начальном этапе. В силу специфики топливно-энергетического комплекса нашей страны и больших запасов традиционных видов топлива развитие энергетической утилизации отходов во многом зависит от

заинтересованности крупных энергетических компаний в использовании ТКО в качестве энергетического ресурса, а также государственной поддержки и регулирования. Шаг по государственному стимулированию разработок в области энергетической утилизации отходов был предпринят вступлением в силу Федерального закона № 450-ФЗ от 27.12.2019 г., в котором использование твердых коммунальных отходов в качестве возобновляемого источника энергии (вторичных энергетических ресурсов) после извлечения из них ценных компонентов приравнивается к утилизации отходов, что создает новые перспективы для строительства ТЭС на ТКО.

В России уже существует несколько относительно крупных предприятий по утилизации отходов сжиганием, только три из которых направлены на выработку электроэнергии: 1) Московский спецзавод № 2 (МСЗ № 2) мощностью 130 тыс. т/год (законсервирован); 2) МСЗ № 4 мощностью 250 тыс. т/год; 3) МСЗ № 3 мощностью 360 тыс. т/год. Отпуск теплоты посредством сжигания отходов осуществляется Мурманским заводом термической обработки ТКО (АО «Завод ТО ТКО»), мощность которого составляет 120 тыс. т/год. Ранее также эксплуатировался МСЗ во Владивостоке, мощность которого составляла 100 тыс. т/год, но с 2019 года он закрыт [6]. Известен также действующий с 2011 года спецзавод «Квант» в г. Новосибирске мощностью до 15 тыс. т/год.

После вступления в силу Постановления № 240 от 28.02.2017 г. и Распоряжения № 354-р, № 355-р от 28.02.2017 г., которые распространили меры государственной поддержки на генерирующие компании, работающие на основе сжигания ТКО, а также объявления Указом Президента РФ № 7 от 05.01.2016 г. 2017 года годом экологии, ООО «Альтернативная генерирующая компания» (АГК) начало строительство четырех мусоросжигательных заводов в Московской области (АГК-1) мощностью 700 тыс. т/год (электрическая мощность 70 МВт) и одного в Республике Татарстан (АГК-2) мощностью 550 тыс. т/год (55 МВт) [47]. На МСЗ будут установлены паровые котлы Е-95,2-7,0-430 (АГК-1) и Е-113,3-7,0-430 (АГК-2) производства ПАО «ЗиО-Подольск» и паровые турбины Кп-77-6,8 (АГК-1) и Кп-55-6,8 (АГК-2), произведенные на Уральском турбинном заводе. Компанией уже запущены четыре комплекса по переработке отходов, которые включают в себя сортировку и переработку той части отходов, которая пригодна к вторичному использованию.

Технологическим партнером проекта является компания *Hitachi Zosen Inova (HZI)*, которая считается одним из лидеров на рынке сжигания отходов и построила более 500 заводов по всему миру. Технология *HZI* предполагает сжигание отходов на подвижной колосниковой решетке, охлаждаемой воздухом. Это позволяет поддерживать температуру в зоне горения порядка 1260 °С. Дымовые газы в котле передают теплоту пару, который направляется на выработку электроэнергии в турбине. Охлажденные дымовые газы поступают в систему очистки и в дымовую трубу, а шлак направляется на дорожное строительство.

Таким образом, в России термическая утилизация отходов начинает обретать популярность, однако на данном этапе развитие и промышленное применение получила только технология сжигания ТКО. Газификация же отходов пока не является востребованным направлением, что связано с несколькими факторами: 1) недостаточная эксплуатационная изученность процесса как в мировой практике, так и в российском научном обществе; 2) низкая заинтересованность в использовании отходов в газовом и парогазовом цикле; 3) более высокие капиталовложения в проект, что связано с наличием двух реакторов – непосредственно газогенератора и камеры сгорания; 4) использование во многих процессах газификации дополнительных компонентов, например, кислорода для получения высококалорийного газа, кокса или природного газа для плавления шлака или устойчивого горения.

Расчет состава генераторного газа и мощности ПГУ

Для производства *RDF*-топлива негорючие и токсичные компоненты ТКО отделяются, и тогда примерный состав *RDF*-топлива, представленный в табл. 6, позволит получить топливо с теплотой

сгорания 18,7 МДж/кг в количестве 575 тыс. т/год. При этом процент извлечения из отходов компонентов для *RDF*-топлива составляет порядка 34%. Также в расчете мощности ТЭЦ на *RDF*-топливе следует учитывать количество отходов, которые направляются на вторичную сортировку – для Санкт-Петербурга в 2020 году доля вторичной сортировки и переработки составляет 15%. С учетом доли вторичной переработки на производство *RDF*-топлива ежегодно будет поступать около 488 тыс. т отходов (15,5 кг/с).

Для дальнейших расчетов был определен элементарный химический состав *RDF*-топлива по компонентному его составу, который представлен в табл. 6. Теплота сгорания компонентов и *RDF*-топлива определена по формуле Д.И. Менделеева.

Таблица 6

Химический состав *RDF*-топлива

Table 6

Chemical composition of *RDF*

Компонент	Содержание, масс. %	Элементарный химический состав на рабочую массу, %							Теплота сгорания Q, МДж/кг
		C	H	O	N	S	A	W	
Бумага	39,9	27,7	3,7	26,3	0,16	0,14	17	25	9,7
Картон	13,3	48	6	24,8	0,1	0,1	6	15	19,4
Дерево	5,9	40,5	4,8	33,8	0,1	–	0,8	20	14,5
Текстиль, кожа и резина	10,1	52,7	5	17,9	1,8	0,3	9,8	12,5	20,8
ПЭТ	14,8	62,93	4,23	32,14	–	–	0,7	–	22,2
Пластик низкого давления (ПНД)	5,9	85,74	14,07	–	0,09	–	0,1	–	43,6
Пластик высокого давления (ПВД)	0,3	86,42	12,28	–	0,72	0,17	0,41	–	42,0
Прочие пластики	5,3	85,76	13,91	0,13	0,1	–	0,1	–	43,4
Тетра-пак	4,4	47,68	4,87	24,52	0,06	0,06	11	11,81	18,2
<i>RDF</i> -топливо	–	47	5,5	23,1	0,3	0,1	9	15	18,7

Наибольшее давление генераторного газа (около 1 ÷ 20 атм) может достигаться только в газогенераторах слоевого типа, и, так как в парогазовом цикле использование газа высокого давления позволяет снизить затраты на привод в дожимных компрессорах, в работе принят слоевой тип газогенератора.

В результате расчета процесса газификации по равновесным реакциям были определены константы равновесия реакций и рассчитан состав генераторного газа для воздушного, паровоздушного и парокислородного дутья при различном давлении. Результаты расчета состава генераторного газа для *RDF*-топлива представлены в табл. 7.

Следует учитывать, что для воздушной газификации полученный выход CO – максимально возможный, при условии, что весь углерод топлива так или иначе переходит в монооксид углерода и углекислый газ не образуется. В реальных условиях доля CO₂ в воздушном генераторном газе будет достигать до 15%, вследствие чего теплота сгорания такого газа снизится.

При паровоздушном и парокислородном дутье количество образовавшегося метана будет тем выше, чем выше давление в газогенераторе и ниже температура процесса.

Результаты расчета выхода генераторного газа, потребности в газифицирующем агенте, а также удельная выработка электроэнергии в парогазовом цикле представлены в табл. 8.

Таблица 7

Компонентный состав генераторного газа

Table 7

Component composition of producer gas

№	Тип дутья	Состав генераторного газа, %						
		CO	H ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂	H ₂ S	CH ₄
1	Воздух <i>P</i> = 1 атм	27,73	0,1	0,51	17,48	54,16	0,02	–
2	Пар + воздух H ₂ O : O ₂ = 2 : 1 <i>P</i> = 1 атм	28,05	25,47	0,61	18,12	27,62	0,03	0,10
3	Пар + воздух H ₂ O : O ₂ = 2 : 1 <i>P</i> = 20 атм	19,54	21,62	5,71	19,8	32,05	0,02	1,26
4	Пар + кислород H ₂ O : O ₂ = 4 : 1 <i>P</i> = 1 атм	35,80	38,75	1,12	23,84	0,11	0,03	0,35
5	Пар + кислород H ₂ O : O ₂ = 4 : 1 <i>P</i> = 20 атм	23,48	32,51	9,61	30,46	0,11	0,03	3,8

Таблица 8

Результаты расчета мощности ПГУ

Table 8

CCGT plant power calculation results

№	Тип дутья	Выход газа, м ³ /кг	Теплота сгорания, МДж/м ³	Расход воздуха или кислорода, м ³ /кг	Расход пара, кг/кг	Удельная выработка электроэнергии в парогазовом цикле, МВт/кг <i>RDF</i>	Удельные затраты электроэнергии на привод дожимного компрессора, МВт/кг <i>RDF</i>
1	Воздух <i>P</i> = 1 атм	2,81	3,559	1,588	0	5,001	3,474
2	Пар + воздух H ₂ O : O ₂ = 2 : 1 <i>P</i> = 1 атм	2,759	6,379	0,685	0,411	8,801	3,310
3	Пар + воздух H ₂ O : O ₂ = 2 : 1 <i>P</i> = 20 атм	2,994	5,289	0,89	0,534	7,917	–
4	Пар + кислород H ₂ O : O ₂ = 4 : 1 <i>P</i> = 1 атм	2,13	8,889	0,266	1,52	9,466	3,186
5	Пар + кислород H ₂ O : O ₂ = 4 : 1 <i>P</i> = 20 атм	2,151	7,878	0,27	1,544	8,475	–

С точки зрения удельной выработки электроэнергии в парогазовом цикле парокислородное дутье имеет больший энергетический эффект по сравнению с паровоздушным способом газификации *RDF*-топлива. При этом, с учетом уровня давления топливного газа в современных газотурбинных установках на уровне 18–25 атм, схема с повышенным давлением газовой среды в газогенераторе является более предпочтительной за счет минимизации затрат на дожимные компрессоры генераторного газа. Так, затраты на привод дожимных компрессоров при атмосферном

дутье в варианте 4 для выравнивания давления генераторного газа по сравнению с вариантом 5 составит порядка 3,186 МВт/кг *RDF*-топлива.

Пар для паровоздушного и парокислородного дутья должен обладать высоким давлением на уровне 20–25 атм, так как подача газифицирующего агента в газогенератор создает высокое давление газовой среды и выходящего генераторного газа. Химические реакции, протекающие при взаимодействии водяного пара с углеродсодержащими компонентами *RDF*-топлива, являются эндотермическими, и для поддержания устойчивого процесса газификации требуется пар с температурой не менее 250 °С. Для парогазовой установки такие параметры пара достижимы в котле-утилизаторе и отсутствует необходимость в дополнительном источнике пара в виде парового котла на природном газе. В качестве альтернативного источника пара и на пусковых режимах может служить пар пусковой котельной или с общестанционного коллектора собственных нужд действующей ТЭЦ.

Окончательный выбор технологии газификации определяется технико-экономическим расчетом с учетом себестоимости кислорода на кислородное дутье (для вариантов 4–5), а также себестоимости пара (для вариантов 2–5).

Общий энергетический потенциал ТКО, образующихся в соответствии с территориальной схемой по г. Санкт-Петербургу, при переработке *RDF*-топлива и использовании генераторного газа для выработки электроэнергии в парогазовом цикле составит порядка $69,8 \div 144,5$ МВт.

Результаты работы имеют общий смысл и могут быть незначительно изменены или масштабированы в зависимости от имеющихся и перспективных региональных мощностей по переработке ТКО в *RDF*-топливо.

Заключение

В литературном обзоре произведен анализ современных направлений развития технологии газификации твердых коммунальных отходов и *RDF*-топлива, а также мировой и отечественный опыт газификации. В результате анализа можно выделить основные тенденции.

На основании региональных данных по г. Санкт-Петербургу о располагаемом количестве исходных ТКО определен ориентировочный состав и потенциальный выход *RDF*-топлива. В соответствии с территориальной схемой по обращению с отходами по г. Санкт-Петербургу потенциальное количество *RDF*-топлива составляет 488 тыс. т/год (311,5 тыс. т.у.т/год).

Показано, что наибольший выход генераторного газа может быть получен при паровоздушном дутье атмосферного давления – $2,994 \text{ м}^3$ с 1 кг *RDF*-топлива. При этом энергетический потенциал генераторного газа наивысший для парокислородного способа газификации – $9,466 \text{ МВт/кг}$ *RDF*. Окончательный выбор технологии газификации определяется технико-экономическим расчетом, учитывающим себестоимость кислорода на кислородное дутье, а также себестоимость пара и затраты электроэнергии на привод дожимных компрессоров генераторного газа.

Достижимый энергетический потенциал ТКО, образующихся в соответствии с территориальной схемой г. Санкт-Петербурга, при их переработке в *RDF*-топливо и последующем использовании генераторного газа для выработки электроэнергии в парогазовом цикле оценивается в пределах $69,8 \div 144,5$ МВт.

В зависимости от имеющихся и перспективных региональных мощностей по переработке ТКО в *RDF*-топливо результаты исследований могут быть незначительно изменены или масштабированы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Nobre C., Longo A., Vilarinho C., et al.** Gasification of pellets produced from blends of biomass wastes and refuse derived fuel chars // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 154. P. 1294–1303. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.077>
- [2] **Smolinski A., Wojtacha-Rychter K., Krol M., et al.** Co-gasification of refuse-derived fuels and bituminous coal with oxygen/steam blend to hydrogen rich gas // *Energy*. 2022. Vol. 254. 124210. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124210>.
- [3] **Dong J., Tang Y., Nzihou A., et al.** Comparison of waste-to-energy technologies of gasification and incineration using life cycle assessment: case studies in Finland, France and China // *J. Clean. Prod.* 2018. Vol. 203. P. 287–300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.139>.
- [4] Review of state-of-the-art waste-to-energy technologies: Stage Two – Case studies. WSP UK Limited, WSP House, L., 2013.
- [5] Siemens Energy gas turbine portfolio. Официальный сайт. URL: <https://www.siemens-energy.com> (дата обращения: 12.12.2023).
- [6] **Тугов А.Н.** Современные технологии термической переработки твердых коммунальных отходов и перспективы их реализации в России (обзор) // *Теплоэнергетика*. 2021. № 1. С. 3–20. <https://doi.org/10.1134/S0040601521010183>
- [7] **Козлов А.Н.** Обзор современных тенденций развития технологий газификации твердых топлив // *Известия РАН. Энергетика*. 2021. № 1. С. 130–148. <https://doi.org/10.31857/S0002331021010088>
- [8] **Indrawan N., Kumar A., Moliere M., et al.** Distributed power generation via gasification of biomass and municipal solid waste: A review // *Journal of the Energy Institute*. 2020. Vol. 93. № 6. P. 2293–2313. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.07.001>
- [9] **Sansaniwal S.K., Pal K., Rosen M.A., et al.** Recent advances in the development of biomass gasification technology: a comprehensive review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 72. P. 363–384. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.038>
- [10] **Chanthakett A., Arif M.T., Khan M.M.K., et al.** Performance assessment of gasification reactors for sustainable management of municipal solid waste // *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 291. 112661. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112661>
- [11] **Santos S. M., Brito P.S.D., Nobre C.** Waste gasification technologies: a brief overview // *Waste*. 2023. Vol. 1. P. 140–165. <https://doi.org/10.3390/waste1010011>
- [12] **Ribeiro A., Vilarinho C., Araujo J., et al.** Refuse Derived Fuel (RDF) Gasification Using Different Gasifying Agents. Proceedings of the ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 3–9 Nov 2017. Tampa, Florida, USA. <https://doi.org/10.1115/IMECE2017-71268>.
- [13] **Nasner A.M.L., Lora E.E.S., Palacio J.C.E., et al.** Refuse Derived Fuel (RDF) production and gasification in a pilot plant integrated with an Otto cycle ICE through Aspen plus modelling: Thermodynamic and economic viability // *Waste Management*. 2017. Vol. 89. P. 187–201. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.006>
- [14] **Barba D., Capocelli M., Cornacchia G., et al.** Theoretical and experimental procedure for scaling-up RDF gasifiers: The Gibbs Gradient Method // *Fuel*. 2016. Vol. 179. P. 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.03.014>
- [15] **Pio D.T., Tarelho L.A.C., Tavaresa A.M.A., et al.** Co-gasification of refused derived fuel and biomass in a pilot-scale bubbling fluidized bed reactor // *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 206. 112476. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112476>
- [16] **Spiewak K., Czerski G., Bijak K.** The Effect of Temperature-Pressure Conditions on the RDF Gasification in the Atmosphere of Steam and Carbon Dioxide // *Energies*. 2021. Vol. 14 (22). <https://doi.org/10.3390/en14227502>
- [17] **Кашин Е.М., Диденко В.Н.** Новый метод расчета состава древесного генераторного газа обращенного процесса газификации // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 4. С. 341–361. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-341-361>

- [18] Тимофеева С.С., Караева Ю.В. Термохимическая переработка низкосортного торфа на основе газификации // Вестник КГЭУ. 2021. Т. 13, № 2 (50). С. 15–26.
- [19] Дудолин А.А., Ефремов А.Н. Проблемы и перспективы создания экологически безопасной ТЭС на твердых коммунальных отходах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2021. Т. 21. № 4. С. 5–12. <https://doi.org/10.14529/power210401>
- [20] Ефремов А.Н., Дудолин А.А. Анализ зарубежного опыта в части построения энергетической структуры ТЭС на твердых коммунальных отходах // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13, № 2 (50). С. 3–14.
- [21] Макоев С.О., Ахметова И. Г., Фонов А.М. Разработка когенерационных энергетических систем с применением технологии газификации твердых коммунальных отходов // Вестник КГЭУ. 2022. Т. 14. №4 (56). С. 178–194.
- [22] Сельницын А.С. Когенерационные газотурбинные установки на продуктах газификации твердых бытовых отходов // Политехнический молодежный журнал. 2018. № 1. С. 1–12. <https://doi.org/10.18698/2541-8009-2018-01-240>
- [23] Безуглов Р.В., Папин В.В., Ефимов Н.Н., и др. Обоснование использования твердых отходов как вторичных и возобновляемых источников энергии для повышения энергетической эффективности при производстве теплоты и электроэнергии // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 3. С. 78–90. <https://doi.org/10.14529/power230308>
- [24] Asgaria N., Khoshbakhti Saraya R., Mirmasoumi S. Energy and exergy analyses of a novel seasonal CCHP system driven by a gas turbine integrated with a biomass gasification unit and a LiBr-water absorption chiller // Energy Conversion and Management. 2020. Vol. 220. 113096. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113096>
- [25] Гинзбург Д.Б. Газогенераторные установки. Ч. 2 / под ред. проф. Б.С. Швецова. М.; Л.: Государственное Издательство Легкой Промышленности, 1937. 599 с.
- [26] Бирюков А.Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах: Монография. Донецк: Ноулидж (донецкое отделение), 2012. 247 с.
- [27] Dong L., Liu H., Riffat S. Development of small-scale and micro-scale biomass-fuelled CHP systems – A literature review // Applied Thermal Engineering. 2009. Vol. 29. № 11–12. P. 2119–2126. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.12.004>
- [28] Basu P. Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory. Academic press, 2010. 356 p. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-20099-7>
- [29] La Villetta M., Costa M., Massarotti N. Modelling approaches to biomass gasification: A review with emphasis on the stoichiometric method // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 74. P. 71–88. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.027>
- [30] Kushwah V.A., Reina T.R., Short M. Modelling approaches for biomass gasifiers: A comprehensive overview // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 834. 155243. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155243>
- [31] Materazzi M., Lettieri P., Mazzei L., et al. Thermodynamic Modelling and Evaluation of a Two-Stage Thermal Process for Waste Gasification // Fuel. 2013. Vol. 108. P. 356–369. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.02.037>
- [32] Thomson R., Kwong P., Ahmad E., et al. Clean syngas from small commercial biomass gasifiers; a review of gasifier development, recent advances and performance evaluation // Hydrogen Energy. 2020. Vol. 45. P. 21087–21111. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.160>
- [33] Arena U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review // Waste Management. 2012. Vol. 32. P. 625–639. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025>
- [34] Balat M. Gasification of biomass to produce gaseous products // Energy Sources. 2009. Vol. 31. № 6. P. 516–526. <https://doi.org/10.1080/15567030802466847>
- [35] Giuffrida A., Romano M.C., Lozza G. Thermodynamic analysis of air-blown gasification for IGCC applications // Applied Energy. 2011. Vol. 88. № 11. P. 3949–3958. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.009>

- [36] Hanchate N., Ramani S., Mathpati C.S., et al. Biomass Gasification Using Dual Fluidized Bed Gasification Systems: A Review // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 280. № 1. P. 123–148. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123148>
- [37] Wilk V., Hoffbauer H. Conversion of mixed plastic wastes in a dual fluidized bed steam gasifier // Fuel. 2013. Vol. 107. P. 787–799. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.068>
- [38] Ahrenfeldt J., Thomsen T.P., Henriksen U., et al. Biomass gasification cogeneration – a review of state of the art technology and near future perspectives // Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 50. № 2. P. 1407–1417. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.040>
- [39] Nippon Steel DMS Reference list. Официальный сайт. URL: <https://www.eng.nipponsteel.com/english/whatwedo/DMS%20Reference%20List.pdf> (дата обращения: 05.12.2023).
- [40] Nippon Steel DMS brochure. Официальный сайт. URL: https://www.eng.nipponsteel.com/english/whatwedo/DMS_brochure.pdf (дата обращения: 05.12.2023).
- [41] Kobelco Eco-solutions CO., LTD. Fluidized-Bed Gasification and Melting Furnace. Официальный сайт. URL: https://www.kobelco-eco.co.jp/english/product/waste_treatment/melting_furnace.html (дата обращения: 05.12.2023).
- [42] JFE Engineering Corporation. Gasification and Melting Plant. Официальный сайт. URL: <https://www.jfe-eng.co.jp/en/products/environment/urb04.html> (дата обращения: 05.12.2023).
- [43] Ebara Environmental Plant. Gasification Technologies. Официальный сайт. URL: https://www.eep.ebara.com/en/business_technology/technology_3.html (дата обращения: 05.12.2023).
- [44] Valmet. Valmet Gasifier for Biomass and Waste. Официальный сайт. URL: <https://www.valmet.com/energyproduction/gasification/> (дата обращения: 05.12.2023).
- [45] Energos. Gasification Technology. Официальный сайт. URL: <https://www.dpcleantech.com/waste-and-biomass-clean-energy-technologies/gasification-technology/energос> (дата обращения: 05.12.2023).
- [46] EQTEC. Advanced Gasification Technology. Официальный сайт. URL: <https://eqtec.com/patented-gasification-technology/> (дата обращения: 05.12.2023).
- [47] Энергия из отходов. ООО «Альтернативная генерирующая компания». Официальный сайт. URL: <https://www.w2e.ru/> (дата обращения: 20.12.2023).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КАЛЮТИК Александр Антонович – канд. техн. наук, директор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

E-mail: AA_Kalyutik@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2965-357X>

ТРЕЩЁВ Дмитрий Алексеевич – старший преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

E-mail: treschew@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0956-3446>

КРАВЧЕНКО София Олесьевна – студент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

E-mail: kravchenko.s.o@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2036-8378>

REFERENCES

- [1] **C. Nobre, A. Longo, C. Vilarinho, M. Gonçalves**, Gasification of pellets produced from blends of biomass wastes and refuse derived fuel chars, *Renewable Energy*, 154 (2020) 1294–1303. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.077>
- [2] **A. Smoliński, K. Wojtacha-Rychter, M. Król, et al.**, Co-gasification of refuse-derived fuels and bituminous coal with oxygen/steam blend to hydrogen rich gas, *Energy*, 254 (2022) 124210. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124210>
- [3] **J. Dong, Y. Tang, A. Nzihou, et al.**, Comparison of waste-to-energy technologies of gasification and incineration using life cycle assessment: Case studies in Finland, France and China, *Journal of Cleaner Production*, 203 (2018) 287–300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.139>
- [4] **S. Wood, M. Fanning, M. Venn, K. Whiting**, Review of state-of-the-art waste-to-energy technologies: Stage Two – Case studies. Department of Environment and Conservation: Waste Management Branch, Perth, Australia, 2013.
- [5] Siemens Energy Gas Turbine Portfolio. [Online]. Available at: <https://www.siemens-energy.com> (accessed 12.12.2023).
- [6] **A.N. Tugov**, Modern Technologies for the Thermal Treatment of Municipal Solid Waste, and Prospects for Their Implementation in Russia (Review). *Thermal Engineering*, 68 (2021) 1–16. <https://doi.org/10.1134/S0040601521010183>
- [7] **A.N. Kozlov**, A Review of Current Trends in the Development of Solid Fuel Gasification Technologies. *Izvestiia RAN. Energetika [News of the Russian Academy of Sciences. Energy]*, 1 (2021) 130–148. <https://doi.org/10.31857/S0002331021010088>
- [8] **N. Indrawan, A. Kumar, M. Moliere, K.A. Sallam, R.L. Huhnke**, Distributed power generation via gasification of biomass and municipal solid waste: A review, *Journal of the Energy Institute*, 93(6) (2020) 2293–2313. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.07.001>
- [9] **S.K. Sansaniwal, K. Pal, M.A. Rosen, S.K. Tyagi**, Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72 (2017) 363–384. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.038>
- [10] **A. Chanthakett, M.T. Arif, M.M.K. Khan, A.M.T. Oo**, Performance assessment of gasification reactors for sustainable management of municipal solid waste, *Journal of Environmental Management*, 291 (2021) 112661. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112661>
- [11] **S.M. Santos, A.C. Assis, L. Gomes, C. Nobre, P. Brito**, Waste gasification technologies: A brief overview, *Waste*, 1 (1) (2023) 140–165. <https://doi.org/10.3390/waste1010011>
- [12] **A. Ribeiro, C. Vilarinho, J. Araujo, J. Carvalho**, Refuse Derived Fuel (RDF) Gasification Using Different Gasifying Agents, ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 3–9, Tampa, Florida, USA. 2017. <https://doi.org/10.1115/IMECE2017-71268>
- [13] **A.M.L. Násner, E.E.S. Lora, J.C.E. Palacio, M.H. Rocha, J.C. Restrepo, O.J. Venturini, A. Ratner**, Refuse Derived Fuel (RDF) production and gasification in a pilot plant integrated with an Otto cycle ICE through Aspen plus™ modelling: Thermodynamic and economic viability, *Waste Management*, 69 (2017) 187–201. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.006>
- [14] **D. Barba, M. Capocelli, G. Cornacchia, D.A. Matera**, Theoretical and experimental procedure for scaling-up RDF gasifiers: The Gibbs Gradient Method, *Fuel*, 179 (2016) 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.03.014>
- [15] **D.T. Pio, L.A.C. Tarelho, A.M.A. Tavares, M.A.A. Matos, V. Silva**, Co-gasification of refused derived fuel and biomass in a pilot-scale bubbling fluidized bed reactor, *Energy Conversion and Management*, 206 (2020) 112476. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112476>
- [16] **K. Śpiewak, G. Czernski, K. Bijak**, The Effect of Temperature-Pressure Conditions on the RDF Gasification in the Atmosphere of Steam and Carbon Dioxide, *Energies*, 14 (22) (2021) 7502. <https://doi.org/10.3390/en14227502>

- [17] **E.M. Kashin, V.N. Didenko**, The New Method for Determining the Composition of Wood Gas Produced in Gas Generators of the Inverted Gasification Process. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (4) (2019) 341–361. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-341-361>
- [18] **S. Timofeeva, Yu. Karaeva**, Thermochemical Processing of Low-Grade Peat Based on Gasification, *Kazan state power engineering university bulletin*, 13 (2 (50)) (2021) 15–26.
- [19] **A.A. Dudolin, A.N. Efremov**, Problems and Prospects of Creating an Environmentally Friendly Waste-To-Energy Plant, *Bulletin of South Ural State University. Series “Power Engineering”*, 21(4) (2021) 5–12. <https://doi.org/10.14529/power210401>
- [20] **A.N. Efremov, A.A. Dudolin**, Analysis of Foreign Experience in the Energy Structure of WTE Plant, *Kazan State Power Engineering University Bulletin*, 13 (2 (50)) (2021) 3–14.
- [21] **S.O. Makoev, I.G. Akhmetova, A.M. Fonov**, Development of cogeneration energy systems using the technology of gasification of solid municipal waste, *Kazan State Power Engineering University Bulletin*, 14 (4 (56)) (2022) 178–194.
- [22] **A.S. Selnitsyn**, Gas Turbine CHP Plants Using Solid Municipal Waste Gasification Products, “Politechnical Student Journal” of Bauman MSTU, 1 (2018) 1–12. <https://doi.org/10.18698/2541-8009-2018-01-240>
- [23] **R.V. Bezuglov, V.V. Papin, N.N. Efimov, E.M. Dyakonov, N.A. Vedmichev, V.R. Filimonov**, Solid Waste as a Fuel for Boilers of Thermal Power Plants, *Bulletin of South Ural State University. Series “Power Engineering”*, 23(3) 2023 78–90. <https://doi.org/10.14529/power230308>
- [24] **N. Asgari, R. Khoshbakhti Saray, S. Mirmasoumi**, Energy and exergy analyses of a novel seasonal CCHP system driven by a gas turbine integrated with a biomass gasification unit and a LiBr-water absorption chiller, *Energy Conversion and Management*, 220 (2020) 113096. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113096>
- [25] **D.B. Ginzburg**, *Gazogeneratorskiye ustanovki [Gas generating units]. Vol. 2. Gizlegprom Publ., Moscow, Leningrad, 1937.*
- [26] **A.B. Biriukov**, *Energoeffektivnost' i kachestvo teplovoi obrabotki materialov v pechakh [Energy efficiency and quality of heat treatment of materials in furnaces]*, Knowledge, Donetsk, 2012.
- [27] **L. Dong, H. Liu, S. Riffat**, Development of small-scale and micro-scale biomass-fuelled CHP systems – A literature review, *Applied Thermal Engineering*, 29 (11–12) (2009) 2119–2126. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.12.004>
- [28] **P. Basu**, *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Elsevier Inc., Oxford, UK, 2010. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-20099-7>
- [29] **M. La Villetta, M. Costa, N. Massarotti**, Modelling approaches to biomass gasification: A review with emphasis on the stoichiometric method, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74 (2017) 71–88. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.027>
- [30] **A. Kushwah, T.R. Reina, M. Short**, Modelling approaches for biomass gasifiers: A comprehensive overview, *Science of The Total Environment*, 834 (2022) 155243. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155243>
- [31] **M. Materazzi, P. Lettieri, L. Mazzei, R. Taylor, C. Chapman**, Thermodynamic Modelling and Evaluation of a Two-Stage Thermal Process for Waste Gasification, *Fuel*, 108 (2013) 356–369. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.02.037>
- [32] **R. Thomson, P. Kwong, E. Ahmad, K.D.P. Nigam**, Clean syngas from small commercial biomass gasifiers; a review of gasifier development, recent advances and performance evaluation, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (41) (2020) 21087–21111. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.160>
- [33] **U. Arena**, Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review, *Waste Management*, 32 (4) (2012) 625–639. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025>
- [34] **M. Balat**, Gasification of biomass to produce gaseous products, *Energy Sources*, 31 (6) (2009) 516–526. <https://doi.org/10.1080/15567030802466847>
- [35] **A. Giuffrida, M.C. Romano, G. Lozza**, Thermodynamic analysis of air-blown gasification for IGCC applications, *Applied energy*, 88 (11) (2011) 3949–3958. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.009>

- [36] N. Hanchate, S. Ramani, C.S. Mathpati, V.H. Dalvi, Biomass Gasification using Dual Fluidized Bed Gasification Systems: A Review, *Journal of Cleaner Production*, 280 (1) (2021) 123148. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123148>
- [37] V. Wilk, H. Hofbauer, Conversion of mixed plastic wastes in a dual fluidized bed steam gasifier, *Fuel*, 107 (2013) 787–799. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.068>
- [38] J. Ahrenfeldt, T.P. Thomsen, U. Henriksen, L.R. Clausen, Biomass gasification cogeneration – a review of state of the art technology and near future perspectives, *Applied Thermal Engineering*, 50 (2) 2013 1407–1417. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.040>
- [39] Nippon Steel DMS Reference list. [Online]. Available at: <https://www.eng.nipponsteel.com/english/whatwedo/DMS%20Reference%20List.pdf> (accessed 05.12.2023).
- [40] Nippon Steel DMS brochure. [Online]. Available at: https://www.eng.nipponsteel.com/english/whatwedo/DMS_brochure.pdf (accessed 05.12.2023).
- [41] Kobelco Eco-solutions CO., LTD. Fluidized-Bed Gasification and Melting Furnace. [Online]. Available at: https://www.kobelco-eco.co.jp/english/product/waste_treatment/melting_furnace.html (accessed 05.12.2023).
- [42] JFE Engineering Corporation. Gasification and Melting Plant. [Online]. Available at: <https://www.jfe-eng.co.jp/en/products/environment/urb04.html> (accessed 05.12.2023).
- [43] Ebara Environmental Plant. Gasification Technologies. [Online]. Available at: https://www.eep.ebara.com/en/business_technology/technology_3.html (accessed 05.12.2023).
- [44] Valmet. Valmet Gasifier for Biomass and Waste. [Online]. Available at: <https://www.valmet.com/energyproduction/gasification/> (accessed: 05.12.2023).
- [45] Energos. Gasification Technology. [Online]. Available at: <https://www.dpcleantech.com/waste-and-biomass-clean-energy-technologies/gasification-technology/energос> (accessed 05.12.2023).
- [46] EQTEC. Advanced Gasification Technology. [Online]. Available at: <https://eqtec.com/patented-gasification-technology/> (accessed 05.12.2023).
- [47] Energiia iz othodov. LLC “Al'ternativnaia generiruiushchaia kompaniia”. [Online]. Available at: <https://www.w2e.ru/> (accessed 20.12.2023).

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Aleksandr A. KALYUTIK – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: AA_Kalyutik@spbstu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2965-357X>

Dmitriy A. TRESHCHEV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: treschew@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0956-3446>

Sofia O. KRAVCHENKO – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: kravchenko.s.o@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2036-8378>

Поступила: 24.04.2024; Одобрена: 21.05.2024; Принята: 22.05.2024.
Submitted: 24.04.2024; Approved: 21.05.2024; Accepted: 22.05.2024.

Научная статья

УДК 504.75/620.9

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30204>



Ю.В. Мозжегорова , Г.В. Ильиных, В.Н. Коротаев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Россия

 juliagubaha@mail.ru

ОЦЕНКА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ГАЗОТУРБИНОЙ УСТАНОВКИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Аннотация. Газотурбинные установки (ГТУ) широко используются для генерации электрической и тепловой энергии преимущественно за счет сжигания газообразного топлива, в основном природного газа. В настоящее время отдельный интерес представляет использование ГТУ для сжигания водорода в рамках развития водородной энергетики. Для оценки перспективности такого направления использования ГТУ необходимо понимать углеродный след ГТУ как часть углеродного следа всего жизненного цикла водорода. Оценка жизненного цикла (ОЖЦ) широко используется для анализа экологической эффективности товаров и имеет множество неоспоримых преимуществ. В статье представлен обзор результатов опубликованных ранее исследований по оценке жизненного цикла ГТУ, анализ принятых границ системы, функциональные единицы и другие аспекты ОЖЦ. Приведены особенности учитываемых этапов и ресурсов, используемых при оценке этапов жизненного цикла ГТУ, в том числе анализ количества используемых материалов для производства и строительства. Объектом исследования была ГТУ, произведенная и используемая в России, мощностью 16 МВт. Оценка выбросов парниковых газов (ПГ) на МВт*ч произведенной мощности показала, что на разных этапах жизненного цикла ГТУ общий углеродный след составил 198,1–604,3 кг CO_{2-экв.}, из которых более 99% приходится на эксплуатацию ГТУ. Установлено, что углеродный след на этапах производства ГТУ значительно ниже, чем у других альтернативных устройств, используемых для выработки электроэнергии.

Ключевые слова: газотурбинная установка, оценка жизненного цикла, углеродный след, водородная энергетика.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0004 «Водородная энергетика. Материалы и технология хранения, транспортировки и применения водорода и водородсодержащих смесей»).

Для цитирования:

Мозжегорова Ю.В., Ильиных Г.В., Коротаев В.Н. Оценка жизненного цикла газотурбинной установки в Российской Федерации // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 2. С. 74–87. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30204>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30204>*Yu.V. Mozzhegorova* ✉, *G.V. Ilinykh*, *V.N. Korotaev*Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russia✉ juliagubaha@mail.ru

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF A GAS TURBINE INSTALLATION IN THE RUSSIAN FEDERATION

Abstract. Gas turbine installations (GTIs) are widely used for the generation of electrical and thermal energy, mainly by burning gaseous fuels, i.e. natural gas. Of particular interest at present is the use of GTIs to burn hydrogen as part of the development of hydrogen energy technology. To assess the prospects of using GTIs in this way, it is necessary to understand the carbon footprint of GTI as part of the carbon footprint of the entire hydrogen life cycle. Life cycle assessment (LCA) is widely used to analyze the environmental performance of products and has many compelling advantages. This article provides an overview of the results from previously published LCA studies of GTIs, an analysis of the accepted system boundaries, functional units, and other aspects of LCA. The characteristics of the stages considered and the resources used in assessing the stages of the GTI life cycle are given, including an analysis of the amount of materials used in production and construction. The subject of the analysis was a set of GTIs located in Russia with a capacity of 16 MW. An assessment of greenhouse gas (GHG) emissions per MWh of electricity produced showed that at different stages of the life cycle of GTI, the total carbon footprint was 198.1–604.3 kg CO₂-eq, of which more than 99% came from the GTI operation. The carbon footprint of GTI production stages was found to be significantly lower than other alternative power generation equipment.

Keywords: gas turbine installation, life cycle assessment, carbon footprint, hydrogen energy.

Acknowledgements: The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSNM-2023-0004 “Hydrogen energy. Materials and technology for storing, transporting and using hydrogen and hydrogen-containing mixtures”).

Citation:

Yu.V. Mozzhegorova, G.V. Ilinykh, V.N. Korotaev, Life cycle assessment of a gas turbine installation in the Russian Federation, *Global Energy*, 30 (02) (2024) 74–87, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30204>

Введение. В настоящее время водород рассматривается как перспективный энергетический ресурс в рамках декарбонизации промышленности и может быть использован в различных энергоустановках, в том числе газотурбинных установках (ГТУ). Тем не менее для определения перспективности применения водорода требуется достоверная оценка его углеродного следа на протяжении всего жизненного цикла – от добычи ресурсов до конечного использования с учетом технологических затрат (расход сырья, материалов, ресурсов – электроэнергия, вода, тепло и т.д.). Данная задача может быть успешно решена путем применения методологии оценки жизненного цикла (ОЖЦ) [1].

Для оценки углеродного следа использования топлива в ГТУ должны учитываться цепочки жизненного цикла как самого топлива, так и установки. Зачастую углеродный след самого топлива (особенно ископаемого и водородного топлива) оказывается несравнимо больше, чем вклад ГТУ в выбросы парниковых газов (ПГ) на единицу полученной энергии.

Большинство существующих ГТУ без изменения конструкции могут работать на топливной смеси с содержанием водорода до 20%, что позволяет повысить эффективность использования

газа на 20–25%, снизить расход топлива до 35% при одновременном снижении выбросов NO_x в 4 раза, CO_2 и CO в 1,5 раза [2, 3]. Серийные производители ГТУ, такие как GE Gas Power, Baker Hughes, Siemens Energy, Mitsubishi Power, Ansaldo Energia, Kawasaki Heavy Industries и пр., подтверждают работу ГТУ на смесях топливных газов с содержанием H_2 до 20% [4].

Провести оценку углеродного следа ГТУ достаточно сложно ввиду использования большого количества материалов для производства, многоэтапной технологии их обработки, длительной технологии разработки составных элементов установки и т.д. ГТУ является технически сложным устройством, и проведение ОЖЦ по всем этапам крайне затруднено, исходя из ряда ранее приведенных причин, поэтому необходимо внесение ограничений и допущений. Однако требуется выявить, какие этапы (процессы, материалы, ресурсы и пр.) должны учитываться или не учитываться при ОЖЦ. Таким образом, актуальной задачей является обоснование комплексного подхода к ОЖЦ ГТУ и анализ воздействия на окружающую среду по величине углеродного следа.

Методы и материалы

Основные принципы ОЖЦ

ОЖЦ представляет собой методологическую основу для анализа и оценки воздействия на окружающую среду, связанных с жизненным циклом продукта, включая добычу сырья и ресурсов, производство, использование, транспортирование и утилизацию после окончания срока службы. Общие требования к ОЖЦ содержатся в ГОСТ Р ИСО 14040-2022 «Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура». ОЖЦ состоит из четырех этапов: определение цели и объема, инвентарный анализ, оценка воздействия и интерпретация [1].

На этапе инвентаризационного анализа жизненного цикла собранные данные о количестве потребляемых ресурсов (например, металлов, электроэнергии и т.п.) сначала переводят в элементарные потоки. Далее элементарные потоки на этапе оценки воздействия пересчитываются в показатели воздействия на окружающую среду. То есть учитывается вклад отдельных веществ в то или иное воздействие. В качестве данных для оценки жизненного цикла могут использоваться данные инвентаризации основных технологических процессов (расход топлива и материалов), расчеты прямых измерений и т.д. [1].

Инвентаризационный анализ осуществляется на основе открытых данных, опубликованных в научных статьях, книгах, электронных ресурсах, и электронной базы данных Ecoinvent 3.8 (Ecoinvent Association, Швейцария). Для ОЖЦ использовалась программа OpenLCA 1.10.3 для оценки жизненного цикла продуктов и материалов (GreenDelta GmbH, Германия).

Функциональной единицей для ГТУ является единица произведенной энергии в случае производства электроэнергии и/или теплоэнергии ($\text{кВт}\cdot\text{ч}$, МВт) [5–9]. Для оценки углеродного следа ГТУ используются следующие функциональные единицы – $\text{кг CO}_{2\text{-экв.}}/\text{кВт}\cdot\text{ч}$ [6, 7], $\text{г CO}_{2\text{-экв.}}/\text{кВт}\cdot\text{ч}$ [8], $\text{кг CO}_{2\text{-экв.}}/\text{ГВт}$ [5]. На основании анализа исследований за функциональную единицу для оценки углеродного следа ГТУ наземного применения, используемого для производства электроэнергии, принимается $\text{кг CO}_{2\text{-экв.}}/\text{МВт}\cdot\text{ч}$.

Рассматриваемые границы ОЖЦ

В процессе ОЖЦ основную роль играет установление границ системы жизненного цикла, так как неверно выбранные границы системы могут значительно сказаться на результате оценки. ОЖЦ традиционно должна начинаться с добычи сырья и заканчиваться утилизацией составных элементов.

Жизненные циклы топлива и ГТУ пересекаются на этапе эксплуатации установок в виде полученной энергии или произведенной работы, которые совместно вносят вклад в углеродный след (рис. 1).

При проведении ОЖЦ ГТУ должны учитываться следующие этапы:

– этап производства, включающий получение и обработку конструкционных материалов, производство составных частей и фундамента, сборку и монтаж установки;

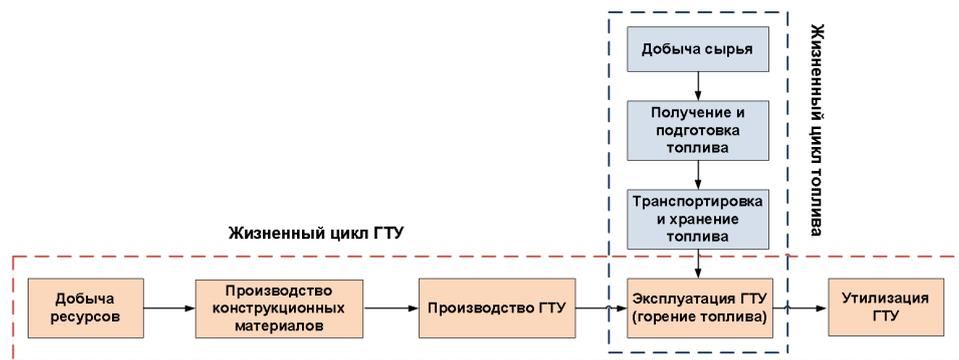


Рис. 1. Жизненный цикл топлива и ГТУ

Fig. 1. Life cycle of fuel and GTU

- этап производства топлива и электрической энергии;
- этап эксплуатации, включающий процесс горения топлива в установке, техническое обслуживание и ремонт установки;
- этап утилизации, включающий разборку, сортировку и утилизацию конструкционных материалов по окончании срока эксплуатации.

Проведенный анализ исследований, направленных на ОЖЦ ГТУ, позволил установить параметры, которые необходимо учитывать на этапах жизненного цикла.

При ОЖЦ ГТУ и электростанций учитывалось 4–8 материалов [5–9]. Обработка материалов включала листовую прокат стали, металлообработку стали, сварку, литье под давлением для полимеров, строительные работы. В качестве вспомогательных конструкций использовался фундамент, производственное здание [5]. Прочие ресурсы для производства ГТУ включали теплоснабжение, воду, органические химикаты [5, 7, 9]. Транспортирование материалов, деталей и конструкций на производственную площадку осуществлялось автомобильным и грузовым транспортом [5]. В исследовании [5, 7] на этапе эксплуатации ГТЭС основные материальные потоки связаны с работой самой установки (сжигание топлива) и ее обслуживанием (масло, запчасти и пр.). Вывод из эксплуатации ГТУ включал в себя демонтаж и обращение с отходами [5, 7, 9].

На основе анализа проведенных исследований были определены этапы и ресурсы, которые при ОЖЦ учитываются и/или не учитываются. При ОЖЦ ГТУ учитываются производство конструкционных материалов (в основном металлы), в том числе в зависимости от марки/класса (низколегированная сталь, нержавеющая сталь и пр.), а также энергопотребление и обращение с отходами после завершения эксплуатации. Достаточно редко при ОЖЦ ГТУ учитывают технологии обработки конструкционных материалов (металлообработка, литье, прокат и пр.), устройство фундамента при сборке и монтаже, транспортирование материалов (конструкций), техническое обслуживание. Из ОЖЦ ГТУ исключают ремонт, научно-технические исследования и разработки при производстве материалов, деталей, составных элементов и пр.

При ОЖЦ важным является учет этапа исследований и разработки (Research and Development, R&D), также связанный с большим потреблением ресурсов и воздействием на окружающую среду. Однако на практике он практически никогда не оценивается в рамках ОЖЦ. Данный этап является достаточно важным, так как для его выполнения приходится использовать большое количество ресурсов (электроэнергия, вода, теплоснабжения), трудовых и временных затрат и пр., производя при этом соответствующие выбросы парниковых газов. В этом исследовании этап исследований и разработки не учитывается.

Для оценки воздействия ГТУ на окружающую среду выбрана категория «Выбросы парниковых газов» ввиду наибольшего воздействия на всех этапах жизненного цикла и зависимости от многих факторов (источник электроэнергии, вид и расход производственных ресурсов и т.д.).

Рассматриваемая ГТУ

В качестве объекта исследования была выбрана ГТУ-16П, созданная на базе газогенератора высокоэффективного авиационного двигателя ПС-90А и ГТУ-12П (разработка АО «Авиадвигатель», г. Пермь, Россия)¹. ГТУ-16П серийно выпускается с 1999 г. АО «ОДК-Пермские моторы» (г. Пермь, Россия), используется в составе газоперекачивающих агрегатов серии «Урал», при реконструкции существующего газоперекачивающего оборудования, в качестве приводов электрогенераторов переменного тока газотурбинных электростанций ГТЭС-16ПА [10].

Топливом для ГТУ-16П в основном является природный газ. ГТУ может использовать в качестве топлива смесь природного газа и водорода с содержанием до 20% без изменения конструкции камеры сгорания [11]. В перспективе для эксплуатации ГТУ на водородном топливе необходимо произвести ряд технологических усовершенствований: модернизацию камеры сгорания, изменение размеров топливного трубопровода, изменение в системе топливопроводов с заменой фланцевых соединений на сварные, установку датчиков безопасности и детекторов утечек, модернизацию системы управления газовой турбиной и т.д. [12, 13].

ГТУ-16П состоит из газотурбинного двигателя ПС-90ГП-2 на подмоторной раме, включающего газогенератор (компрессор, камера сгорания, турбина высокого давления), свободную турбину, прочие вспомогательные устройства и коммуникации [10].

Основные технические характеристики ГТУ-16П²:

- мощность (производительность) – 16,0 МВт;
- суммарный КПД – 84,7%;
- расход топлива – 3350 кг/ч;
- расход газа на выхлопе – 196920 кг/ч;
- масса (сухая) – 5150 кг;
- полный ресурс установки – 100 тыс. ч.

Результаты

Согласно описанной методологии, выполнена оценка углеродного следа ГТУ при производстве и использовании в России. Границы системы очерчены производством конструкционных материалов, включая обработку материалов, производством ГТУ, производством и установкой фундамента для ГТУ, эксплуатацией ГТУ и утилизацией ГТУ и фундамента. Транспортировка материалов и использование других ресурсов (например, сырья) не рассматривались, поскольку эти этапы не входили в задачи исследования.

Инвентаризация на этапе производства ГТУ включала сбор данных об основных потоках конструкционных материалов как в качественном, так и в количественном отношении. При определении расхода материалов для ГТУ-16П на базе авиационного двигателя ПС-90ГП-2 в качестве аналога было использовано содержание материалов в авиационном двигателе CF6 (General Electric, США) [14]. Для подмоторной рамы и остальных элементов ГТУ было принято, что они состоят из конструкционной стали. Материалы, используемые для производства ГТУ-16П, и процессы их обработки представлены в табл. 1. Основным из материалов для производства ГТУ является сталь (51%) – конструкционная и нержавеющая, высокое содержание имеют никелевые сплавы (около 30%), используемые в камере сгорания и турбинах.

На этапе производства и установки фундамента для ГТУ были рассмотрены затраты материалов для фундамента, работы по отводу земель (в том числе переводу земель в другую категорию) и подготовке площадки с учетом энергетических ресурсов на их осуществление (электроэнергия, теплоснабжение, топливо для строительной техники) (табл. 1). Данные для инвентаризационного

¹ Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: в 5 т. М.: Машиностроение, 2008. 1167 с.

² Корж В.В. Газотурбинные установки: учеб. пособие. Ухта: УГТУ, 2010. 180 с.

анализа при производстве и установке фундамента для ГТУ взяты из базы данных Ecoinvent 3.8 для аналогичного объекта (ГТУ мощностью 10 МВт).

Таблица 1

Инвентаризационный анализ при производстве и утилизации ГТУ и фундамента для ГТУ

Table 1

Inventory analysis during the production and disposal of GTI and the foundation for GTI

Наименование	Объем работ на 1 ГТУ	Расчет или источник
1. Производство ГТУ		
<i>Производство конструкционных материалов</i>		
Сталь конструкционная легированная, кг	2150	Расчеты на основе [14]
Сталь нержавеющая, кг	480	
Титановые сплавы, кг	750	
Никелевые сплавы, кг	1530	
Алюминиевые сплавы, кг	240	
<i>Обработка материалов</i>		
Литье стали конструкционной, кг*	2150	Расчеты на основе ³
Металлообработка для стали конструкционной, кг	2150	
Прокат стали нержавеющей, кг	480	
Металлообработка для стали нержавеющей, кг	480	
Металлообработка для титановых сплавов, кг**	750	
Металлообработка для никелевых сплавов, кг**	1530	
Литье алюминия, кг	240	
2. Производство и установка фундамента для ГТУ		
Бетон, м ³	50	Расчеты на основе ⁴
Медь (катод), кг	5000	
Полиэтилен низкого давления, кг	15000	
Арматурная сталь, кг	47500	
Дизельное топливо, МДж	759000	
Электроэнергия, кВт	46900	
Теплоснабжение, МДж	721050	
Отвод земель (промышленная зона), м ² /год	15000	
Перевод земель в промышленную зону, м ²	1000	
3. Утилизация ГТУ		
Отходы стали, кг	2630	Расчеты на основе [14]
Отходы титана, кг***	750	
Отходы никеля, кг***	1530	
Отходы алюминия, кг	240	

³ Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок в 5 т. М.: Машиностроение, 2008. 1167 с.

⁴ Ecoinvent database version 3.8.

Окончание таблицы 1

Наименование	Объем работ на 1 ГТУ	Расчет или источник
4. Демонтаж и утилизация фундамента		
Отходы железобетона, кг	167500	Расчеты на основе ⁴
Отходы меди, кг	5000	
Полиэтилен низкого давления, кг	15000	

* Включает изготовление пресс-форм, выплавку сплавов, литье, депарафинацию, резку, шлифовку, выравнивание, механическую обработку. ** Технология металлообработки для титановых и никелевых сплавов принята, как для стали нержавеющей, в связи со схожими технологиями производства изделий и температурами плавления. *** Ввиду отсутствия в базе данных значений для углеродного следа титана и никеля в конце срока службы ГТУ используются данные для лома меди, поскольку все три металла относятся к переходным металлам первого ряда.

Этап эксплуатации ГТУ связан с производством и использованием топлива в ГТУ (табл. 2). Рассматривались три варианта топлива: природный газ, водородсодержащее топливо (смесь природного газа и водорода) и водород. Производство топлива связано с добычей сырья и потреблением ресурсов (например, электроэнергии, воды и топлива). Углеродный след потребления природного газа оценивался на основе расхода топлива на МВт энергии, произведенной в ГТУ, и углеродного следа производства природного газа. Углеродный след от сжигания природного газа в ГТУ рассчитывался на основе его состава и расхода на МВт*ч [15] произведенной энергии. Углеродный след использования водорода в ГТУ рассчитывался на основе расхода водорода на МВт*ч произведенной энергии [16] и на основе углеродного следа водорода, полученного по технологии электролиза воды с использованием возобновляемых источников энергии [17]. Водородсодержащее топливо представляет собой смесь 80% метана и 20% водорода. Таким образом, данные, необходимые для расчета углеродного следа водородсодержащего топлива, использовались относительно данных о производстве природного газа и водорода. Данные для инвентаризационного анализа производства топлива взяты из базы данных Ecoinvent 3.8. Информация о расходе топлива для расчетов взята из табл. 1.

Таблица 2

Инвентарный анализ на этапе эксплуатации ГТУ

Table 2

Inventory analysis during the operation stage of GTI

Наименование	Объем работ на 1 ГТУ	Расчет или источник
Использование природного газа		
Расход природного газа, кг CO _{2-экв.}	60,6	Расчет на основе ⁵
CO _{2-экв.} при сжигании природного газа, кг	543,4	Расчет на основе [5, 15]
Использование водорода		
Расход водорода, кг CO _{2-экв.}	197,7	[16, 17]
CO _{2-экв.} при сжигании водорода, кг	0	—

Этап утилизации ГТУ и фундамента связан с разборкой, сортировкой и утилизацией конструкционных материалов по окончании срока эксплуатации ГТУ (табл. 1). Около 80% материалов,

⁵ Корж В.В. Газотурбинные установки: учеб. пособие. Ухта: УГТУ, 2010. 180 с.

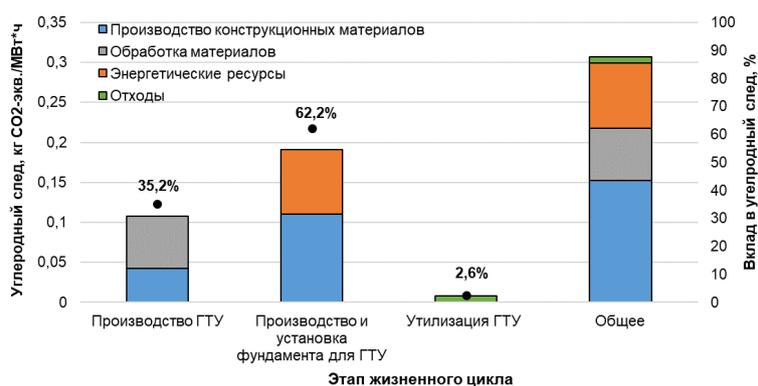


Рис. 2. Углеродный след жизненного цикла GTU (без учета этапа эксплуатации)

Fig. 2. Carbon footprint of the life cycle of GTI (excluding the operation stage)

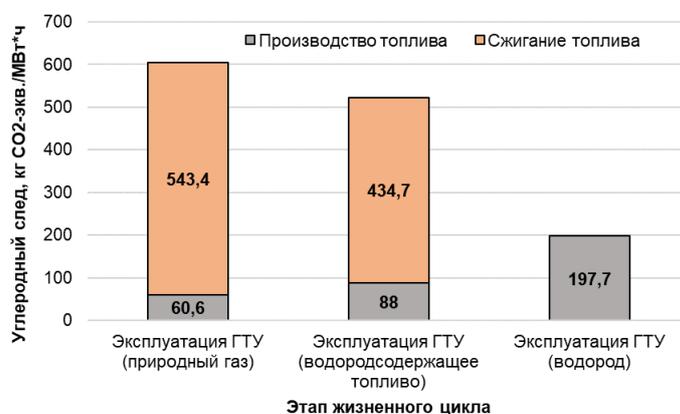


Рис. 3. Углеродный след при эксплуатации GTU на различных видах топлива

Fig. 3. Carbon footprint from operating GTI on various types of fuel

используемых для изготовления GTU, подлежат вторичной переработке относительно рекомендаций производителей. Для расчетов приняты данные о том, что образовавшиеся материалы после окончания срока службы GTU являются отходами.

На рис. 2 представлен углеродный след этапов жизненного цикла GTU (без учета этапа эксплуатации).

На основании полученных данных об углеродном следе (на МВт произведенной электроэнергии) этапов жизненного цикла GTU (без учета этапа эксплуатации) определено, что основной вклад вносит этап производства и установки фундамента для GTU, состоящий из углеродного следа производства материалов (0,110 кг CO_{2-экв.}/МВт*ч) и потребления энергетических ресурсов (0,080 кг CO_{2-экв.}/МВт*ч). Углеродный след производства GTU равен 0,108 кг CO_{2-экв.}/МВт*ч, большую часть которого составила обработка материалов (0,066 кг CO_{2-экв.}/МВт*ч). Наименьший углеродный след имел этап утилизации GTU и фундамента для GTU – 0,008 кг CO_{2-экв.}/МВт*ч. Наибольший углеродный след среди учитываемых процессов, ресурсов и работ пришелся на производство материалов – 0,153 кг CO_{2-экв.}/МВт*ч, что составляет половину от общих выбросов на этапах жизненного цикла GTU.

На рис. 3 показан углеродный след от эксплуатации GTU на различных видах топлива.

На основании полученных данных об углеродном следе (на МВт произведенной электроэнергии) на этапе эксплуатации GTU определено, что наибольший углеродный след оставляет производство

и использование природного газа в ГТУ (608 кг $\text{CO}_{2\text{-экв.}}$ /МВт*ч). При использовании в ГТУ водородсодержащего топлива (20% H_2 и 80% природного газа) расход топлива и выбросы углекислого газа снижаются на 20% в сравнении с природным газом при горении. Наиболее высокий углеродный след при производстве топлива приходится на водород, полученный электролизом воды (198 кг $\text{CO}_{2\text{-экв.}}$ /МВт*ч), однако использование водорода в ГТУ не приводит к выбросам CO_2 . Содержание водорода в топливной смеси в ГТУ может достигать 20% без конструктивных изменений. Таким образом, для увеличения процентного содержания водорода в топливной смеси до более чем 20% необходимо сначала выполнить комплекс доработок с целью усовершенствования камеры сгорания и частичной замены некоторых материалов, используемых в ГТУ.

По результатам анализа углеродного следа этапов жизненного цикла ГТУ установлено, что наибольший углеродный след на МВт произведенной энергии (более 99% от общего углеродного следа) приходится на этап эксплуатации ГТУ. Следовательно, чтобы уменьшить углеродный след, важно знать количество выбросов CO_2 , образующихся при производстве и использовании топлива в ГТУ.

Обсуждение

Для сравнения результатов, полученных при оценке углеродного следа ГТУ без учета использования топлива и с учетом использования топлива, использовались результаты исследований для других энергетических установок – топливных элементов и ГТУ (табл. 3).

Таблица 3

Углеродный след технически сложных устройств

Table 3

Carbon footprint of technically complex devices

Объект	Углеродный след (без учета использования топлива), кг $\text{CO}_{2\text{-экв.}}$ /МВт	Углеродный след (с учетом использования топлива), кг $\text{CO}_{2\text{-экв.}}$ /МВт
Топливный элемент	30 [18]	176–372* [19] 410–530 [20]
ГТУ	0,374 ⁶ 0,98–4,72 [8]	47,0–54,3** [8] 353–575 (природный газ) [21] 481–629 (мазут) [21]
ГТУ (собственные исследования)	0,308	198 (водород) 523 (водородсодержащее топливо) 604 (природный газ)

* С учетом производства водорода и производства электроэнергии.

** С учетом только этапа эксплуатации (сгорание топлива).

Исследование [19] по оценке выбросов парниковых газов топливного элемента с протонообменной мембраной (ПОМ) мощностью 1 кВт без учета этапа производства показало, что в случае ПОМ с использованием водорода, полученного риформингом природного газа, углеродный след составил 372 кг $\text{CO}_{2\text{-экв.}}$ /МВт*ч, а для ПОМ с использованием водорода, полученного электролизом воды, – 176 кг $\text{CO}_{2\text{-экв.}}$ /МВт*ч.

Углеродный след твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) зависит от их мощности. Создание «типовой» батареи ТОТЭ мощностью 1 кВт приводит к выбросам 410–530 кг $\text{CO}_{2\text{-экв.}}$ /МВт*ч

⁶ Ecoinvent database version 3.8.

и требует 7,1–9,9 ГДж первичной энергии, 60% которой расходуется на спекание элементов [20]. Для ТОТЭ мощностью 1 МВт выбросы ПГ на этапе производства составляют около 30 кг $\text{CO}_{2\text{-экв.}}/\text{МВт}\cdot\text{ч}$ [20], что равно 29% от общего объема выбросов парниковых газов. Остальные 71% выбросов CO_2 приходятся на этап эксплуатации ТОТЭ.

В исследовании [8] на этапе производства углеродный след ГТУ составлял 47,0–54,3 г $\text{CO}_{2\text{-экв.}}/\text{кВт}\cdot\text{ч}$. При этом были учтены этапы производства и хранения водорода, а также производства электроэнергии с помощью ветряной энергии. А углеродный след на этапе строительства ГТУ с учетом производства стали и бетона составлял 0,98–4,72 г $\text{CO}_{2\text{-экв.}}/\text{кВт}\cdot\text{ч}$ [8]. Углеродный след ГТУ с учетом выбросов при горении топлива значительно увеличивается: при использовании природного газа – 353–575 т $\text{CO}_{2\text{-экв.}}/\text{ГВт}\cdot\text{ч}$, при использовании мазута – 481–629 т $\text{CO}_{2\text{-экв.}}/\text{ГВт}\cdot\text{ч}$ [21].

Сравнивая ГТУ и топливный элемент с точки зрения их углеродного следа на этапах производства, можно сказать, что выбросы ПГ для топливных элементов выше (около 20% от общего объема), чем для ГТУ (менее 1% от общего объема выбросов). Это может быть связано с тем, что ГТУ имеют достаточно длительный срок эксплуатации (около 20 лет) и могут производить более высокую электрическую мощность. Таким образом, выбросы ПГ ГТУ на 1 МВт*ч ниже в сравнении с выбросами топливных элементов, которые имеют более короткий срок службы (максимум 10 лет) и генерируют меньшую выходную мощность.

На основании собственных исследований определено, что углеродный след на этапах жизненного цикла рассматриваемой ГТУ относительно сопоставим с углеродным следом других ГТУ и топливных элементов. Результаты показывают, что значение углеродного следа ГТУ ниже при большем учете входящих параметров, что свидетельствует об эффективном использовании ГТУ для производства электроэнергии с точки зрения выбросов парниковых газов.

Выводы

Газотурбинные установки широко используются для генерации электрической и тепловой энергии. В настоящее время отдельный интерес представляет использование ГТУ для сжигания водорода в рамках развития водородной энергетики. При оценке перспективности такого направления использования ГТУ необходимо понимать углеродный след ГТУ как часть углеродного следа всего жизненного цикла водорода.

Оценка выбросов парниковых газов на МВт*ч произведенной мощности показала, что общий углеродный след на этапах жизненного цикла ГТУ составил 198,1–604,3 кг $\text{CO}_{2\text{-экв.}}$, из которых более 99% приходится на эксплуатацию ГТУ. Следовательно, углеродный след ГТУ определяется видом применяемого топлива. В настоящее время с учетом жизненного цикла топлива наиболее перспективным является использование в ГТУ водородсодержащего топлива (до 20% H_2), что не требует изменения конструкции камеры сгорания существующих установок.

Рассматриваемая ГТУ является технически сложным устройством и по полученным результатам имеет наименьший углеродный след в сравнении с другими ГТУ и топливными элементами, что свидетельствует об эффективном использовании ГТУ с точки зрения выбросов парниковых газов.

Таким образом, достоверность и точность результатов оценки углеродного следа ГТУ в РФ связана с отсутствием или низким качеством открытых данных по технологическим процессам на этапах жизненного цикла ГТУ. Для решения данных проблем требуются создание методики оценки углеродного следа на этапах жизненного цикла ГТУ с учетом специфики применяемых технологий и разработка информационной базы с обоснованными данными по материалам, источникам энергии и технологиям, которые могут быть использованы для расчета выбросов парниковых газов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Ширинкина Е.С., Ильиных Г.В., Мозжегорова Ю.В., Коротаев В.Н.** Проблемы оценки жизненного цикла и углеродного следа водорода // *Экология и промышленность России*. 2023. Т. 27. № 12. С. 48–55. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-12-48-55
- [2] **Аксютин О.Е., Ишков А.Г., Хлопцов, В.Г., Казарян, В.А., Столяревский А.Я.** Концепция крупномасштабного развития инновационных систем производства и распределения метано-водородного топлива как эффективного альтернативного энергоносителя // *Kuala Lumpur World Gas Conference 2012*. Режим доступа: https://scortes.ru/st_docs/klumpur2012.pdf (дата обращения: 19.12.2023).
- [3] **Балакин А.М., Бадамшин А.Р., Матвеев, Ю.В., Лаптев М.А., Барсков В.В.** Особенности работы газотурбинной установки на смеси водорода и природного газа // *Международная научно-практическая конференция «Развивая энергетическую повестку будущего» для представителей сообщества молодых инженеров ТЭК*. Препринт сборника докладов. Санкт-Петербург. 10–11 декабря, 2021 г. СПб.: Невская Типография; Добрые коммуникации; СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. С. 53–57. Режим доступа: <https://eaf.etu.ru/assets/files/eaf21/papers/53-57.pdf> (дата обращения: 10.12.2023).
- [4] **Семенов С.В., Нихамкин М.Ш., Плутников А.И.** Обзор исследований и разработок по газотурбинным энергетическим установкам на водородном топливе // *Авиационные двигатели*. 2022. № 3 (16). С. 73–85. DOI: 10.54349/26586061_2022_3_73
- [5] **Caldeira-Pires A., da Silva Ribeiro R.** Life cycle assessment (LCA) of a gas turbine power plant // *Proceedings of the 17th International Congress of Mechanical Engineering, São Paulo, November 10–14, 2003*.
- [6] **Annisa R. et al.** Life cycle Assessment of natural gas combined cycle steam power generation systems in Indonesia: case Study on Gresik power plant // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 753. Art. no. 012039. DOI: 10.1088/1755-1315/753/1/012039
- [7] **Environmental Product Declaration in accordance with ISO 14025 for: Electricity from Grati Power Generation and O&M Service Unit Combined-Cycle Power Plant** // *EPD Southeast Asia, The International EPD®System*, 2022, 15 p.
- [8] **Song G., Zhao Q., Shao B., Zhao H., Wang H., Tan W.** Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas (GHG) and NO_x Emissions of Power-to-H₂-to-Power Technology Integrated with Hydrogen-Fueled Gas Turbine // *Energies*. 2023. Vol. 16. Iss. 2. Art. no. 977. DOI: 10.3390/en16020977
- [9] **Environmental Product Declaration. Rizziconi Combined-Cycle Gas Turbine Plant**. Stockholm: The International EPD®System, 2019. 16 p. Режим доступа: https://www.axpo.com/content/dam/axpo19/ch/files-ch/private/engagement/nature---environment/1912_Axpo_Umweltdeklaration_Rizziconi_2019_EN.pdf (дата обращения 02.10.2023).
- [10] **Снитко М.А., Морозов П.М.** ГТУ-16ПМ с МЭКС вступила в строй // *Турбины и Дизели*. 2021. Т. 4. № 97. С. 34–36.
- [11] **Буров В.Д., Рыбаков Б.А., Савитенко М.А.** Сжигание водородосодержащих газов в газотурбинных установках // *Турбины и Дизели*. 2021. Т. 2. № 95. С. 18–24.
- [12] **Simon N.** Retrofitting gas turbine facilities for hydrogen blending // *ICF International Inc*. 2022. Режим доступа: <https://www.icf.com/insights/energy/retrofitting-gas-turbines-hydrogen-blending> (дата обращения: 12.12.2023).
- [13] **Cecere D., Giacomazzi E., Di Nardo A., Calchetti G.** Gas Turbine Combustion Technologies for Hydrogen Blends // *Energies*. 2023. Vol. 16. Iss. 19. Art. no. 6829. DOI: 10.3390/en16196829
- [14] **Schafrik R.E., Ward D.D., Groh J.R.** Application of Alloy 718 in GE Aircraft Engines: Past, Present and Next Five Years // *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives* / ed. by E.A. Loria. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2001. 11 p. DOI: 10.7449/2001/Superalloys_2001_1_11
- [15] **Faramawy S., Zaki T., Sakr A.A.-E.** Natural gas origin, composition, and processing: A review // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016. Vol. 34. P. 34–54. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.06.030
- [16] **LM2500 aeroderivative gas turbine** // *Ge Vernova*. Режим доступа: <https://www.ge.com/gas-power/products/gas-turbines/lm2500> (дата обращения: 15.01.2024).

[17] **Lim D., Kim A., Cheon S., Byun M., Lim H.** Life cycle techno-economic and carbon footprint analysis of H₂ production via NH₃ decomposition: A Case study for the Republic of Korea // Energy conversion and management. 2021. Vol. 250. Art. no. 114881. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114881

[18] **Al-Khori K., Al-Ghamdi S.G., Boulfrad S., Koç, M.** Life Cycle Assessment for Integration of Solid Oxide Fuel Cells into Gas Processing Operations // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 15. Art. no. 4668. DOI: 10.3390/en14154668

[19] **Kim R.H., Baek C., Kim E., Jeong Y., Cho S.** Potential global warming impact of 1 kW polymer electrolyte membrane fuel cell system for residential buildings on operation phase // Energy for Sustainable Development. 2023. Vol. 73. P. 376–386. DOI: 10.1016/j.esd.2023.03.001

[20] **Staffell I., Ingram A., Kendall K.** Energy and carbon payback times for solid oxide fuel cell based domestic CHP // International Journal of Hydrogen Energy. 2012. Vol. 37. Iss. 3. P. 2509–2523. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.10.060

[21] EIB Project Carbon Footprint Methodologies. Methodologies for the Assessment of Project Greenhouse Gas Emissions and Emission Variations. Luxembourg: European Investment Bank, 2022. 62 p. Режим доступа: <https://www.dirittobancario.it/wp-content/uploads/2022/03/EIB-Project-Carbon-footprint-methodologies-2022.pdf> (дата обращения: 10.01.2024).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МОЗЖЕГОРОВА Юлия Владимировна – доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, канд. техн. наук.

E-mail: juliagubaha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3081-9511>

ИЛЬИНЫХ Галина Викторовна – доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, канд. техн. наук.

E-mail: galina.perm.59@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8829-3500>

КОРОТАЕВ Владимир Николаевич – профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, д-р техн. наук.

E-mail: korotayev@pstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9941-7052>

REFERENCES

[1] **E.S. Shirinkina, G.V. Pinykh, Yu.V. Mozzhegorova, V.N. Korotayev,** Challenges in Life Cycle Assessment and Carbon Footprint of Hydrogen, Ecology and Industry of Russia, 12 (27) (2023) 48–55. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-12-48-55

[2] **O.E. Aksyutin, A.G. Ishkov, V.G. Khloptsov, V.A. Kazaryan, A.Ya. Stolyarevsky,** The Large Scale Development Concept with Regard to Innovative Systems of Production and Distribution of Methane-Hydrogen Fuel as an Effective Alternative Energy Source, Kuala Lumpur World Gas Conference 2012, https://ccortes.ru/st_docs/klumpur2012.pdf. Accessed December 19, 2023.

[3] **A.M. Balakin, A.R. Badamshin, Yu.V. Matveyev, M.A. Laptev, V.V. Barskov,** Osobennosti raboty gazoturbinnoy ustanovki na smesi vodoroda i prirodnogo gaza [Features of operation of a gas turbine unit using a mixture of hydrogen and natural gas], Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya “Razvivaya energeticheskuyu povestku budushchego” dlya predstaviteley soobshchestva mododykh ingenerov TEK [Inter-

national scientific and practical conference “Developing the energy agenda of the future” for representatives of the community of young fuel and energy sector engineers]. Preprint of the collection of reports. St. Petersburg. December 10–11, 2021, St. Petersburg, Nevskaya Topografiya, Dobrye Kommunikatsyi, , SPbGETU “LETI”, St. Petersburg, 2021, 53–57. <https://eaf.etu.ru/assets/files/eaf21/papers/53-57.pdf>. Accessed December 10, 2023.

[4] **S.V. Semenov, M.Sh. Nikhamkin, A.I. Plotnikov**, A review of research and development on hydrogen-fueled gas turbine power plants, *Aviation engines*, 3 (16) (2022) 73–85. DOI: 10.54349/26586061_2022_3_73

[5] **A. Caldeira-Pires, R. da Silva Ribeiro**, Life cycle assessment (LCA) of a gas turbine power plant, *Proceedings of the 17th International Congress of Mechanical Engineering*, São Paulo, November 10–14, 2003.

[6] **R. Annisa et al.**, Life cycle Assessment of natural gas combined cycle steam power generation systems in Indonesia: case Study on Gresik power plant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 753 (2021) 012039. DOI: 10.1088/1755-1315/753/1/012039

[7] Environmental Product Declaration in accordance with ISO 14025 for: Electricity from Grati Power Generation and O&M Service Unit Combined-Cycle Power Plant, *EPD Southeast Asia*, The International EPD®System, 2022.

[8] **G. Song, Q. Zhao, B. Shao, H. Zhao, H. Wang, W. Tan**, Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas (GHG) and NO_x Emissions of Power-to-H₂-to-Power Technology Integrated with Hydrogen-Fueled Gas Turbine, *Energies*, 16 (2) (2023) 977. DOI: 10.3390/en16020977

[9] Environmental Product Declaration. Rizziconi Combined-Cycle Gas Turbine Plant, The International EPD®System, Stockholm, 2019. https://www.axpo.com/content/dam/axpo19/ch/files-ch/private/engagement/nature---environment/1912_Axpo_Umweltdeklaration_Rizziconi_2019_EN.pdf Accessed December 25, 2023.

[10] **M.A. Snitko, P.M. Morozov**, GTU-16PM with DLE combustion chamber entered service, *Turbines & Diesels*, 4 (97) (2021) 34–36.

[11] **V.D. Burov, B.A. Rybakov, M.A. Savitenko**, Combustion of methane-hydrogen gases in gas turbine plants, *Turbines & Diesels*, 2 (95) (2021) 18–24.

[12] **N. Simon**, Retrofitting gas turbine facilities for hydrogen blending, ICF International Inc., 2022 <https://www.icf.com/insights/energy/retrofitting-gas-turbines-hydrogen-blending> Accessed December 12, 2023.

[13] **D. Cecere, E. Giacomazzi, A. Di Nardo, G. Calchetti**, Gas Turbine Combustion Technologies for Hydrogen Blends, *Energies*, 16 (19) (2023) 6829. DOI: 10.3390/en16196829

[14] **R.E. Schafrik, D.D. Ward, J.R. Groh**, Application of Alloy 718 in GE Aircraft Engines: Past, Present and Next Five Years, *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*, ed. by E.A. Loria, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2001. DOI: 10.7449/2001/Superalloys_2001_1_11

[15] **S. Faramawy, T. Zaki, A.A.-E. Sakr**, Natural gas origin, composition, and processing: A review, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34 (2016) 34–54. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.06.030

[16] LM2500 aeroderivative gas turbine, Ge Vernova, <https://www.ge.com/gas-power/products/gas-turbines/lm2500>. Accessed January 15, 2024.

[17] **D. Lim, A. Kim, S. Cheon, M. Byun, N. Lim**, Life cycle techno-economic and carbon footprint analysis of H₂ production via NH₃ decomposition: A Case study for the Republic of Korea, *Energy conversion and management*, 250 (2021) 114881. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114881

[18] **K. Al-Khori, S.G. Al-Ghamdi, S. Boulfrad, M. Koç**, Life Cycle Assessment for Integration of Solid Oxide Fuel Cells into Gas Processing Operations, *Energies*, 14 (15) (2021) 4668. DOI: 10.3390/en14154668

[19] **R.H. Kim, C. Baek, E. Kim, Y. Jeong, S. Cho**, Potential global warming impact of 1 kW polymer electrolyte membrane fuel cell system for residential buildings on operation phase, *Energy for Sustainable Development*, 73 (3) (2023) 376–386. DOI: 10.1016/j.esd.2023.03.001

[20] **I. Staffell, A. Ingram, K. Kendall**, Energy and carbon payback times for solid oxide fuel cell based domestic CHP, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (3) (2012) 2509–2523. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.10.060

[21] EIB Project Carbon Footprint Methodologies. Methodologies for the Assessment of Project Greenhouse Gas Emissions and Emission Variations, European Investment Bank, Luxembourg, 2022, <https://www.dirittobancario.it/wp-content/uploads/2022/03/EIB-Project-Carbon-footprint-methodologies-2022.pdf> Accessed January 10, 2024.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Yulia V. MOZZHEGOROVA – *Perm National Research Polytechnic University.*

E-mail: juliagubaha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3081-9511>

Galina V. ILINYKH – *Perm National Research Polytechnic University.*

E-mail: galina.perm.59@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8829-3500>

Vladimir N. KOROTAEV – *Perm National Research Polytechnic University.*

E-mail: korotaev@pstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9941-7052>

Поступила: 06.05.2024; Одобрена: 26.06.2024; Принята: 27.06.2024.

Submitted: 06.05.2024; Approved: 26.06.2024; Accepted: 27.06.2024.

Металлургия. Материаловедение Metallurgy. Material Science

Научная статья

УДК 669.2:538.945:543.123

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30205>



В.В. Рогожкин¹, В.И. Горынин² ✉, М.А. Житомирский³

¹ АО «Атомпроект», Санкт-Петербург, Россия;

² Центральный научно-исследовательский институт
конструкционных материалов «Прометей», Санкт-Петербург, Россия;

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ z1dehy97@mail.wplus.net

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ТЕОРИИ ГИНЗБУРГА–ЛАНДАУ ДЛЯ ВИХРЯ АБРИКОСОВА В СВЕРХПРОВОДНИКАХ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ ЗНАЧЕНИЕМ $\kappa > 0,707$

Аннотация. До настоящего времени отсутствует точное аналитическое решение уравнений теории сверхпроводимости Гинзбурга–Ландау–Абрикосова–Горькова (ГЛАГ-теории, теории Гинзбурга–Ландау) для любого значения параметра $\kappa > 0,707$, удовлетворяющее граничным условиям для вихря Абрикосова и условию квантованию магнитного потока, а также классическим асимптотикам (при значении $\kappa \gg 1$) формул Лондонов и Абрикосова. В связи с этим целью расчетно-аналитической исследовательской работы являлось нахождение удовлетворительно точного аналитического решения уравнения теории ГЛАГ-теории для вихря Абрикосова в сверхпроводниках с произвольным значением $\kappa > 0,707$. Аналитическим решением уравнений феноменологической теории сверхпроводимости Гинзбурга–Ландау для одиночного вихря Абрикосова в массивном сверхпроводнике второго рода с произвольным значением параметра κ найдены: напряженность магнитного поля $h(\rho)$, плотность тока $j(\rho)$ и параметр порядка $f(\rho)$, удовлетворяющие граничным условиям, условию квантования и классическим асимптотикам Лондонов и Абрикосова. Определены первое критическое магнитное поле H_{c1} и отношение абсолютных значений H_{c1}/H_{c2} в сверхпроводниках с $\kappa > 0,707$.

Ключевые слова: сверхпроводимость, сверхпроводимые материалы, электромагнитные свойства, теория Гинзбурга–Ландау, теория вихрей.

Для цитирования:

Рогожкин В.В., Горынин В.И., Житомирский М.А. Аналитическое решение уравнений теории Гинзбурга–Ландау для вихря Абрикосова в сверхпроводниках с произвольным значением $\kappa > 0,707$ // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 2. С. 88–95. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30205>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30205>

V.V. Rogozhkin¹, V.I. Gorynin² ✉, M.A. Zhitomirskiy³

¹ JSC “Atomproekt”, St. Petersburg, Russia;

² Central Research Institute of Structural Materials “Prometey”,
St. Petersburg, Russia;

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

✉ z1dehy97@mail.wplus.net

ANALYTICAL SOLUTION OF THE GINZBURG–LANDAU EQUATIONS FOR THE ABRIKOSOV VORTEX IN SUPERCONDUCTORS WITH AN ARBITRARY VALUE OF THE PARAMETER $\kappa > 0.707$

Abstract. Until now, there is no exact analytical solution to the equations of the Ginzburg–Landau theory of superconductivity for any value of the parameter $\kappa > 0.707$, satisfying the boundary conditions for the Abrikosov vortex and the magnetic flux quantization condition, as well as the classical asymptotics (for the value $\kappa \gg 1$) of the London and Abrikosov formulas. In this regard, the goal of this computational and analytical research was to find a satisfactorily accurate analytical solution to the equation of the Ginzburg–Landau theory for the Abrikosov vortex in superconductors with an arbitrary value $\kappa > 0.707$. By analytically solving the equations of the phenomenological theory of Ginzburg–Landau superconductivity for a single Abrikosov vortex in a massive type II superconductor with an arbitrary value of the parameter κ , we found: magnetic field strength $h(\rho)$, current density $j(\rho)$ and order parameter $f(\rho)$, satisfying the boundary conditions, the quantization condition and the classical asymptotics of London and Abrikosov. The first critical magnetic field H_{c1} and the ratio of absolute values H_{c1}/H_{c2} in superconductors with $\kappa > 0.707$ are determined.

Keywords: superconductivity, superconducting materials, electromagnetic properties, Ginzburg–Landau theory, vortex theory.

Citation:

V.V. Rogozhkin, V.I. Gorynin, M.A. Zhitomirskiy, Analytical solution of the Ginzburg–Landau equations for the Abrikosov vortex in superconductors with an arbitrary value of the parameter $\kappa > 0.707$, *Global Energy*, 30 (02) (2024) 88–95, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30205>

Введение. Сверхпроводимость металлических материалов получила свое теоретическое развитие на феноменологическом уровне согласно теории Гинзбурга–Ландау–Абрикосова–Горькова (ГЛАГ-теории, теории Гинзбурга–Ландау). Феноменологическая ГЛАГ-теория основывалась на общей теории Л.Д. Ландау фазовых переходов II рода и гипотезе о комплексности сверхпроводящего параметра порядка [1–6]. Открытие сверхтекучести жидкого гелия и объяснение этого явления Ландау на основе сформулированного им критерия для систем Бозе-частиц позволило трактовать сверхпроводимость металлических материалов как сверхтекучесть электронной жидкости. Оно также позволило сформулировать феноменологические ГЛАГ-уравнения, описывающие термодинамику и электромагнитные свойства сверхпроводников [3, 7–13]. Вместе с тем до настоящего времени отсутствует точное аналитическое решение уравнений ГЛАГ-теории для любого значения параметра $\kappa > 0,707$, удовлетворяющее граничным условиям для вихря Абрикосова и условию квантованию магнитного потока, а также классическим асимптотикам (при значении $\kappa \gg 1$) формул Лондонов и Абрикосова.

В связи с этим целью расчетно-аналитической исследовательской работы являлось нахождение удовлетворительно точного аналитического решения уравнения ГЛАГ-теории для вихря Абрикосова в сверхпроводниках с произвольным значением $\varkappa > 0,707$.

Методологический подход к решению уравнения

Уравнения феноменологической теории сверхпроводимости Гинзбурга–Ландау–Абрикосова–Горькова (ГЛАГ-теории, теории Гинзбурга–Ландау) для одиночного вихря Абрикосова*) с одним квантом магнитного потока в массивном сверхпроводнике с параметром $\varkappa > 0,707$ для безразмерных значений аргумента ρ , напряженности магнитного поля $h = h(\rho)$ и параметра порядка $f = f(\rho)$ [1, с. 63, 64] известны:

$$(h')^2 / f^3 = (\rho * f')' / (\varkappa^2 * \rho) + f * (1 - f^2); \quad (1)$$

$$(\rho * h' / f^2)' / \rho = h. \quad (2)$$

Граничные условия для функций h и f следующие:

$$\rho \rightarrow 0: h' / f^2 \rightarrow -1 / (\varkappa * \rho); \quad f \rightarrow 0, \quad h(0) \text{ – ограничено,} \quad (3)$$

$$\rho \rightarrow \infty: f \rightarrow 1; \quad h \rightarrow 0; \quad h' \rightarrow 0. \quad (4)$$

Принципиальной трудностью для аналитических решений дифференциальных уравнений (1), (2) является их сугубо нелинейный характер. Решение уравнения (2) при $f = 1$ известно как «решение Лондонов» [1]: $h = h_L(\rho) = K_0(\rho) / \varkappa$, где K_0 – функция Макдональда [2]. Очевидные аномалии функции $K_0(\rho) \rightarrow \infty$ при $\rho \rightarrow 0$ затрудняют ее применение в феноменологической теории Гинзбурга–Ландау.

Для решения уравнения (2) расширим использование функций Макдональда для описания вихря Абрикосова путем поиска напряженности магнитного поля h в виде $h \sim K_0(\varphi)$, где при $\rho \gg 1$ функция $\varphi(\rho) \rightarrow \rho$, $h \rightarrow h_L(\rho)$, а при $\rho \rightarrow 0$ функция $\varphi(\rho) \rightarrow \beta$, где постоянная $\beta(\varkappa) > 0$.

Анализ аналитических решений

Нами получены аналитические решения системы уравнений феноменологической теории сверхпроводимости Гинзбурга–Ландау (1–4) с произвольным значением $\varkappa > 2^{-1/2}$, удовлетворяющие граничным условиям, условию квантования и классическим асимптотикам Лондонов и Абрикосова:

$$f = f_R = \rho / (\rho^2 + \beta^2)^{1/2} = \rho / \varphi; \quad (5)$$

$$h = h_R = K_0(\varphi) / [K_1(\beta) * \kappa]; \quad (6)$$

$$j = |h'_R| = j_R = \rho * K_1(\varphi) / [K_1(\beta) * \kappa * \varphi], \quad (7)$$

здесь K_0 и K_1 – функция Макдональда [2]; $\varphi = (\rho^2 + \beta^2)^{1/2}$ [3]; величина $\beta = \kappa / \varkappa$, где κ – постоянная величина (≈ 1). Решения (5), (6), (7) аналитически точно удовлетворяют дифференциальному уравнению (2) и граничным условиям (3), (4) для любых значений параметров $\varkappa > 0,707$ и $\kappa \geq 1$.

Величина $\kappa = 2^{1/2}$ может быть определена из условия очевидного соответствия найденных решений f_R (5) и h_R (6) при $\rho \rightarrow 0$, также и дифференциальному уравнению (1) системы Гинзбурга–

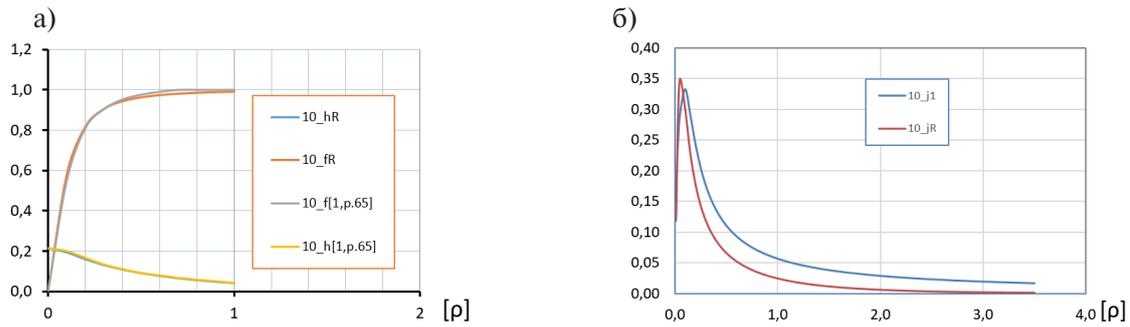


Рис. 1. Сравнение аналитических решений f_R и h_R при значении параметра $\kappa = 2^{1/2}$ с известными численными решениями $f(\rho)$ и $h(\rho)$ [1]

Fig. 1. Comparison of analytical solutions f_R and h_R at parameter $\kappa = 2^{1/2}$ with known numerical solutions $f(\rho)$ and $h(\rho)$ [1]

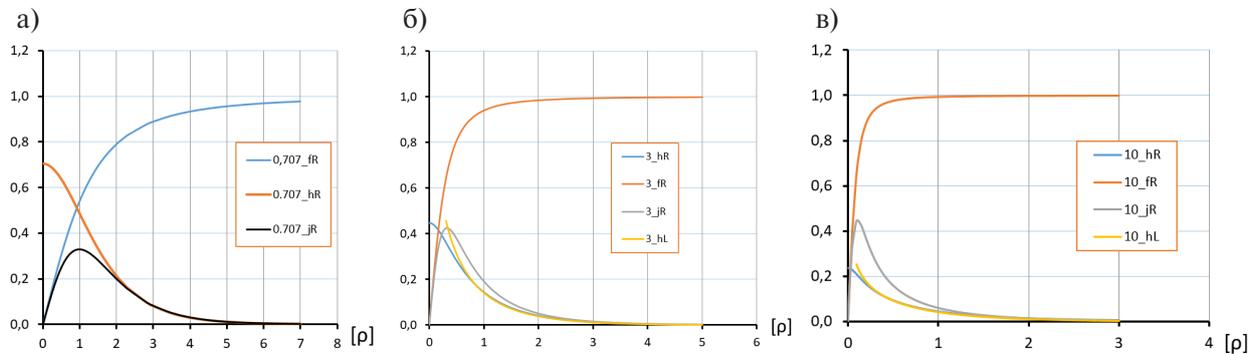


Рис. 2. Зависимости параметра порядка $f_R(\rho)$, напряженности магнитного поля $h_R(\rho)$ и $h_L(\rho) = K_0(\rho) / \phi$, а также плотности сверхпроводящего тока $j_R(\rho)$ для сверхпроводников с параметрами ϕ : 0,707 (а); 3 (б); 10 (в)

Fig. 2. Dependences of the order parameter $f_R(\rho)$, magnetic field strength $h_R(\rho)$ and $h_L(\rho) = K_0(\rho) / \phi$, as well as the superconducting current density $j_R(\rho)$ for superconductors with parameters ϕ : 0.707 (a); 3 (b); 10 (v)

Ландау [1, с. 63]. На рис. 1а и 1б приведено сравнение аналитических решений f_R и h_R при значении параметра $\kappa = 2^{1/2}$ с известными численными решениями $f(\rho)$ и $h(\rho)$ [1, с. 65] уравнений Гинзбурга–Ландау для вихря Абрикосова (при $\phi = 10$), а также показаны плотности тока $j_R(\rho) = |h_R'|$ (7) и $j_1(\rho) = |h'|$ из уравнения (1) для $f = f_R = \rho / (\rho^2 + \beta^2)^{1/2}$.

На рис. 2 представлены графики параметра порядка $f_R(\rho)$, напряженности магнитного поля $h_R(\rho)$ и $h_L(\rho) = K_0(\rho) / \phi$, а также плотности сверхпроводящего тока $j_R(\rho)$ для сверхпроводников с параметрами $\phi = 0,707$; 3 и 10.

Максимальное значение плотности тока $j_{Rm} \approx 0,32 \div 0,47$, следующее из условия $(j_{Rm})' = 0$, соответствует расстоянию от оси вихря $\rho_m \approx \beta = 2^{1/2} / \phi$.

Сопутствующие результаты:

$$h_R(0) = K_0(\beta) / [K_1(\beta) * 2]; \quad (8)$$

$$h_{Rc1} = [\phi * h_R(0) + 3/4] / (2 * \phi). \quad (9)$$

В свете современных сугубо дискретных моделей вихря Абрикосова (типа «кern», «th($\phi * \rho$)» и т.п.) требование обязательного соответствия найденных решений f_R (5) и h_R (6) еще и дифференциальному уравнению (1), связывающему величину плотности сверхпроводящего тока $j_R(\rho)$ с

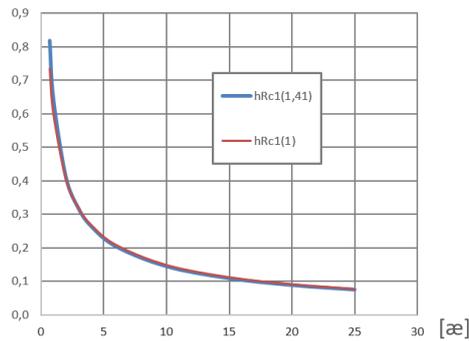


Рис. 3. Аналитические зависимости первого критического магнитного поля $h_{Rc1}(\alpha\epsilon)$ для значений $\kappa = 1$ и $\kappa = 2^{1/2} \approx 1,41$

Fig. 3. Analytical dependences of the first critical magnetic field $h_{Rc1}(\alpha\epsilon)$ for values $\kappa = 1$ and $\kappa = 2^{1/2} \approx 1.41$

производными первого и второго порядка (!) от плавно меняющегося параметра порядка $f(\rho)$, представляется избыточным и допускает использование других критериев для определения величины κ .

Критерием для определения величин κ и β может быть также выполнение точных принципиальных равенств в теории Гинзбурга–Ландау [1, р. 82] при значении $\alpha\epsilon = 1/2^{1/2}$:

$$h_{c1} = h(0) = 1/2^{1/2}. \quad (10)$$

Равенства (8) и (9) точно удовлетворяют критерию (10) при значении $\kappa = 1,1$.

Для лаконичности формул примем значение именно $\kappa = 1$, т.е. $\beta = \alpha\epsilon^{-1}$.

На рис. 3 изображены визуально совпадающие аналитические зависимости первого критического магнитного поля $h_{Rc1}(\alpha\epsilon)$ для значений $\kappa = 1$ и $\kappa = 2^{1/2} \approx 1,41$, что подтверждает приемлемость предложения «лаконичности» ($\kappa = 1$ или $\beta = \alpha\epsilon^{-1}$) для описания свойств вихря Абрикосова в реальных сверхпроводниках второго рода.

Таким образом, для значений $\beta = \alpha\epsilon^{-1}$ величина первого критического магнитного поля h_{Rc1} равна:

$$h_{Rc1} = [\alpha\epsilon * h_R(0) + 0,5] / (2 * \alpha\epsilon), \quad (11)$$

где

$$h_R(0) = K_0(\alpha\epsilon^{-1}) / K_1(\alpha\epsilon^{-1}). \quad (12)$$

На рис. 4. показана найденная нами зависимость (11) первого критического поля $h_{Rc1}(\alpha\epsilon)$, которая соответствует зависимости $h_{c1}(\alpha\epsilon)$ согласно численным расчетам Хардена и Арпа [1, с. 68, рис. 13], а также приведены значения первого критического поля при $\alpha\epsilon \gg 01$ по формуле Абрикосова $h_{Ac1}(\alpha\epsilon) = [\ln \alpha\epsilon + 0,08] / (2 * \alpha\epsilon)$ [1, с. 68, 3.41].

При значении $\kappa = 1$ нами также аналитически подтверждено следующее из (9) классическое [1, с. 69] соотношение между величинами $h(0)$ и «двукратным h_{c1} »:

$$h_R(0) = 2 * h_{Rc1} - 1 / (2 * \alpha\epsilon), \quad (13)$$

справедливое для любых значений параметра $\alpha\epsilon > 0,707$.

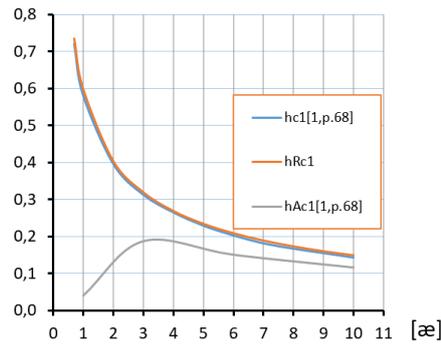


Рис. 4. Зависимость (11) первого критического поля $h_{Rc1}(\text{æ})$
 Fig. 4. Dependence (11) of the first critical field $h_{Rc1}(\text{æ})$

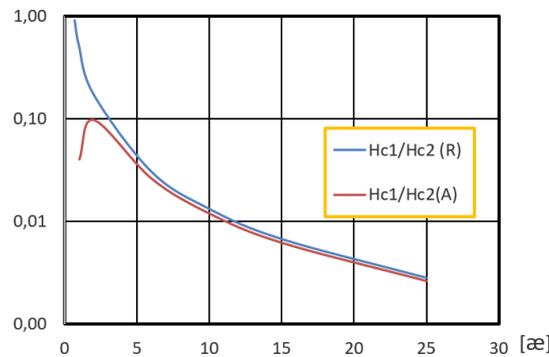


Рис. 5. Отношения абсолютных значений нижнего и верхнего критических магнитных полей
 $H_{c1}/H_{c2}(R) = h_{Rc1}/\text{æ}$ и $H_{c1}/H_{c2}(A) = h_{Rc1}/\text{æ}$ [1, с. 68]
 Fig. 5. Ratios of the absolute values of the lower and upper critical magnetic fields
 $H_{c1}/H_{c2}(R) = h_{Rc1}/\text{æ}$ and $H_{c1}/H_{c2}(A) = h_{Rc1}/\text{æ}$ [1, p. 68]

Отношения абсолютных значений нижнего и верхнего критических магнитных полей $H_{c1}/H_{c2}(R) = h_{Rc1}/\text{æ}$ и $H_{c1}/H_{c2}(A) = h_{Rc1}/\text{æ}$ [1, с. 68] представлены на рис. 5.

Очевидно преимущество нашего R -подхода к оценке $H_{c1}/H_{c2}(R)$ для сверхпроводников второго рода с любым значением параметра $\text{æ} > 0,707$.

Для сверхпроводников с параметром $\text{æ} \gg 1$ отметим совпадение результатов теории Гинзбурга–Ландау для вихря Абрикосова и нашего подхода.

При значениях $\text{æ} \gg 1$, с учетом свойств функций Макдональда [2] $K_0(\beta) \approx \ln \text{æ}$ и $K_1(\beta) \approx \text{æ}$, полученные нами функции $f_R(\rho)$, $h_R(\rho)$ и $h_R(0)$ (формулы (5), (6), (8), (9)) переходят в классические асимптотики формул Лондонов и Абрикосова [1, с. 64, 69]:

$$h_R(\rho) \approx K_0(\rho)/\text{æ} = h_L(\rho); \quad (14)$$

$$h_R(0) \approx \ln \text{æ}/\text{æ} = h_A(0); \quad (15)$$

$$f_R(\rho \ll 1) \approx \text{æ} * \rho = f_A(\rho \ll 1). \quad (16)$$

Выводы

В настоящей работе найдена следующая R -структура (f_R, h_R, j_R) вихря Абрикосова:

$$f_R = \rho / (\rho^2 + \alpha^{-2})^{1/2}; \quad (17)$$

$$h_R = K_0 \left[(\rho^2 + \alpha^{-2})^{1/2} \right] / K_1(\alpha^{-1}); \quad (18)$$

$$h_R(0) = K_0(\alpha^{-1}) / K_1(\alpha^{-1}); \quad (19)$$

$$j_R = \left| h_R' \right| = \rho * K_1 \left[(\rho^2 + \alpha^{-2})^{1/2} \right] / \left[(\rho^2 + \alpha^{-2})^{1/2} * K_1(\alpha^{-1}) \right]. \quad (20)$$

Эта структура представляет собой аналитическое решение теории сверхпроводимости Гинзбурга–Ландау и является справедливой для любого значения параметра $\alpha > 0,707$, удовлетворяющее граничным условиям для вихря Абрикосова и условию квантованию магнитного потока.

Аналитическая зависимость первого критического магнитного поля h_{Rc1} от параметра α и абсолютных значений нижнего и верхнего критических магнитных полей имеет следующий вид:

$$h_{Rc1} = \left[\alpha * K_0(\alpha^{-1}) / K_1(\alpha^{-1}) + 1/2 \right] / (2 * \alpha) = \alpha * H_{c1} / H_{c2}. \quad (21)$$

Следует отметить, что для определения структуры вихря Абрикосова нами не использованы «модельные» представления, рядные приближения и математические аппроксимации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Сан-Жам Д., Сарма Г., Томас Е. Сверхпроводимость второго рода. М.: Мир, 1970. 286 с.
- [2] Бейтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции. Т. 2. М.: Наука, 1974. 295 с.
- [3] Рогожкин В.В., Васильев Л.И. Критические магнитные поля в сверхпроводниках в широком диапазоне параметра α // Физика твердого тела. 1982. Т. 24, № 6. С. 1908–1910.
- [4] Де Жен П. Сверхпроводимость металлов и сплавов. М.: Мир. 1968, 279 с.
- [5] Гинзбург В.Л., Киржница Д.А. Проблема высокотемпературной сверхпроводимости. М: Наука, 1977. 400 с.
- [6] Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. М.: Наука, 1982. 145 с.
- [7] Абрикосов А.А. Основы теории металлов. М.: Наука. 1987. 520 с.
- [8] Винтайкин Б.Е. Физика твердого тела. М.: МГТУ им. Баумана, 2008. 360 с.
- [9] Бардин Д. Новое в изучении сверхпроводимости. М.: Физматгиз, 1982. 729 с.
- [10] Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. 2-е изд. М.: МЦНМО, 2000. 397с.
- [11] Корпін N.B. Theory of Nonequilibrium Superconductivity. Oxford: Clarendon Press, 2001. 342 p. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198507888.001.0001>
- [12] Черноплеков Н.А. Сверхпроводниковые технологии. Современное состояние и перспективы практического применения // Вестник РАН. 2001. Т. 71, № 4. С. 303–319.
- [13] Лыков С.В. Сверхпроводимость полупроводников. СПб.: Наука, 2001. 104 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

РОГОЖКИН Владимир Владимирович – главный специалист, АО «Атомпроект», канд. физ.-мат. наук.

E-mail: vvrogozhkin@atomproekt.com

ГОРЫНИН Владимир Игоревич – начальник лаборатории, Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей», д-р техн. наук.
E-mail: z1dehy97@mail.wplus.net

ЖИТОМИРСКИЙ Максим Алексеевич – студент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
E-mail: maxzhitom@yandex.ru

REFERENCES

- [1] **D. Saint-James, G. Sarma, E.J. Thomas**, Type II superconductivity. Mir, Moscow, 1970.
- [2] **H. Bateman, A. Erdelyi**, Higher transcendental functions. Vol. 2. Nauka, Moscow, 1974.
- [3] **V.V. Rogozhkin, L.I. Vasiliev**, Kriticheskie magnitnye polia v sverkhprovodnikakh v shirokom diapazone parametra α [Critical magnetic fields in superconductors in a wide range of the parameter α], Fizika tverdogo tela [Solid state physics], 24 (6) (1982) 1908–1910.
- [4] **P.-G. de Gennes**, Superconductivity of metals and alloys. Mir, Moscow, 1968.
- [5] **V.L. Ginzburg, D.A. Kirzhnitsa**, Problema vysokotemperaturnoi sverkhprovodimosti [The problem of high temperature superconductivity]. Nauka, Moscow, 1977.
- [6] **V.V. Schmidt**, Vvedenie v fiziku sverkhprovodnikov [Introduction to Superconductor Physics]. Nauka, Moscow, 1982.
- [7] **A.A. Abrikosov**, Osnovy teorii metallov [Basics of metal theory]. Nauka, Moscow, 1987.
- [8] **B.E. Vintaikin**, Fizika tverdogo tela [Solid state physics]. Bauman MSTU Publ., Moscow, 2008.
- [9] **D. Bardin**, Novoe v izuchenii sverkhprovodimosti [New in the study of superconductivity]. Fizmatgiz, Moscow, 1982.
- [10] **V.V. Schmidt**, Vvedenie v fiziku sverkhprovodnikov [Introduction to Superconductor Physics]. 2nd ed. MCCME, Moscow, 1982.
- [11] **N. Kopnin**, Theory of Nonequilibrium Superconductivity. Clarendon Press, Oxford, 2001. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198507888.001.0001>
- [12] **N.A. Chernoplekov**, Sverkhprovodnikovye tekhnologii: sovremennoe sostoianie i perspektivy prakticheskogo primeneniia [Superconductor technologies: current state and prospects for practical application]. Herald of the Russian Academy of Sciences, 71 (4) (2001) 303–319.
- [13] **S.V. Lykov**, Sverkhprovodimost' poluprovodnikov. Nauka, St. Petersburg, 2001.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Vladimir V. ROGOZHKIN – JSC “Atomproekt”.
E-mail: vvrogzhkin@atomproekt.com

Vladimir I. GORYNIN – Central Research Institute of Structural Materials “Prometey”.
E-mail: z1dehy97@mail.wplus.net

Maxim A. ZHITOMIRSKIY – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
E-mail: maxzhitom@yandex.ru

Поступила: 21.05.2024; Одобрена: 20.06.2024; Принята: 22.06.2024.
Submitted: 21.05.2024; Approved: 20.06.2024; Accepted: 22.06.2024.

Научная статья

УДК 621.762

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30206>



А.М. Грачева, И.А. Полозов , А.Н. Борисов,
В.Ш. Суфияров, А.А. Попович

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

 igor.polozov@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА С ДОБАВЛЕНИЕМ МЕДИ, ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДОМ СТРУЙНОГО НАНЕСЕНИЯ СВЯЗУЮЩЕГО С ПОСЛЕДУЮЩИМ СПЕКАНИЕМ

Аннотация. В данной статье рассматриваются интерметаллидные титановые сплавы на базе TiAl, изготовленные с использованием аддитивной технологии струйного нанесения связующего с добавлением меди. Порошок сплава на основе TiAl был смешан с порошком меди в различных концентрациях (0, 2, 4 и 6 вес.%). Из порошковой смеси методом струйного нанесения связующего с последующим спеканием были изготовлены образцы. Добавление меди значительно улучшило плотность образцов после спекания (с 3,65 г/см³ для образцов TiAl без добавления меди до 3,99 г/см³ для образцов TiAl с 2% меди). Металлографический анализ показал снижение пористости с 23% до 2,5% при добавлении 2% меди. Проведен анализ микротвердости образцов и механических свойств на растяжение.

Ключевые слова: струйное нанесение связующего, аддитивное производство, интерметаллидный сплав, алюминид титана.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30004 «Разработка новых функциональных материалов, интеллектуальных конструкций и технологий их создания методами аддитивного производства на основе современных подходов моделирования и прогнозирования свойств», <https://rscf.ru/project/23-79-30004/>.

Для цитирования:

Грачева А.М., Полозов И.А., Борисов А.Н., и др. Исследование интерметаллидного титанового сплава с добавлением меди, изготовленного методом струйного нанесения связующего с последующим спеканием // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 2. С. 96–105. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30206>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30206>

A.M. Gracheva, I.A. Polozov , A.N. Borisov,
V.S. Sufiiarov, A.A. Popovich

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

 igor.polozov@gmail.com

INVESTIGATION OF INTERMETALLIC TITANIUM ALLOY WITH COPPER ADDITION MADE BY BINDER JETTING WITH SUBSEQUENT SINTERING

Abstract. This article examines intermetallic titanium alloys based on TiAl, fabricated using binder jetting additive manufacturing technology with the addition of copper. TiAl-based alloy powder was mixed with copper powder in various concentrations (0, 2, 4, and 6 wt.%). Samples were fabricated from the powder mixture using binder jetting followed by sintering. The addition of copper significantly improved the density of the sintered samples (from 3.65 g/cm³ for TiAl samples without copper addition to 3.99 g/cm³ for TiAl samples with 2% copper). Metallographic analysis showed a reduction in porosity from 23% to 2.5% with the addition of 2% copper. An analysis of the microhardness of the samples and their tensile properties was also conducted.

Keywords: binder jetting, additive manufacturing, intermetallic alloy, titanium aluminide.

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-79-30004 “Development of new functional materials, intelligent structures and technologies for their creation using additive manufacturing methods based on modern approaches to modeling and predicting properties”. Available online: <https://rscf.ru/project/23-79-30004>.

Citation:

A.M. Gracheva, I.A. Polozov, A.N. Borisov, et al., Investigation of intermetallic titanium alloy with copper addition made by binder jetting with subsequent sintering, *Global Energy*, 30 (02) (2024) 96–105, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30206>

Введение. Интерметаллидные сплавы на основе алюминиды титана (TiAl) привлекли значительный интерес в различных отраслях благодаря их механическим свойствам, низкой плотности и хорошей стойкости к окислению [1, 2]. Аддитивные технологии (АТ) предлагают новые возможности для производства изделий сложной формы из сплавов на основе TiAl [3]. Метод струйного нанесения связующего, относящийся к АТ, зарекомендовал себя как перспективная технология для изготовления металлических изделий [4–6]. Данный метод позволяет изготавливать детали практически конечной формы с минимальными отходами материала, более короткими производственными циклами и более низкими затратами по сравнению с традиционными методами производства.

Несмотря на имеющиеся преимущества метода струйного нанесения связующего, другие методы аддитивного производства, такие как селективное лазерное плавление (СЛП) и селективное электронно-лучевое плавление (СЭЛП), на данный момент уже используются применительно к сплавам на базе TiAl [7, 8]. Однако процессы СЛП и СЭЛП для интерметаллидных сплавов сталкиваются с определенными проблемами, включая образование дефектов, таких как трещины. Кроме того, высокая температура плавления и низкая теплопроводность TiAl-сплавов делают их подверженными тепловым градиентам и остаточным термическим напряжениям в процессе охлаждения [9]. В связи с этим для получения изделий из интерметаллидных сплавов методами

СЛП и СЭЛП требуется дорогостоящее оборудование, обладающее рядом функций, которые отсутствуют в наиболее распространенном коммерчески доступном оборудовании, работающем по данным технологиям. Технология струйного нанесения связующего основана на послойном нанесении связующего вещества на порошковый материал, формирующем изделие слой за слоем. Специальная печатающая головка распыляет связующее на тонкий слой порошка, склеивая частицы, после чего наносятся последующие слои до получения готовой модели. Эта технология экономически выгоднее по сравнению с СЛП и СЭЛП благодаря более низкой стоимости оборудования и энергоэффективности. Струйное нанесение связующего также обеспечивает более высокую производительность и требует менее сложной постобработки, что дополнительно снижает общие производственные расходы.

Известно, что сплавы на основе TiAl сложно уплотнить из порошков методом спекания без давления [10], что важно для сохранения сложной формы детали при использовании технологии струйного нанесения связующего. Основной причиной плохой способности к спеканию этих сплавов является их низкий коэффициент самодиффузии [11].

Для преодоления этих проблем исследуются альтернативные подходы, включая добавление легирующих элементов для улучшения способности к спеканию TiAl-сплавов [12]. Медь (Cu) показала себя перспективной добавкой для улучшения процесса спекания порошков сплавов на основе TiAl. Сообщается, что добавление порошка меди к порошкам сплава TiAl способствует образованию смачивающей жидкой фазы во время спекания, что улучшает перераспределение частиц и усиливает связь между частицами TiAl [10].

Целью данной работы является исследование влияния меди на процесс спекания заготовок образцов, изготовленных из порошков TiAl-сплава методом струйного нанесения связующего, микроструктуру и механические свойства образцов.

Методы и материалы

Порошок сплава на основе TiAl марки ВИТ7Л (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Россия) с номинальным составом Ti-48Al-2Cr-2Nb-1.5V-0.1Gd (ат.%), сферической формой частиц и средним размером частиц 39 мкм использовался в качестве основного материала (рис. 1а). Порошок меди марки ПМС-1 (чистота 99,5%) со средним размером частиц 37 мкм и дендритной формой частиц использовался в качестве добавки (рис. 1б). Порошок сплава TiAl и порошок меди были смешаны в гравитационном смесителе в течение 12 часов для получения однородной смеси. Были подготовлены смеси порошков с различным содержанием меди: TiAl-0Cu, TiAl-2Cu, TiAl-4Cu и TiAl-6Cu, соответствующие 0, 2, 4 и 6 вес.% меди.

С добавлением подготовленных порошковых смесей методом струйного нанесения связующего с использованием установки ExOne Innovent были изготовлены образцы размером 10 × 10 × 10 мм. В качестве связующего материала при 3D-печати образцов применялось органическое связующее производства компании ExOne (США). При 3D-печати использовались следующие параметры процесса: толщина слоя – 100 мкм, насыщение связующим – 60%, скорость движения устройства для нанесения порошка – 20 мм/с, скорость вращения ролика для выравнивания слоя – 250 об/мин, целевая температура подложки – 50°C. После процесса печати образцы помещались в термическую печь в воздушной атмосфере для отверждения связующего при 180°C в течение 4 часов. Затем образцы очищались от порошка и спекались в вакуумной печи Carbolite Gero (Германия) при 1375°C согласно профилю спекания, показанному на рис. 1д. Температура спекания, использованная в данной работе, была выбрана на основе результатов исследования [10].

Микроструктура образцов после спекания исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Tescan Mira 3 в режиме обратно отраженных электронов. Измерения плотности проводились путем гидростатического взвешивания согласно ГОСТ 20018-74. Относительная плотность образцов после спекания также оценивалась металлографическим методом путем

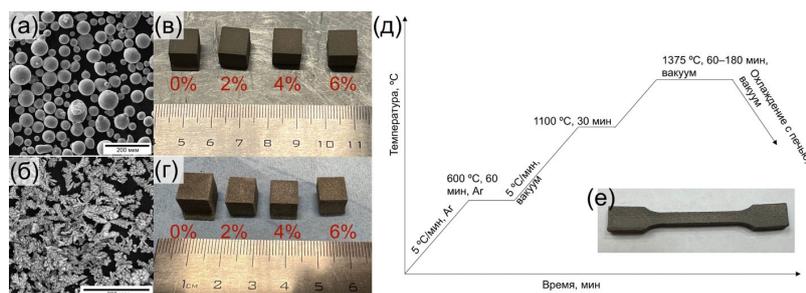


Рис. 1. (а) Порошок TiAl-сплава, (б) порошок меди, фотографии изготовленных образцов (в) до и (г) после спекания, (д) профиль спекания, (е) фото образца для испытаний на растяжение

Fig. 1. (a) TiAl alloy powder, (b) copper powder, photos of fabricated specimens (c) before and (d) after sintering, (e) sintering profile, (f) photo of tensile test specimen

анализа изображений полированных микрошлифов образцов, полученных на оптическом микроскопе с использованием программного обеспечения для анализа изображений ImageJ [13–15]. Образцы для металлографического исследования разрезались вдоль направления выращивания. Измерение микротвердости проводилось с использованием твердомера Buehler VH1150 с индентором Виккерса при нагрузке 500 г и времени выдержки 10 с. Размеры образцов измерялись с помощью цифрового штангенциркуля. Испытания на растяжение проводились на испытательной машине Zwick/Roell Z100 с использованием плоских образцов (рис. 1e) с длиной рабочей части 30 мм и толщиной 4 мм.

Результаты и их обсуждение

Микроструктурный анализ образцов после спекания выявил явные различия в зависимости от содержания меди. Оптические изображения отполированных поперечных сечений показали, что образец TiAl-0Cu продемонстрировал плохое уплотнение в результате спекания, характеризующееся крупными порами и слоистой пористой структурой. Напротив, добавление меди привело к значительному увеличению плотности материала, что наблюдалось в образцах TiAl-2Cu, TiAl-4Cu и TiAl-6Cu (рис. 2).

Измерение плотности образцов показало, что с добавлением меди плотность материала после спекания значительно повысилась за счет снижения пористости. Плотность увеличилась с 3,65 г/см³ для образцов TiAl-0Cu до 3,99 г/см³ для образцов TiAl-2Cu. Металлографический анализ показал снижение пористости с 23% до 2,5% при добавлении 2% Cu. Однако дальнейшее добавление меди не привело к заметному изменению плотности или пористости. Повышение плотности после спекания для образцов с добавлением меди также привело к большей усадке образцов, как показано на рис. 2e, достигающей 18% для образца TiAl-6Cu. Полученные значения усадки типичны для методов аддитивного производства на основе спекания и соответствуют значениям, полученным для сплавов на основе металлов после спекания для уплотнения методом струйной печати связующего вещества [16, 17].

Материал образцов после спекания состоял из duplexной микроструктуры, состоящей из равноосных фаз γ -TiAl и пластинчатых фаз γ -TiAl/ α 2-Ti3Al. Увеличение содержания меди привело к образованию фаз, обогащенных медью, как показано на рис. 3.

Повышение плотности и снижение пористости можно объяснить образованием смачивающей бинарной жидкой фазы Ti-Al, вызванной добавлением меди. Эта жидкая фаза образуется в широком диапазоне температур и обладает хорошей смачиваемостью твердых частиц TiAl. Она эффективно заполняет пустоты и способствует перераспределению частиц, улучшая связь между частицами TiAl и снижая общую пористость спеченных образцов.

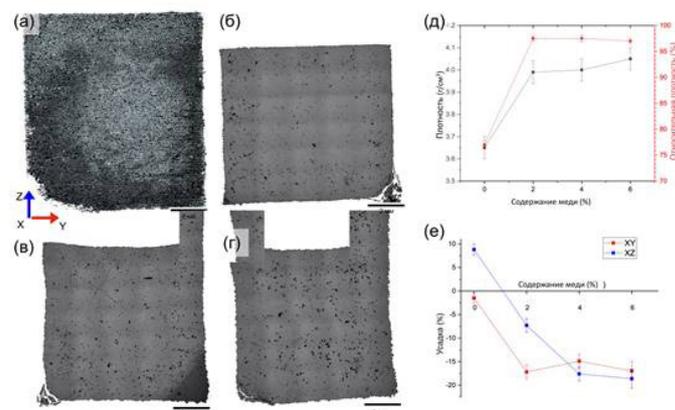


Рис. 2. Изображения микрошлифов спеченных образцов TiAl с содержанием Cu (а) 0, (б) 2, (в) 4, (г) 6 вес.%, (д) изменение плотности и (е) размеров образцов после спекания
 Fig. 2. Micrographs of sintered TiAl samples with (a) 0, (b) 2, (c) 4, (d) 6 wt.% Cu content, (e) density change and (f) shrinkage values of the samples after sintering

Измерения микротвердости показали увеличение микротвердости с повышением содержания меди (табл. 1). Микротвердость образца TiAl-0Cu не измерялась из-за его низкой прочности. Образцы TiAl-2Cu, TiAl-4Cu и TiAl-6Cu продемонстрировали значения микротвердости 326 ± 28 HV, 342 ± 39 HV и 379 ± 33 HV соответственно. Образование дополнительных фаз, богатых медью, способствует упрочнению интерметаллидного сплава на основе TiAl. Прочность на разрыв достигла 243 ± 15 МПа для образца TiAl-4Cu, тогда как относительное удлинение при разрыве составило 0,2%. Увеличение содержания меди с 2 до 4% незначительно повысило прочность на разрыв, тогда как дальнейшее увеличение содержания меди до 6% не привело к значительным изменениям. Низкое удлинение типично для сплавов на основе TiAl из-за их хрупкости [18], однако полученные значения прочности на разрыв были ниже по сравнению с традиционно полученными интерметаллидными сплавами TiAl. Это может быть связано с наличием остаточной пористости и высокой чувствительностью сплавов TiAl к поверхностным дефектам из-за низкой вязкости [19]. Последующее горячее изостатическое прессование потенциально может устранить остаточную пористость и улучшить механические свойства сплава.

Таблица 1
Микротвердость и механические свойства спеченных образцов на растяжение
 Table 1
Microhardness and tensile mechanical properties of sintered specimens

Образец	TiAl-2Cu	TiAl-4Cu	TiAl-6Cu
Микротвердость, HV0,5	326 ± 28	342 ± 39	379 ± 33
Предел прочности, МПа	222 ± 12	243 ± 15	237 ± 14
Относит. удлинение, %	$0,12 \pm 0,03$	$0,20 \pm 0,04$	$0,18 \pm 0,04$

Полученные в данном исследовании результаты соответствуют предыдущим исследованиям процесса спекания интерметаллидных сплавов на основе TiAl. В работе [10] исследовали процесс спекания образцов из сплава Ti-48Al-2Cr-2Nb с содержанием меди до 2 ат.%, полученных традиционными методами порошковой металлургии. В результате авторами было выявлено образование смачивающей жидкой фазы при спекании образцов. Их результаты показали, что образующаяся

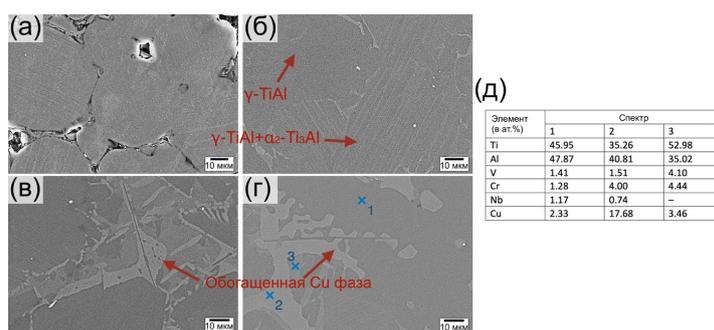


Рис. 3. СЭМ-изображения микроструктуры спеченных образцов TiAl с содержанием Cu (а) 0, (б) 2, (в) 4, (г) 6 вес.%, (д) измерения химического состава, соответствующие точкам, показанным на (г)
 Fig. 3. SEM images of microstructure of sintered TiAl samples with (a) 0, (b) 2, (c) 4, (d) 6 wt.% Cu content, (e) chemical composition measurements corresponding to the points shown in (d)

жидкость в основном является бинарной жидкой фазой Ti-Al, а не фазой, обогащенной медью. Эта жидкая фаза играет решающую роль в улучшении способности к спеканию и уплотнению сплава на основе TiAl.

Повышение способности к спеканию и улучшение механических свойств за счет добавления меди в интерметаллидный сплав на основе TiAl, изготовленный методом струйной печати связующего вещества, открывает новые возможности для производства интерметаллидных компонентов с использованием технологий аддитивного производства.

Выводы

– Данное исследование демонстрирует значительное улучшение способности к спеканию, плотности и увеличение механических свойств интерметаллидного сплава на основе TiAl, изготовленного методом струйного нанесения связующего с последующим спеканием за счет добавления меди. Образование смачивающей бинарной жидкой фазы, вызванной медью, способствует снижению пористости и увеличению микротвердости.

– Спеченные образцы характеризовались duplexной микроструктурой, состоящей из равновесных фаз γ -TiAl и пластинчатых фаз γ -TiAl/ α 2-Ti₃Al. Увеличение содержания меди привело к образованию обогащенных медью фаз.

– Пористость в образцах после спекания снизилась с 23% до 2,5% при добавлении 2% меди к исходному порошку. Микротвердость достигла 379 ± 33 HV при содержании меди 6 вес.%. Прочность на разрыв спеченных образцов достигла 243 ± 15 МПа при содержании меди 4% и относительном удлинении 0,2%.

– Для дальнейшей оценки применимости исследуемого метода в изготовлении изделий из интерметаллидного титанового сплава возможные будущие исследования могут включать изучение влияния горячего изостатического прессования на устранение остаточной пористости и улучшение механических свойств сплава. Также рекомендуется исследовать высокотемпературные свойства полученного материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Appel F., Paul J.D.H., Oehring M. Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology. Weinheim (Germany): Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011. 745 S. DOI: 10.1002/9783527636204
 [2] Bewlay B.P., Nag S., Suzuki A., Weimer M.J. TiAl alloys in commercial aircraft engines // Materials at High Temperatures. 2016. Vol. 33. Iss. 4–5. P. 549–559. DOI: 10.1080/09603409.2016.1183068

- [3] **Wimler D., Lindemann J., Reith M., Kirchner A., Allen M., Vargas W.G., Franke M., Klöden B., Weißgärber T., Güther V., Schloffer M., Clemens H., Mayer S.** Designing advanced intermetallic titanium aluminide alloys for additive manufacturing // *Intermetallics*. 2021. Vol. 131. Art. no. 107109. DOI: 10.1016/j.intermet.2021.107109
- [4] **Dilip J.J.S., Miyanaji H., Lassell A., Starr T.L., Stucker B.** A novel method to fabricate TiAl intermetallic alloy 3D parts using additive manufacturing // *Defence Technology*. 2017. Vol. 13. Iss. 2. P. 72–76. DOI: 10.1016/j.dt.2016.08.001
- [5] **Polozov I., Sufiiarov V., Shamshurin A.** Synthesis of titanium orthorhombic alloy using binder jetting additive manufacturing // *Materials Letters*. 2019. Vol. 243. P. 88–91. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.02.027
- [6] **Li M., Du W., Elwany A., Pei Z., Ma C.** Metal Binder Jetting Additive Manufacturing: A Literature Review // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2020. Vol. 142. Iss. 9. Art. no. 090801. DOI: 10.1115/1.4047430
- [7] **Todai M., Nakano T., Liu T., Yasuda H.Y., Hagihara K., Cho K., Ueda M., M. Takeyama M.** Effect of building direction on the microstructure and tensile properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy additively manufactured by electron beam melting // *Additive Manufacturing*. 2017. Vol. 13. P. 61–70. DOI: 10.1016/j.addma.2016.11.001
- [8] **Scaramuccia M.G., Demir A.G., Caprio L., Tassa O., Previtali B.** Development of processing strategies for multigraded selective laser melting of Ti6Al4V and IN718 // *Powder Technology*. 2020. Vol. 367. P. 376–389. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.04.010
- [9] **Polozov I., Gracheva A., Popovich A.** Processing, Microstructure, and Mechanical Properties of Laser Additive Manufactured Ti2AlNb-Based Alloy with Carbon, Boron, and Yttrium Microalloying // *Metals*. 2022. Vol. 12. Iss. 8. Art. no. 1304. DOI: 10.3390/met12081304
- [10] **Xia Y., Luo S.D., Wu X., Schaffer G.B., Qian M.** The sintering densification, microstructure and mechanical properties of gamma Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy with a small addition of copper // *Materials Science and Engineering: A*. 2013. Vol. 559. P. 293–300. DOI: 10.1016/j.msea.2012.08.100
- [11] **Xia Y., Yu P., Schaffer G.B., Qian M.** Cobalt-doped Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy fabricated by cold compaction and pressureless sintering // *Materials Science and Engineering: A*. 2013. Vol. 574. P. 176–185. DOI: 10.1016/j.msea.2013.03.023
- [12] **Zhang C., Pan Y., Hui T., Xu W., Zhang S., Mughal M.A., Zhang J., Lu X.** The sintering densification, microstructure and mechanical properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb by a small addition of Sn-Al powder // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 15. P. 6947–6955. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.11.096
- [13] **Satterlee N., Torresani E., Olevsky E., Kang J.S.** Automatic detection and characterization of porosities in cross-section images of metal parts produced by binder jetting using machine learning and image augmentation // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2024. Vol. 35. Iss. 3. P. 1281–1303. DOI: 10.1007/s10845-023-02100-9
- [14] **Cabo Rios A., Hryha E., Olevsky E., Harlin P.** Sintering anisotropy of binder jetted 316L stainless steel: Part II – microstructure evolution during sintering // *Powder Metallurgy*. 2022. Vol. 65. Iss. 4. P. 283–295. DOI: 10.1080/00325899.2021.2020486
- [15] **Bafaluy Ojea S., Torrents-Barrena J., Pérez-Prado M.T., Muñoz Moreno R., Sket F.** Binder jet green parts microstructure: advanced quantitative analysis // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 23. P. 3974–3986. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.02.051
- [16] **Zago M., Lecis N.F.M., Vedani M., Cristofolini I.** Dimensional and geometrical precision of parts produced by binder jetting process as affected by the anisotropic shrinkage on sintering // *Additive Manufacturing*. 2021. Vol. 43. Art. no. 102007. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102007
- [17] **Wang Y., Zhao Y.F.** Investigation of Sintering Shrinkage in Binder Jetting Additive Manufacturing Process // *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 10. P. 779–790. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.077
- [18] **Soyama J., Oehring M., Ebel T., Kainer K.U., Pyczak F.** Sintering Behavior and Microstructure Formation of Titanium Aluminide Alloys Processed by Metal Injection Molding // *JOM*. 2017. Vol. 69. Iss. 4. P. 676–682. DOI: 10.1007/s11837-016-2252-z

[19] **Djanarthany S., Viala J.-C., Bouix J.** An overview of monolithic titanium aluminides based on Ti_3Al and $TiAl$ // *Materials Chemistry and Physics*. 2001. Vol. 72. Iss. 3. P. 301–319. DOI: 10.1016/S0254-0584(01)00328-5

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГРАЧЕВА Анна Максимовна – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

E-mail: gracheva.am@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2567-3332>

ПОЛОЗОВ Игорь Анатольевич – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: igor.polozov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5380-3072>

БОРИСОВ Артем Николаевич – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

E-mail: borisov_an@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8321-4247>

СУФИЯРОВ Вадим Шамилевич – ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: vadim.spbstu@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1889-4183>

ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич – директор ИММТ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: popovicha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

REFERENCES

[1] **F. Appel, J.D.H. Paul, M. Oehring**, *Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology*, Wiley VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (Germany), 2011. DOI: 10.1002/9783527636204

[2] **B.P. Bewlay, S. Nag, A. Suzuki, M.J. Weimer**, TiAl alloys in commercial aircraft engines, *Materials at High Temperatures*, 33 (4–5) (2016) 549–559. DOI: 10.1080/09603409.2016.1183068

[3] **D. Wimler, J. Lindemann, M. Reith, A. Kirchner, M. Allen, W.G. Vargas, M. Franke, B. Klöden, T. Weißgärber, V. Güther, M. Schloffer, H. Clemens, S. Mayer**, Designing advanced intermetallic titanium aluminide alloys for additive manufacturing, *Intermetallics*, 131 (2021) 107109. DOI: 10.1016/j.intermet.2021.107109

[4] **J.J.S. Dilip, H. Miyanaji, A. Lassell, T.L. Starr, B. Stucker**, A novel method to fabricate TiAl intermetallic alloy 3D parts using additive manufacturing, *Defence Technology*, 13 (2) (2017) 72–76. DOI: 10.1016/j.dt.2016.08.001

[5] **I. Polozov, V. Sufiiarov, A. Shamshurin**, Synthesis of titanium orthorhombic alloy using binder jetting additive manufacturing, *Materials Letters*, 243 (2019) 88–91. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.02.027

[6] **M. Li, W. Du, A. Elwany, Z. Pei, C. Ma**, Metal Binder Jetting Additive Manufacturing: A Literature Review, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142 (9) (2020) 090801. DOI: 10.1115/1.4047430

[7] **M. Todai, T. Nakano, T. Liu, H.Y. Yasuda, K. Hagihara, K. Cho, M. Ueda, M. Takeyama**, Effect of building direction on the microstructure and tensile properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy additively manufactured by electron beam melting, *Additive Manufacturing*, 13 (2017) 61–70. DOI: 10.1016/j.addma.2016.11.001

- [8] **M.G. Scaramuccia, A.G. Demir, L. Caprio, O. Tassa, B. Previtali**, Development of processing strategies for multigraded selective laser melting of Ti6Al4V and IN718, *Powder Technology*, 367 (2020) 376–389. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.04.010
- [9] **I. Polozov, A. Gracheva, A. Popovich**, Processing, Microstructure, and Mechanical Properties of Laser Additive Manufactured Ti2AlNb-Based Alloy with Carbon, Boron, and Yttrium Microalloying, *Metals*, 12 (8) (2022) 1304. DOI: 10.3390/met12081304
- [10] **Y. Xia, S.D. Luo, X. Wu, G.B. Schaffer, M. Qian**, The sintering densification, microstructure and mechanical properties of gamma Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy with a small addition of copper, *Materials Science and Engineering: A*, 559 (2013) 293–300. DOI: 10.1016/j.msea.2012.08.100
- [11] **Y. Xia, P. Yu, G.B. Schaffer, M. Qian**, Cobalt-doped Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy fabricated by cold compaction and pressureless sintering, *Materials Science and Engineering: A*, 574 (2013) 176–185. DOI: 10.1016/j.msea.2013.03.023
- [12] **C. Zhang, Y. Pan, T. Hui, W. Xu, S. Zhang, M.A. Mughal, J. Zhang, X. Lu**, The sintering densification, microstructure and mechanical properties of Ti–48Al–2Cr–2Nb by a small addition of Sn–Al powder, *Journal of Materials Research and Technology*, 15 (2021) 6947–6955. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.11.096
- [13] **N. Satterlee, E. Torresani, E. Olevsky, J.S. Kang**, Automatic detection and characterization of porosities in cross-section images of metal parts produced by binder jetting using machine learning and image augmentation, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 35 (3) (2024) 1281–1303. DOI: 10.1007/s10845-023-02100-9
- [14] **A. Cabo Rios, E. Hryha, E. Olevsky, P. Harlin**, Sintering anisotropy of binder jetted 316L stainless steel: Part II – microstructure evolution during sintering, *Powder Metallurgy*, 65 (4) (2022) 283–295. DOI: 10.1080/00325899.2021.2020486
- [15] **S. Bafaluy Ojea, J. Torrents-Barrena, M.T. Pérez-Prado, R. Muñoz Moreno, F. Sket**, Binder jet green parts microstructure: advanced quantitative analysis, *Journal of Materials Research and Technology*, 23 (2023) 3974–3986. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.02.051
- [16] **M. Zago, N.F.M. Lecis, M. Vedani, I. Cristofolini**, Dimensional and geometrical precision of parts produced by binder jetting process as affected by the anisotropic shrinkage on sintering, *Additive Manufacturing*, 43 (2021) 102007. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102007
- [17] **Y. Wang, Y.F. Zhao**, Investigation of Sintering Shrinkage in Binder Jetting Additive Manufacturing Process, *Procedia Manufacturing*, 10 (2017) 779–790. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.077
- [18] **J. Soyama, M. Oehring, T. Ebel, K.U. Kainer, F. Pyczak**, Sintering Behavior and Microstructure Formation of Titanium Aluminide Alloys Processed by Metal Injection Molding, *JOM*, 69 (4) (2017) 676–682. DOI: 10.1007/s11837-016-2252-z
- [19] **S. Djanarthany, J.-C. Viala, J. Bouix**, An overview of monolithic titanium aluminides based on Ti₃Al and TiAl, *Materials Chemistry and Physics*, 72 (3) (2001) 301–319. DOI: 10.1016/S0254-0584(01)00328-5

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Anna M. GRACHEVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: gracheva.am@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2567-3332>

Igor A. POLOZOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: igor.polozov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5380-3072>

Artem N. BORISOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: borisov_an@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8321-4247>

Vadim S. SUFIAROV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: vadim.spbstu@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1889-4183>

Anatoliy A. POPOVICH – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: popovicha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

Поступила: 05.06.2024; Одобрена: 25.06.2024; Принята: 27.06.2024.

Submitted: 05.06.2024; Approved: 25.06.2024; Accepted: 27.06.2024.