

Том 27, №2, 2021



Материаловедение. Энергетика

Санкт-Петербург

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

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЭНЕРГЕТИКА MATERIALS SCIENCE. POWER ENGINEERING

(ранее «Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки»)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., главный редактор, научный руководитель
СПбПУ, академик РАН

Александров М.Л., член-корр. РАН

Згуровский М.З., ин. член РАН, академик НАН Украины

Клименко А.В., академик РАН

Костюк В.В., академик РАН

Лагарьков А.Н., академик РАН

Окрепилов В.В., академик РАН

Рудской А.И., академик РАН

Саркисов А.А., академик РАН

Федоров М.П., академик РАН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., главный редактор, научный руководитель
СПбПУ, академик РАН

Кондратьев С.Ю., зам. главного редактора, д-р техн. наук,
профессор СПбПУ

Аксёнов Л.Б., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Башкарёв А.Я., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Боровков А.И., к.т.н., проректор по цифровой трансформации

Гордеев С.К., д-р техн. наук, ст. научн. сотр. ЦНИИМ

Забойн В.Н., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Каляев И.А., д-р техн. наук, академик РАН

Колсун Михал, профессор Технического университета
г. Кошице (Словакия)

Кириллов А.И., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Коровкин Н.В., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Митяков А.В., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Михайлов В.Г., д-р техн. наук, профессор Бранденбургского
ТУ (Германия)

Петриченко М.Р., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Райчик Ярослав, д-р техн. наук, профессор Ченстоховского
политехнического университета (Польша)

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

Сергеев В.В., д-р техн. наук, профессор, проректор СПбПУ
чл-корр РАН, проректор по научно работе СПбПУ

Тендлер М.Б., ин. член РАН, KTH Royal Institute
of Technology (Швеция)

Титков В.В., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Толочко О.В., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

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

Цемленко В.Н., д-р техн. наук, зав. каф. СПбПУ

EDITORIAL COUNCIL

Vasiliev Yu.S. — head of the editorial council, full member of the Russian Academy of Sciences, Scientific director of the Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

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

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

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

Kostiuk V.V. — full member of the Russian Academy of Sciences

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

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

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

Sarkisov A.A. — full member of the Russian Academy of Sciences

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

EDITORIAL BOARD

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

Kondrat'ev S.Yu. — deputy editor-in-chief, Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

Aksenov L.B. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

Bashkarev A.Ya. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

Borovkov A.I. — PhD in Technical Sciences, Vice Rector for Digital Transformation

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

Zaboin B.N. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

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

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

Kirillov A.I. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

Korovkin N.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

Mityakov A.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

Michailov V.G. — Doctor of Technical Sciences, prof. BTU (Germania)

Petrichenko M.R. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

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

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

Sergeev V.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU, corresponding member of the RAS

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. SPbPU

Tolochko O.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

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

Tsamenko V.N. — Doctor of Technical Sciences, Head of Chair SPbPU

Журнал «Материаловедение. Энергетика» (ранее «Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки») 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.

Сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНИТИ 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).

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.)

С 2005 года журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Научной электронной библиотеки на сайте <http://www.elibrary.ru>

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

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

Тел. редакции (812) 294-22-86.

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021

Содержание

Энергетика

Бабиченко И.А., Михайлов А.А., Соколов К.К., Боровков А.И., Галеркин Ю.Б., Максименко И.А., Рекстин А.Ф., Семеновский В.Б., Ядыкин В.К. Опыт газодинамического проектирования центробежных компрессоров турбодетандерных агрегатов. CFD-анализ входного тракта.....	5
Горынин В.И., Рогожкин В.В., Кондратьев С.Ю., Мишин Е.Б., Коленов Е.В., Шеволдин А.В. Кулер для регулирования климата – решение проблемы пустыни.....	23
Маннанов Э.Р., Филин А.Г. Тепловое состояние электрической изоляции статорных обмоток турбогенераторов с воздушным охлаждением.....	38

Металлургия и материаловедение

Козик Е.С., Богодухов С.И., Гарипов В.С., Свиденко Е.В. Влияние режимов высокотемпературного ионного азотирования на свойства твердого сплава ВК8.....	50
Васильева Ю.З., Пак А.Я. Синтез карбида молибдена в самоэкранирующейся электродуговой плазме.....	62
Козик Е.С., Богодухов С.И., Свиденко Е.В., Руднев И.В. Термообработка сплава ВК4.....	73

Contents

Energetics

Babichenko I.A., Mikhailov A.A., Sokolov K.K., Borovkov A.I., Galerkin Yu.B., Maximenko I.A., Rekstin A.F., Semenovskiy V.B., Yadykin V.K. Experience in gas dynamic design of turboexpander centrifugal compressors. Inlet tract CFD analysis.....	5
Gorynin V.I., Rogozhkin V.V., Kondratyev S.Yu., Mishin E.B., Kolenov E.V., Shevoldin A.V. Climate control cooler: the solution to the desert problem.....	23
Mannanov E.R., Filin A.G. Electrical insulation thermal state of turbine generators stator windings wit air-cooling.....	38

Metallurgy and Materials

Kozik E.S., Bogodukhov S.I., Garipov V.S., Svidenko E.V. Influence of high-temperature ion nitriding regimes on the properties of the VK8 hard alloy.....	50
Vassilyeva Yu.Z., Pak A.Ya. Synthesis of molybdenum carbide in self-shielding electric arc plasma.....	62
Kozik E.S., Bogodukhov S.I., Svidenko E.V., Rudnev I.V. Heat treatment of VK4 alloy.....	73

DOI: 10.18721/JEST.27201
УДК 621.515

*И.А. Бабиченко¹, А.А. Михайлов¹, К.К. Соколов¹,
А.И. Боровков², Ю.Б. Галеркин², И.А. Максименко³,
А.Ф. Рекстин², В.Б. Семеновский², В.К. Ядыкин²*

¹ Акционерное общество "Турбохолод",
Москва, Россия;

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

³ Акционерное общество "НПФ "Невинтермаш",
Санкт-Петербург, Россия

ОПЫТ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ ТУРБОДЕТАНДЕРНЫХ АГРЕГАТОВ. CFD-АНАЛИЗ ВХОДНОГО ТРАКТА

Компрессоры разного назначения и типов играют большую роль в газовой и нефтяной промышленности. В газовой промышленности установленная мощность только центробежных компрессоров порядка 55 млн. кВт. Роль турбодетандерных агрегатов (ТДА) количественно как бы вторична (порядка 1 млн. кВт установленной мощности), но без ТДА невозможна транспортировка и переработка природного и попутного нефтяного газа. Важно, чтобы компрессоры ТДА работали с высоким КПД и обеспечивали все многообразие возможных режимов работы агрегата. Основной отечественный производитель турбодетандерных агрегатов АО Турбохолод с середины 2000 гг. привлекает для проектирования компрессоров Санкт-Петербургский политехнический университет, где создан Метод универсального моделирования. Комплекс компьютерных программ выполняет оптимальное проектирование и оценивает возможность работы компрессора на самых разных эксплуатационных режимах с перспективой на десятилетие. Методом универсального моделирования на начало 2021 г. выполнено 22 проекта центробежных компрессоров для более 120 ТДА. Единичная мощность компрессора до 6500 кВт, конечное давление до 12 МПа, суммарная мощность более 400 тысяч киловатт. Хотя методы вычислительной газодинамики (CFD) до сих пор не могут корректно рассчитать газодинамические характеристики центробежного компрессора, расчет течения в неподвижных элементах проточной части представляет корректную информацию. Анализ входного тракта, состоящего из подводящей трубы, соединительного тракта и собственно входного патрубка компрессора, дал информацию о характере течения, показал проблемные места входного тракта, позволил оценить потерю КПД в тракте, наметить направления совершенствования этого элемента проточной части.

Ключевые слова: турбодетандерный агрегат, центробежный компрессор, вычислительная газодинамика, входной тракт, входной патрубок, коэффициент потерь, потеря КПД.

Ссылка при цитировании:

Бабиченко И.А., А.А. Михайлов, К.К. Соколов, А.И. Боровков, Ю.Б. Галеркин, И.А. Максименко, А.Ф. Рекстин, В.Б. Семеновский, В.К. Ядыкин. Опыт газодинамического проектирования центробежных компрессоров турбодетандерных агрегатов. CFD-анализ входного тракта // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 2. С. 5–22. DOI: 10.18721/JEST.27201

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*I.A. Babichenko¹, A.A. Mikhailov¹, K.K. Sokolov¹,
A.I. Borovkov², Yu.B. Galerkin², I.A. Maximenko³,
A.F. Rekstin², V.B. Semenovskiy², V.K. Yadykin²*

¹ Join stock company "Turbokholod", Moscow, Russia;

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia;

³ Jsc "SIF "Nevintermash", St. Petersburg, Russia

EXPERIENCE IN GAS DYNAMIC DESIGN OF TURBOEXPANDER CENTRIFUGAL COMPRESSORS. INLET TRACT CFD ANALYSIS

Compressors of various purposes and types play an important role in the gas and oil industry. In the gas industry, the installed capacity of centrifugal compressors is about 55 million kW. The role of turboexpander aggregates is quantitatively secondary in comparison with pipeline compressors (about 1 million kW of installed capacity), but without turboexpander aggregates, it is impossible to transport and process natural and petroleum gas. It is important that turboexpander aggregate compressors operate with high efficiency and provide all the variety of possible operating flow rates. The main domestic manufacturer of turboexpander aggregates, JSC Turbokholod, has been subcontracting the St. Petersburg Polytechnic University for compressor design since mid-2000. Prof. Y. Galerkin's Universal Modeling Method has been well proven and widely applied in design practice. SPbPU and JSC Turbokholod constantly cooperate since then. By 2021, 22 types of centrifugal compressors have been designed for more than 120 turboexpander aggregates operating in the industry. The unit capacity of the compressor is up to 6500 kW, the outlet pressure is up to 12 MPa, the total capacity of the turboexpanders is more than 400 MW. Although computational fluid dynamic methods still cannot correctly calculate the gas dynamic characteristics of a centrifugal compressor, the calculation of the flow in the stationary elements of the flow path provides correct information. The analysis of the inlet tract, consisting of a supply pipe, a connecting pipe and the compressor inlet nozzle, gave information about the flow structure, showed the problem areas of the inlet tract, made it possible to estimate the loss of efficiency in the tract, and outline the directions for improving this element of the flow path in perspective designs.

Keywords: turboexpander aggregate, centrifugal compressor, computational fluid dynamic, inlet tract, inlet nozzle, the loss coefficient, the loss of efficiency.

Citation:

I.A. Babichenko, A.A. Mikhailov, K.K. Sokolov, A.I. Borovkov, Yu.B. Galerkin, I.A. Maximenko, A.F. Rekstin, V.B. Semenovskiy, V.K. Yadykin, Experience in gas dynamic design of turboexpander centrifugal compressors. Inlet tract CFD analysis, Materials Science. Power Engineering, 27 (02) (2021) 5–22, DOI: 10.18721/JEST.27201

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. В газовой и нефтяной промышленности температуру газа нужно понижать на газоперерабатывающих заводах, для низкотемпературной комплексной обработки природного и попутного газа на головных станциях добычи (иногда также на линии транспорта газа). В зонах вечной мерзлоты на линейных компрессорных станциях применяются агрегаты круглогодичного охлаждения газа [1]. В ТДА газ поступает в турбину, где охлаждается в процессе расширения до нужной температуры (до минус 45 °С на газоперерабатывающих заводах). Турбина ТДА работает за счет энергии давления газа, которую газ получает в компрессоре дожимного или линейного газоперекачивающего агрегата. Мощность турбины ТДА поглощает компрессор, установленный на одном валу с турбиной. Компрессор возвращает газу давление, ушедшее на охлаждение газа в турбине — за вычетом газодинамических и термодинамических потерь.

АО Турбохолд снабжает газовую промышленность агрегатами с осевой турбиной и центробежным компрессором. В ТДА компрессор по размеру больше втрое, а по массе на порядок больше турбины. Энергетически эти машины равнозначны. Их мощность одинаковая, поэтому КПД турбины и компрессора одинаково влияют на потерю мощности компрессора ГПА в агрегате.

Методы и материалы

Результаты сотрудничества АО Турбохолд и ЛГДТМ ЦНТИ СПбПУ

Придавая большое значение роли центробежного компрессора в ТДА, АО Турбохолд с середины 2000 гг. привлекает к газодинамическому проектированию центробежных компрессоров высококвалифицированный коллектив ученых Санкт-Петербургского политехнического университета, возглавляемый проф. Ю. Галеркиным [2–10]. За годы сотрудничества отечественным и зарубежным потребителям поставлены более ста двадцати ТДА с компрессорами по двум десяткам газодинамических проектов ученых-политехников. Примеры на рис. 1 и 2.

Информация о производстве и поставке конечному потребителю на начало 2021 г. в табл. 1.

Газодинамический проект центробежного компрессора должен обеспечить заданную степень сжатия при заданном расходе с наибольшим возможным КПД. Аналитический расчет мощности и КПД компрессора невозможен. Вычислительная газодинамика (CFD) предлагает численное решение уравнений рабочего процесса. Однако несмотря на значительные усилия (в т.ч. ученых-политехников [11–17]), получить точный CFD-расчет характеристик центробежного компрессора пока не удастся. Инженерные методы проектирования базируются на экспериментах с моделями компрессоров. В прошлом столетии было почти обязательным проверить проект нового компрессора испытанием модели. Современные инженерные методы более надежны.

Методом универсального моделирования проф. Ю. Галеркина с середины 1990-х гг. спроектированы и работают в промышленности десятки компрессоров с единичной мощностью до 32 МВт и суммарной мощностью более 5 млн. кВт. Так же хорошо показывают себя проекты компрессоров ТДА. На рис. 3 проектные характеристики двух экземпляров компрессора одного из ТДА сопоставлены с результатами заводских испытаний.



Рис. 1. ТДА АО «Турбохолд» на станции охлаждения газа ГП-16 на Песцовой площади. Турбодетандерный агрегат с горизонтальным валом. Газодинамические проекты ЛГДТМ СПбПУ

Fig. 1. Turboexpanders JSC "Turbokholod" at the gas cooling station GP-16 on Pestsovaya square. The turboexpander with horizontal shaft. Gas-dynamic projects of the LGDTM SPbPU

Таблица 1

**Перечень компрессоров турбодетандерных агрегатов по газодинамическим проектам
Методом универсального моделирования – СПБПУ.
Проектирование, изготовление, испытание, поставка конечному потребителю
– АО «Турбохолд», г. Москва**

Table 1

**The list of turboexpanders' compressors designed according to gas-dynamic
projects by the Universal Modeling Method – SPbPU.
Design, manufacture, testing, delivery to the end user – JSC «Turbokholod», Moscow**

№	Назв.	Мощ./ год кВт	D ₂ , м	$\bar{m}$, кг/с	p _к , МПа	π	n, об/мин	К-во 2015	Сумм. мощн.	Место установки
1	ТК-1	2350/ 2005	0,320	59	11,8	1,311	15500	1	2400	Опытный образец
2	ТК-2	3650/ 2005	0,365	79	8,0	1,333	15500	н.д.	н.д.	н.д.
3	ТК-3	2670/ 2006	0,365	78,1	8,906	1,22	14000	10	26700	Песцовое, Харвутинское
4	ТК- 4/0706	5030/ 2007	0,375	79	6,75	1,424	15500	н.д.	н.д.	н.д.
5	ТК- 4/530	5030/ 2007	0,390	79	6,75	1,424	16250	10	50300	Бованенково
6	ТК-5	3080/ 2007	0,350	77,7	7,75	1,277	16000	7	21500	Заполярье
7	ТК-6	1850/ 2007	0,575	163	8,69	1,070	5000	22	40700	Яринская
8	ТК-7	2400/ 2007	0,275	86,3	13	1,209	16000	6	14400	Юрхарово
9	ТК-8	1660/ 2007	0,275	59,19	13	1,209	16000	4	6600	Юрхарово
10	ТК- 4/410	5580/ 2009	0,410	79	6,75	1,424	14500	30	167400	Бованенково
11	ТК-3а	1200/ 2010	0,365	59	8	1,12	12000	4	4800	Находкинское
12	ТК-8а	1660/ 2010	0,24	59	10,8	1,18	16000	1	1660	Г.д Ямбург
13	ТК-10	2099/ 2012	0,310	36,05	13,02	1,32	16500	н.д.	н.д.	н.д.
14	ТК-11	3231/ 2012	0,310	103,5	12,2	1,208	15000	н.д.	н.д.	н.д.
15	ТК-11А	3320/ 2012	0,340	105,3	12,2	1,208	13280	1	3300	Юрхаровское
16	ТК-12	1792/ 2012	0,275	60,5	13	1,244	15500	3	5400	Самбургское
17	ТК-13	1962/ 2013	0,300	85,19	12,53	1,171	13300	4	7800	Ачимовское
18	ТК-14	3651/ 2013	0,320	84,0	14,2	1,365	16000	н.д.	н.д.	н.д.
19	ТК-14А	2290/ 2013	0,340	84,0	12,5	1,202	12500	2	4600	Яро-Яхинское

Окончание табл. 1

20	TK-15	762/ 2014	0,490	88,91	5,513	1,072	5100	8	6100	Чаяндынское
21	TK-16	6363/ 2017	0,390	88,4	6,3	1,460	16250	1	6400	Бованенково
22	TK-17	5135/ 2017	0,400	84,6	6,3	1,406	15900	1	5100	Бованенково
23	TK-18	680/ 2018	0,280	27,26	5,398	1,169	15500	3	2000	Узбекистан
25	TK-21	3282/ 2020	0,300	104,9	13,41	1,23	15000	8	26300	Салман
26	TK-22	2703/ 2020	0,340	90,16	7,461	1,26	13500	В изг.	н.д.	Ковыткинское
	ВСЕГО							126	401800	



Рис. 2. ТДА АО «Турбохолод» на станции охлаждения газа КС Ярынская.
Турбодетандерный агрегат с вертикальным валом. Газодинамические проекты ЛГДТМ СПбПУ
Fig. 2. Turboexpanders JSC "Turbokholod" at the CS Yarynskaya gas cooling station.
Turboexpander with vertical shaft. Gas-dynamic projects of the LGDTM SPbPU

Результаты испытаний подтверждают вид характеристики по проекту. Превышение полезного напора связано с тем, что реальный КПД компрессора по высококачественному проекту и изготовлению выше оговоренного ТЗ. Коэффициент теоретического напора ψ_T равен $\psi_T = 1 - \varphi_2 \operatorname{ctg} \beta_2$ (φ_2 – коэффициент расхода на выходе из рабочего колеса, β_2 – угол относительной скорости на выходе из рабочего колеса). Условный коэффициент расхода Φ и коэффициент расхода на выходе из рабочего колеса φ_2 связаны соотношением $\Phi = 4 \frac{\rho_2}{\rho_n} \frac{b_2}{D_2} \varphi_2$ (ρ_n , ρ_2 – плотность газа на входе в компрессор и на выходе из рабочего колеса, b_2 – высота лопаток на выходе из рабочего колеса, D_2 – диаметр рабочего колеса). Чем больше число Маха M_u , тем больше ψ_T , так как больше ρ_2 и меньше φ_2 . Почти совпадающие точки – это повторные измерения, демонстрирующие хорошую точность измерений. Измеренные параметры двух экземпляров компрессора практически совпадают. Очередные заводские испытания подтвердили высокое качество проектирования Методом универсального моделирования и качество изготовления компрессоров.

CFD-анализ входного тракта перспективного компрессора

Применительно к перспективному компрессору ТДА оказалось необходимым проанализировать входной тракт. Математической модели этого специфического элемента в Методу универ-

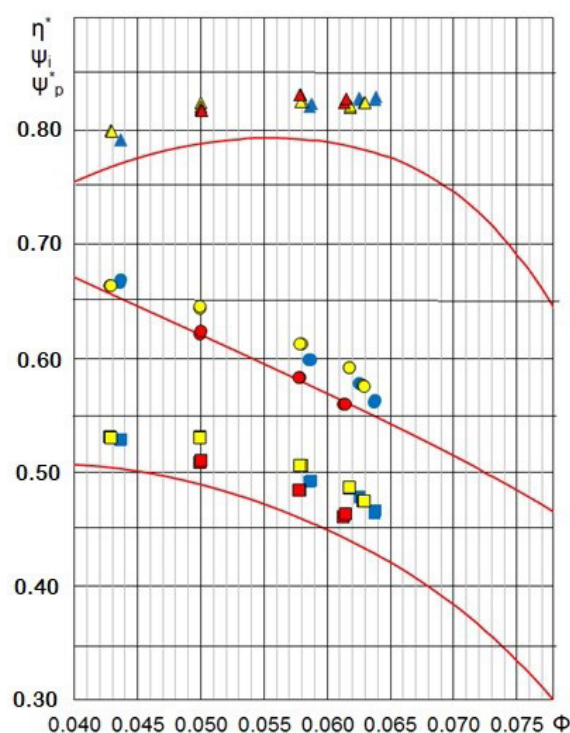


Рис. 3. Безразмерные характеристики компрессора ТДА, г/д проект Методом универсального моделирования. Красные линии – проектные характеристики при $M_u = 0,616$. Точки – результаты испытаний 2-х компрессоров при $M_u = 0,541 – 0,708$

Fig. 3. Dimensionless characteristics of the turboexpander's compressor, gas-dynamic project by the Universal Modeling Method. Red lines – design characteristics at $M_u = 0.616$. Points – test results of 2 compressor units at $M_u = 0.541 – 0.708$

сального моделирования нет. Стандартный корпус ТДА по всем размерам оказался подходящим для компрессора с объемным расходом в 1,5 раза большим, чем у предшествующих компрессоров в этом корпусе. Применение корпуса большей размерности было крайне нежелательным по срокам и стоимости реализации проекта. Но даже сугубо приближенный анализ Методом универсального моделирования показал, что критическим элементом является недостаточное проходное сечение входного отверстия корпуса. Увеличение отверстия оказалось конструктивно возможным, но возникали газодинамические вопросы.

Как упоминалось выше, CFD-расчеты не гарантируют корректный расчет характеристик центробежного компрессора. Но CFD-расчеты, и даже оптимизация не компрессора целиком, а только неподвижных элементов проточной части надежны и проверены экспериментально в Западной Европе и Японии [18–24].

На рис. 4 показан корпус ТДА, и входной тракт корпуса с увеличенным входным отверстием.

Исходное входное отверстие в цилиндрическом корпусе с размером 190 мм вдоль оси корпуса было симметричным относительно вертикальной оси на разрезе А-А. Продольный размер 330 мм у исходного отверстия не обеспечивал нужное проходное сечение. Предложенное конструкторами увеличение размера до 481 мм обеспечивало нужное проходное сечение. Но из-за нарушения симметрии при входе в корпус поток может начать вращаться относительно оси ротора. Согласно основному уравнению турбомашин, вращение потока на входе влияет на теоретический напор $h_T = c_{u2}u_2 - c_{u1}u_1$ (u_2, u_1 – окружная скорость на выходе и на входе в рабочее колесо c_{u2}, c_{u1} – окружная составляющая скорости – закрутка – на выходе и на входе в рабочее колесо). Несимметричность входного отверстия может создать закрутку потока c_{u1} по часовой стрелке. При вра-

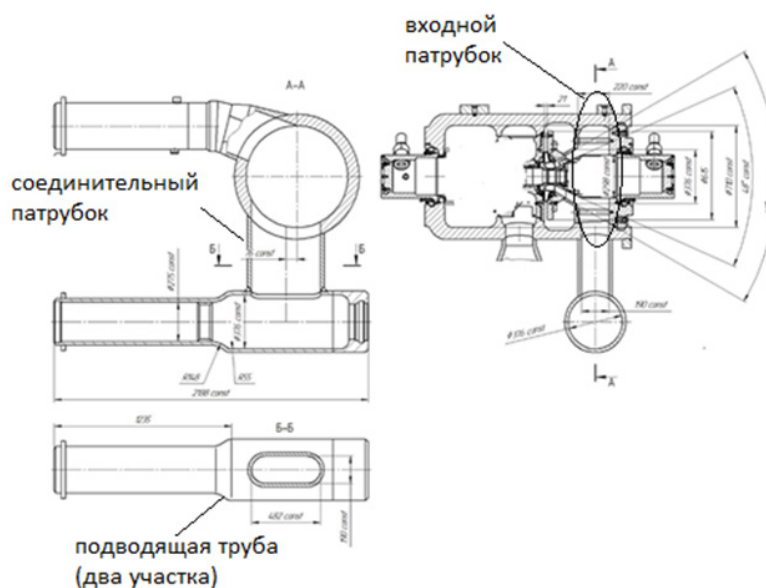


Рис. 4. Входной тракт и корпус компрессора ТДА для CFD-анализа
Fig. 4. Turboexpander's compressor inlet tract and casing for CFD analysis

щении ротора против часовой стрелки на рис. 4 закрутка отрицательная $s_{u1} < 0$. Отрицательная закрутка увеличивает теоретический напор и, соответственно, мощность компрессора. При отрицательной закрутке КПД снижается, а характеристики смещаются в сторону большего расхода. Направляющие ребра в коническом конфузоре перед рабочим колесом существенно уменьшают s_{u1} , но не ликвидируют полностью. Вращение потока перед направляющими ребрами увеличит ударные потери.

Сложный характер течения нельзя количественно оценить инженерными методиками. CFD-расчет дает возможность проанализировать структуру потока и потери напора, оценить целесообразность корректировки формы входного патрубка.

Методика CFD-расчета

Для CFD-расчетов использовался код общего назначения для решения задач гидрогазодинамики ANSYS/CFX. Общая методика CFD-расчетов выбрана по результатам исследований, проведенных в работах [25–27].

Согласно представленным эскизам проточной части агрегата была разработана пространственная геометрическая модель газового домена элементов входного тракта, содержащая внутреннюю область двух участков подводящей трубы, отличающихся наружным диаметром, патрубка с овальным поперечным сечением, несимметрично соединяющего подводящую трубу с корпусом агрегата, входной камеры корпуса и осесимметричного кольцевого конфузора перед рабочим колесом компрессора; описанная расчетная область была дополнена осесимметричной кольцевой трубой за конфузором, выполняющей роль выходного участка, необходимого для проведения CFD-расчетов.

При построении сеточной расчетной модели использовалась неструктурированная гибридная сетка с заданным сгущением к границам, определяющим стенки проточной части, что обеспечивает учет пограничного слоя и удовлетворение требованиям пристеночных функций и используемой модели турбулентности SST, наиболее универсальной и положительно зарекомендовавшей себя в CFD-расчетах элементов турбокомпрессоров: размер первой пристеночной ячейки 10 мкм, коэффициент увеличения размера 1,2 — общее количество расчетных ячеек составило ~ 15 млн.

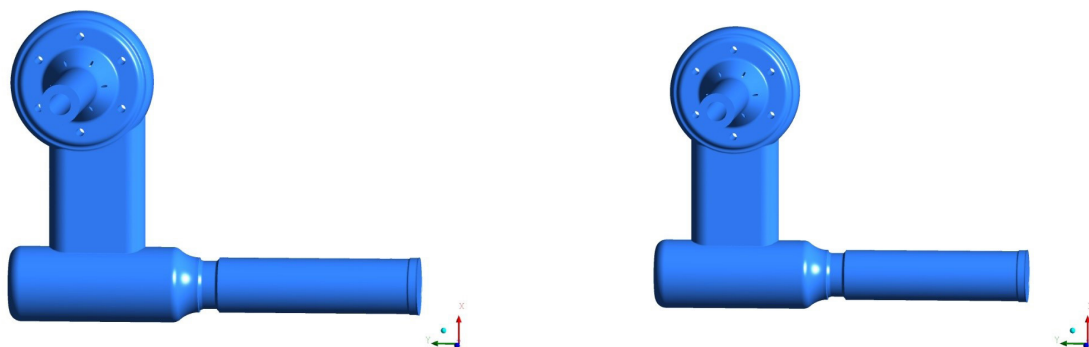


Рис. 5. Геометрическая модель расчетной области CFD-анализа. Слева несимметрично расположенное входное отверстие; справа симметрично расположенное входное отверстие

Fig. 5. Geometric model of the CFD computational domain.

On the left, the asymmetrically located inlet; on the right, the symmetrically located inlet

Для моделирования течения в ANSYS/CFX был произведен перевод на нормальные условия при входе для воздуха в качестве модельного газа. В качестве граничных условий на входной границе использовано условие втекания воздуха со свойствами совершенного газа с полным давлением 101325 Па и температурой 288,15 К, соответствующими значению массового расхода 1,796 кг/с, устанавливаемому с условием вытекания на выходной границе. Эти параметры соответствуют условию приближенного моделирования номинального режима компрессора в эксплуатационных условиях.

Стенки проточной части считаются гидравлически гладкими, адиабатными и соответствующими граничному условию прилипания.

Модели расчетной области при несимметричном и симметричном расположении входного отверстия показаны на рис. 5.

Результаты

Влияние несимметричности входного отверстия при отсутствии направляющих лопаток. В осесимметричном входном конфузоре есть шесть ребер обтекаемой формы, которые расположены в меридиональной плоскости. Они выполняют роль направляющих лопаток, препятствующих вращению потока на входе в колесо. Направляющие ребра в осесимметричном конфузоре при представленном здесь расчете не установлены, чтобы выяснить, какую величину закрутки потока вызывает несимметричность входного отверстия в корпусе.

Линии тока и векторы скорости во входном тракте иллюстрирует рис. 6. Линии тока синего цвета показывают зоны с малыми скоростями потока.

В точки зрения одномерной теории CFD-расчет дал парадоксальный результат. При несимметричном входе закрутка небольшая, но при симметричном входе поток энергично вращается в сечении входа в рабочее колесо. Причина в специфической организации течения в подводящем тракте.

При переходе из трубы в соединительный патрубок поток поворачивает на 90° и образует в патрубке большую зону отрыва при обтекании острого угла. Зона отрыва при несимметричном входе отесняет поток в сторону оси симметрии. Зона отрыва компенсирует несимметричный вход. В противоположном направлении отрыв влияет при симметричном расположении входного отверстия. В этом случае зона отрыва отесняет поток от оси симметрии. Поток приобретает активную закрутку.

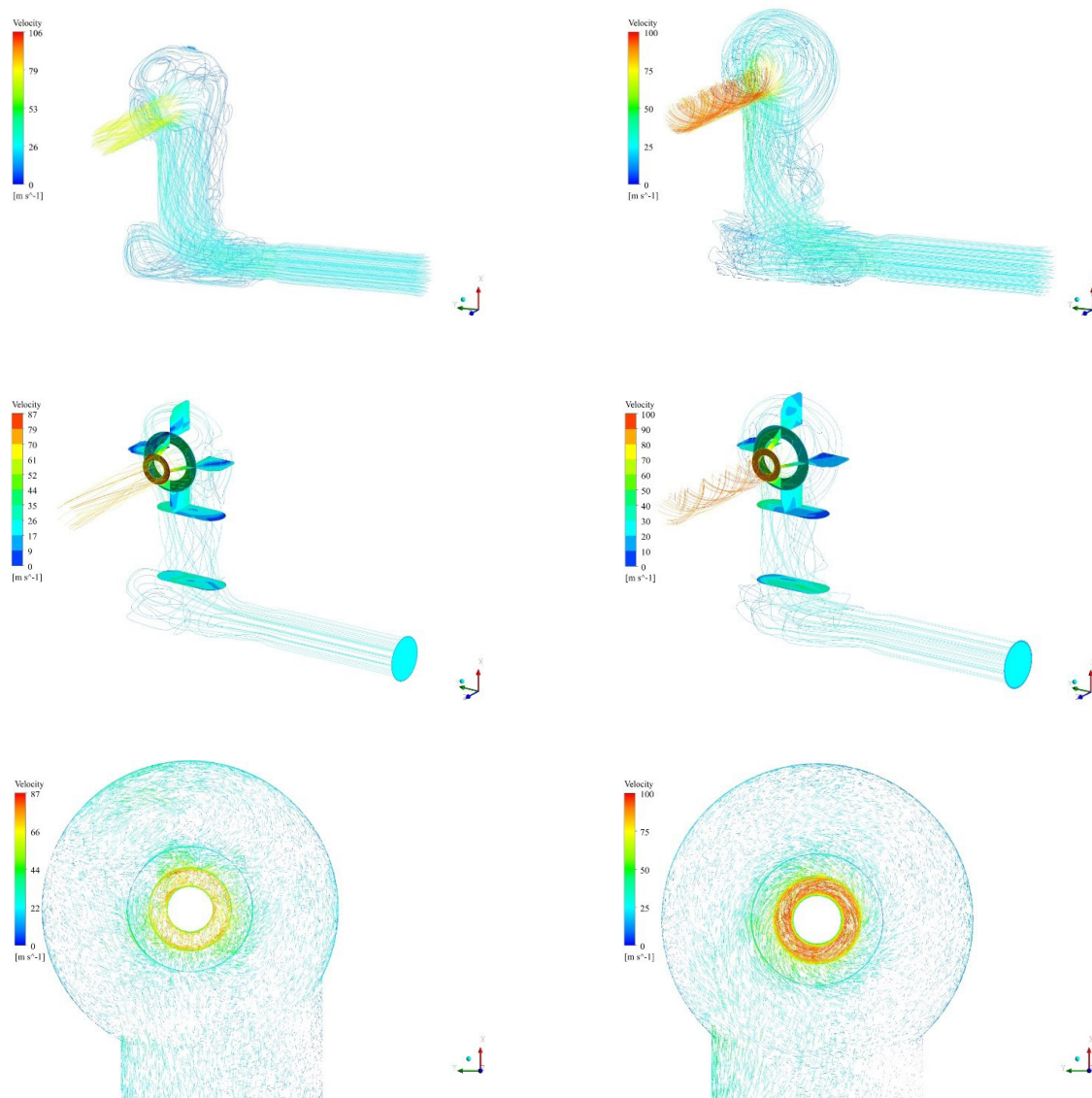


Рис. 6. Линии тока во входном тракте, изотакхи и векторы скорости в радиальной плоскости входного патрубка.
Слева – несимметричный вход, справа – симметричный вход

Fig. 6. Streamlines in the inlet track, isotachs and velocity vectors in the radial plane of the inlet nozzle.
Left – the asymmetrically located inlet, right – the symmetrically located inlet

CFD-расчет показал проблемные зоны входного тракта. Движение газа в тракте ускоренное. Снижение скорости происходит в тех зонах, где кинетическая энергия расходуется на преодоления сопротивления плохо обтекаемых участков тракта.

Первый такой участок – переход от трубы меньшего к трубе большего диаметра. Возникают так называемые потери внезапного расширения $h_{\text{вр}}$ – единственный вид потерь в дозвуковом потоке, который можно строго и точно рассчитать по формуле Борда-Карно: $h_{\text{вр}} = 0.5(c_1 - c_2)^2 \approx 0.5c_1^2(1 - f_1/f_2)^2$ (c_1, c_2 – скорости потока на входе и выходе канала, f_1, f_2 – площади на входе и выходе канала). Согласно этой формуле, потеря напора от перехода в трубу большего диаметра составляет примерно 10% от потери во всем тракте. Но формула точна применительно к переходу из одной длинной трубы в другую. Трудно сказать, как возникшая низкоэнергетическая зона дополнительно влияет на потери напора в рассматриваемой сложной системе.

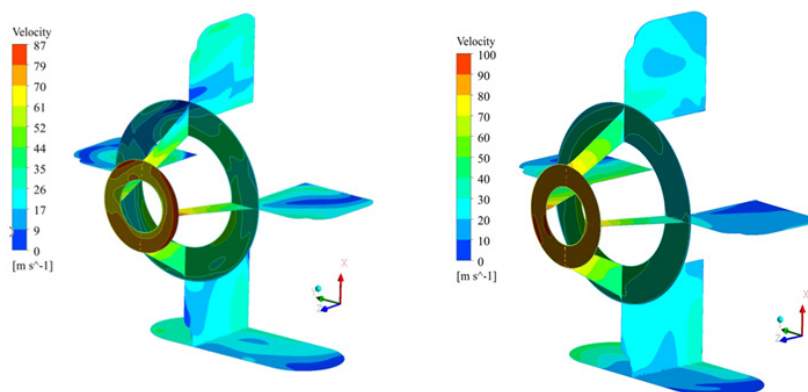


Рис. 7. Изотакхи в разных сечениях входного патрубка. Слева несимметричное, справа симметричное входное отверстие

Fig. 7. Isotachs in different sections of the inlet nozzle. Left – the asymmetrically located inlet, right – the symmetrically located inlet

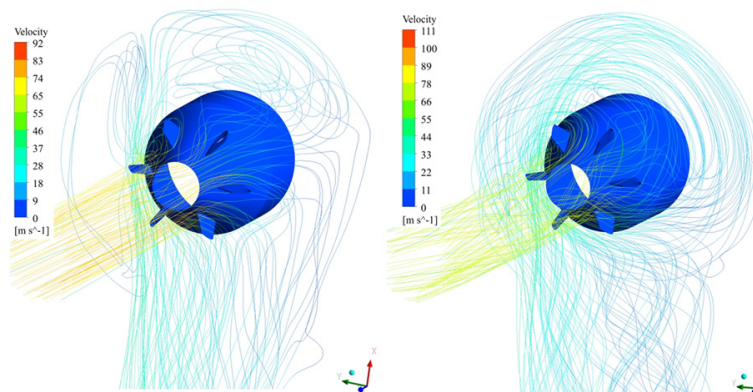


Рис. 8. Линии тока во входном патрубке. Слева – несимметричный вход, справа – симметричный вход

Fig. 8. Streamlines in the inlet nozzle. Left – the asymmetrically located inlet, right – the symmetrically located inlet

Второй участок с неблагоприятной картиной течения – поворот потока на 90° из трубы в промежуточный патрубок. Обтекание острого угла сопровождается потерей кинетической энергии. Выше показано, как эта зона отрыва влияет на вращение потока во входном патрубке.

Низкоэнергетическая зона распространяется на большое расстояние. Но существенное общее ускорение потока внутри корпуса улучшает картину течения. Рис. 7 дает представление о локализации низкоэнергетических зон по мере приближения потока к рабочему колесу.

Положение входного отверстия не оказывает принципиального влияния на энергетические зоны. Эти зоны разные, но их интенсивность в обоих вариантах примерно одинакова.

Влияние несимметричности входного отверстия при направляющих лопатках. Эффективность направляющих лопаток оказалась неожиданно большой. Сильная закрутка, которая была при симметричном входе без направляющих лопаток (рис. 6) практически ликвидируется – рис. 8.

При симметричном входном отверстии направляющие лопатки обтекаются с большими углами атаки. Это результат закрутки потока, созданной зоной отрыва в соединительном патрубке. CFD-расчет показал результат, прямо противоположный тому, который вытекал из одномерного анализа. При несимметричном входном отверстии направляющие лопатки обтекаются лучше. Представление о структуре потока на входе в рабочее колесо дает рис. 9.

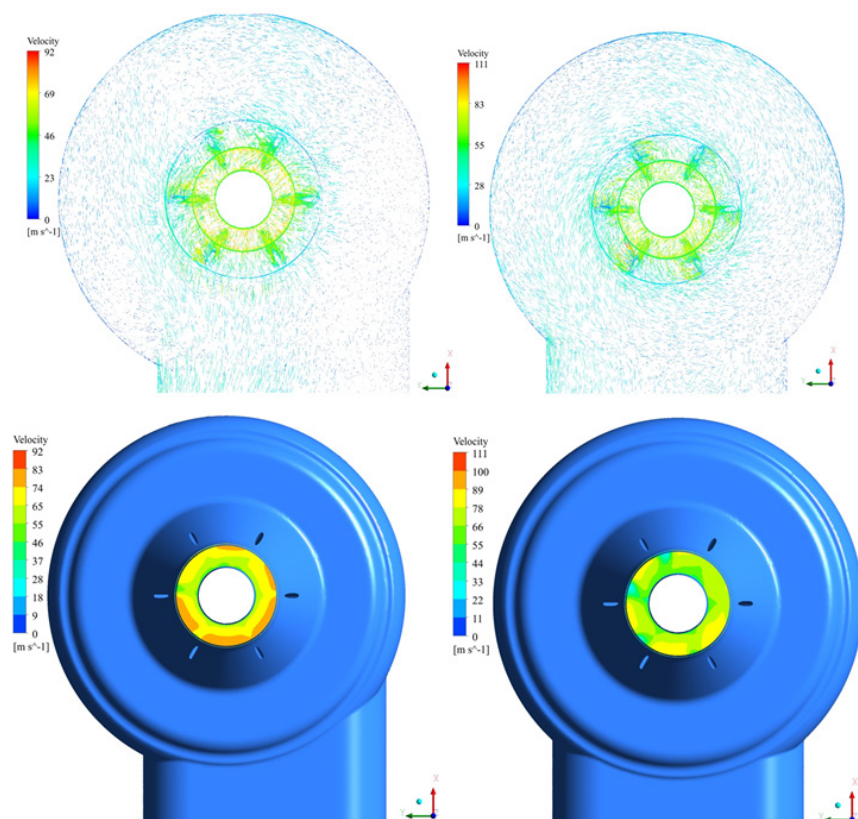


Рис. 9. Векторы скорости в радиальном сечении ВП и изотахи на входе в РК.
Слева – несимметричный вход. Справа – симметричный вход

Fig. 9. Velocity vectors in the radial section of the inlet nozzle and isotachs at the impeller inlet.
Left – the asymmetrically located inlet, right – the symmetrically located inlet

Количественная характеристика структуры потока представлена в табл. 2. Скорости в кольцевом сечении входа в колесо представлены в 12 сечениях по центральному углу φ на 5 радиусах.

Очевидно преимущество входа через несимметричное входное отверстие. Это частный случай, когда два недостатка компенсируют друг друга – принципиально неверное расположение входного отверстия, и вызывающий большие потери отрыв потока при нерациональной форме подводящего тракта. Если бы на рис. 4 подвод к соединительному патрубку был справа, два недостатка суммировались бы.

В [28] потери $h_{w\text{ВП}}$ во входном патрубке рекомендуется рассчитывать с помощью коэффициента потерь $\zeta = \frac{2\Delta p^*}{\rho_n c_n^2}$ ($\zeta_{\text{ВП}}$ – коэффициент потерь входного патрубка, c_n – скорость потока во входном отверстии патрубка). В зависимости от степени ускорения потока в патрубке типичные значения $\zeta_{\text{ВП}} = 2,5 - 3,5$ – это с учетом негативного влияния неравномерности потока на входе рабочее колесо. Расчеты потери полного давления показали такие значения коэффициентов потерь $h_{w\text{ВП}} = 0,5 \zeta_{\text{ВП}} c_n^2$ (Δp^* – потеря полного давления, ρ_n – плотность газа во входном сечении):

- несимметричное входное отверстие, входной тракт $\zeta_{\text{ВТ}} = 2,75$, входной патрубок $\zeta_{\text{ВП}} = 1,325$;
- симметричное входное отверстие, входной тракт $\zeta_{\text{ВТ}} = 3,07$, входной патрубок $\zeta_{\text{ВП}} = 1,89$.

Как и вытекает из структуры течения, при симметричном расположении входного отверстия и неблагоприятной форме трубопровода «подводящая труба + соединительный патрубок» потери на 10% больше. Абсолютная величина коэффициента потерь $\zeta_{\text{ВП}}$ собственно входного патрубка

Таблица 2

Векторы окружной проекции скорости c_{u0} на входе в рабочее колесо

Table 2

Vectors of the velocity circumferential projection c_{u0} at the impeller inlet

$\varphi, ^\circ$	c_{u0} Несимметричный вход (периферия – втулка)					c_{u0} Симметричный вход (периферия – втулка)				
0	-8,73	0,87	1,92	-0,63	-5,89	23,19	14,57	2,16	-10,34	-20,23
30	-0,26	-6,24	-6,75	-2,76	1,20	0,53	4,77	0,42	-3,23	-5,00
60	-0,88	-6,48	-8,35	-4,02	6,32	12,31	6,20	-0,99	-6,68	-10,63
90	-2,02	-2,04	-6,46	-10,00	-8,84	2,12	0,05	-3,07	-3,71	-1,38
120	4,18	-3,28	-6,21	-7,13	-6,06	5,98	2,09	-1,44	-4,88	-7,32
150	-1,37	-3,96	-4,70	-5,38	-5,96	-0,24	-0,80	-0,86	-1,53	-2,70
180	-7,34	-7,60	-4,37	-0,23	2,95	-8,16	-4,45	0,87	3,23	2,22
210	-1,62	-2,53	-2,18	-1,58	-0,61	-1,56	-0,26	1,79	1,72	-1,11
240	4,06	2,83	1,11	-1,98	-7,02	7,14	10,01	6,32	-3,70	-16,51
270	2,12	5,39	1,06	-3,76	-4,04	1,09	6,89	2,67	-2,98	-3,98
300	12,97	13,28	1,54	-9,11	-15,06	13,46	12,32	3,27	-7,18	-15,84
330	-1,06	3,96	2,95	-1,77	-5,07	2,68	2,08	0,08	-0,12	0,60

небольшая по сравнению с типичными значениями в [28]. Но в отличие от [28] представленные расчеты не учитывают негативного влияния входного патрубка на рабочее колесо.

Потеря КПД во входном тракте $\Delta\eta = \frac{h_w}{h_T}$ равна:

– с учетом входного трубопровода $\Delta\eta_{вт} = 0,5\zeta_{вт} \frac{\bar{c}_H^2}{\psi_T}$;

– без учета входного трубопровода $\Delta\eta_{вп} = 0,5\zeta_{вп} \frac{\bar{c}_H^2}{\psi_T}$.

Обсуждение

В соответствии с международными и отраслевыми стандартами на заводские испытания отношение давлений (степень сжатия) измеряется на фланцах корпуса компрессора. При испытаниях компрессоров АО «Турбохолод» входное давление измеряется на входе в подводящую трубу. Потеря давления в трубе и соединительном патрубке снижает КПД компрессора по сравнению с испытаниями по стандарту. CFD-расчет показал, что потеря давления в трубе и соединительном патрубке приближается к половине потерь входного тракта. Для компрессоров с большим объемным расходом (большая величина $\bar{c}_H$) измеренный КПД компрессоров ТДА на 1–1,5% меньше величины, которая была бы при измерении по методике испытания общепринятой методике заводских испытаний.

Входной тракт на рис. 4 в течение некоторого времени применяется в компрессорах ТДА. Ранее объемные расходы были небольшими, и потеря КПД $\Delta\eta_{вт}$ была небольшой. Аэродинамическое несовершенство входного тракта не имело значительных последствий. Для компрессоров с большим объемным расходом проблема приобрела значение. CFD-расчеты представили значительную качественную и количественную информацию для совершенствования входного тракта.

Заключение

Результаты сотрудничества индустриального партнера и вуза — АО Турбохолод и СПбПУ — на базе достижений Научной школы компрессоростроения вуза дали значимый практический результат. Полностью удовлетворены потребности промышленности РФ в турбодетандерных агрегатах с высокими эксплуатационными показателями. Инженерный метод оптимального проектирования — Метод универсального моделирования — подтвердил надежность и эффективность. Применительно к входному тракту сложной конструкции для перспективного компрессора с большим объемным расходом применены CFD-расчеты. Информация о структуре течения двух вариантов входного тракта показала проблемные места, на основании чего в проточную часть будут внесены изменения. Рассчитанные коэффициенты потерь больше у варианта с худшей структурой течения. CFD-расчеты показали свою эффективность для совершенствования неподвижных элементов проточной части компрессора.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10165)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Галиуллин З.Т.** Современные газотранспортные системы и технологии [текст] / З.Т. Галиуллин, С.Ю. Сальников, В.А. Щуровский // Москва. — 2014, 345 с.
- [2] **Васильев Ю.С.** Высокоэффективные центробежные компрессоры нового поколения. Научные основы расчета, разработка методов оптимального проектирования и освоение производства. [текст] / Ю.С. Васильев, П.И. Родионов, М.И. Соколовский // Промышленность России. — 2000. — № 10–11. — М. — С. 78–85.
- [3] Труды научной школы компрессоростроения СПбГПУ. [текст] / Под редакцией Галеркина Ю.Б. // — М.: Изд. «СПбГПУ». — 2010.
- [4] **Галеркин Ю.Б., Рекстин А.Ф., Солдатова К.В., Дроздов А.А., Соловьёва О.А., Семеновский В.Б.** Состояние инженерного метода оптимального газодинамического проектирования и расчета характеристик центробежных компрессоров. Часть 1. Компрессорная техника и пневматика. — 2019. — № 4. — С. 3–10.
- [5] **Галеркин Ю.Б., Рекстин А.Ф., Солдатова К.В., Дроздов А.А., Соловьёва О.А., Семеновский В.Б.** Состояние инженерного метода оптимального газодинамического проектирования и расчета характеристик центробежных компрессоров. Часть 2. Компрессорная техника и пневматика. — 2020. — № 1. — С. 8–11.
- [6] **Галеркин Ю.Б., Рекстин А.Ф., Солдатова К.В., Дроздов А.А., Соловьёва О.А., Семеновский В.Б.** Современное состояние инженерного метода оптимального газодинамического проектирования и расчета характеристик центробежных компрессоров. Часть 3. Компрессорная техника и пневматика. — 2020. — № 2. — С. 2–9.
- [7] **Rekstin A.F., Semenovskiy V.B., Galerkin Y.B., Sokolov A.A.** The analysis of design and measured gas-dynamic characteristics of the centrifugal compressor within turboexpander aggregate. — Oil and Gas Engineering (OGE-2018) — AIP Conf. Proc. 2007. — Omsk. — Russia. — 2018. 030028-1–030028-11; <https://doi.org/10.1063/1.5051889>
- [8] **Galerkin Yu.B., Semenovskiy V.B., Soldatova K.V.** Creating model stages of centrifugal compressor based on experimental data. — Oil and Gas Engineering- AIP Conf. Proc. 2141. — Omsk. — Russia. — 2019, 030026-030026-8, <https://doi.org/10.1063/1.5122076>
- [9] **Rekstin A., Semenovskiy V., Soldatova K., Galerkin Y., Sokolov K.** The simulation of gas-dynamic characteristics of centrifugal compressors in turbo-expander units. International Scientific and Technical Conference

Smart Energy Systems, SES 2019; Kazan. E3S Web of Conferences 124 (2019) 01005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912401008>

[10] **Галеркин Ю.Б.** Турбокомпрессоры. [текст] / Ю.Б. Галеркин // Изд-во КХТ., 2010. — СПб. — С. 650.

[11] **Галеркин Ю.Б., Войнов И.Б., Дроздов А.А.** Сопоставление результатов CFD — расчеты газодинамических характеристик центробежных компрессорных ступеней при помощи программы NUMECA Fine / Turbo и ANSYS CFX. — Компрессорная техника и пневматика. — 2017. — № 2. — С. 16–19. (выполнено в рамках договора 02.G25.31.0140).

[12] **Боровков А.И., Войнов И.Б., Галеркин Ю.Б., Никифоров А.Г., Никитин М.А.** Вопросы моделирования газодинамических характеристик на примере модельной ступени центробежного компрессора // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 2. С. 44–57. DOI: 10.18721/JEST.24.2018.4

[13] **Боровков А.И., Войнов И.Б., Никитин М.А., Галеркин Ю.Б., Рекстин А.Ф., Дроздов А.А.** Моделирование характеристик одноступенчатого центробежного компрессора газоперекачивающего агрегата. // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 3. С. 153–175. DOI: 10.18721/JEST.240313

[14] **Боровков А.И., Войнов И.Б., Рекстин А.Ф., Бакаев Б.В.** Моделирование характеристик двухступенчатого центробежного компрессора газоперекачивающего агрегата // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 2. С. 87–104. DOI: 10.18721/JEST.25207

[15] **Borovkov A.I., Voinov I.B., Nikitin M.A., Galerkin Yu.B., Rekstin A.F., Drozdov A.A.** Experience of performance modeling the single-stage pipeline centrifugal compressor. — Oil and Gas Engineering- AIP Conf. Proc. 2141. — Omsk. — Russia. — 2019, 030051-030051-10, <https://doi.org/10.1063/1.5122101>

[16] **Borovkov A., Voinov I., Galerkin Y., Nikiforov A., Nikitin M., Solovyeva O., Kabalyk K.** Issues of gas dynamic characteristics modeling: a study on a centrifugal compressor model stage. — E3S Web of Conferences 140, 06003 (2019). — International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2019). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914006003>

[17] **Borovkov A.I., Voinov I.B., Galerkin Yu.B., Drozdov A.A., Soldatova K.V.** Experimental characteristic simulation for two-stage pipeline centrifugal compressor. International Conference on Compressors and their Systems 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 604 (2019) 012052. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012052

[18] **Rube C., Rossbach T., Wedeking M., Grates D.R., Jeschke P.** Experimental and numerical investigation of the flow inside the return channel of a centrifugal process compressor. Turbine Technical Conference and Exposition, Montreal, Canada, 2015.

[19] **Fabio De Bellis, Emanuele Guidotti, Dante Tommaso Rubino.** Centrifugal compressors return channel optimization by means of advanced 3D CFD. Turbine Technical Conference and Exposition, Montreal, Canada, 2015.

[20] **Manabu Yagi, Takahito Nishioka, Hiromi Kobayashi, Hideo Nishida, Satoru Yamamoto.** Effects of return channel with splitter vanes on performance of multistage centrifugal compressor. Turbine Technical Conference and Exposition Montreal, Canada, 2015.

[21] **Veress A., Van den Braembussche R.** Inverse design and optimization of a return channel for a multistage centrifugal compressor. Journal of Fluids Engineering, Vol. 126, 799–806, 2004.

[22] **Nishida Y., Kobayashi H., Nishida H., Sugimura K.** Performance improvement of a return channel in a multistage centrifugal compressor using multiobjective optimization. Journal of Turbomachinery, Vol. 135, 031026 1–8, 2013

[23] **Hildebrandt A.** Aerodynamic optimization of a centrifugal compressor return channel and U-turn with Genetic Algorithms. ASME Turbo Expo 2011. ASME Paper GT2011-45067, 2011.

[24] **Hildebrandt A.** Numerical analysis of overall performance and flow phenomena of an automatically optimized tree-dimensional return channel system for multistage centrifugal compression systems. ASME Turbo Expo 2012. ASME Paper GT2012-68559, 2012.

[25] Galerkin Yu., Rekstin A., Marenina L., Drozdov A., Solovyeva O., Semenovskiy V. Optimization of return channels of high flow rate centrifugal compressor stages using CFD methods. *Energies* 2020, 13(22), 5968.

[26] Galerkin Y.B., Rekstin A.F., Marenina L.N., Soldatova K.V. Creation of a parameterized model of a return channel flow path for CFD-researches. — *Oil and Gas Engineering- AIP Conference Proceedings* 2285, 030056 (2020) Omsk. — Russia.

[27] Marenina L., Galerkin Yu., Drozdov A. Stator elements optimization of centrifugal compressor intermediate type stage by CFD methods. — *The 2nd International Conference on High Speed Turbomachines and Electrical Drives (HSTED-2020)*. — *E3S Web of Conferences* 178, 01013 (2020).

[28] Селезнев К.П. Центробежные компрессоры. [текст] / К.П. Селезнев, Ю.Б. Галеркин // Л.: Машиностроение. — 1982, 271 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАБИЧЕНКО Игорь Александрович — генеральный директор, Акционерное общество "Турбохолод", без степени.

E-mail: info@turbokholod.ru

МИХАЙЛОВ Алексей Александрович — заместитель генерального директора по проектным работам, производству и эксплуатации — Главный конст, Акционерное общество "Турбохолод", без степени.

E-mail: Mikhailov_A@turbokholod.ru

СОКОЛОВ Константин Константинович — главный конструктор-расчетчик, Акционерное общество "Турбохолод", канд. техн. наук.

E-mail: Sokolov@turbokholod.ru

БОРОВКОВ Алексей Иванович — проректор по перспективным проектам, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: vicerector.ap@spbstu.ru

ГАЛЕРКИН Юрий Борисович — главный инженер проекта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: yuri_galerkin@mail.ru

МАКСИМЕНКО Иван Алексеевич — ведущий научный сотрудник, Акционерное общество "НПФ "Невинтермаш", без степени.

E-mail: maximenko_ivan@rambler.ru

РЕКСТИН Алексей Феликсович — ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: rekstin2k7@mail.ru

СЕМЕНОВСКИЙ Василий Борисович — доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: swb@neva.ru

ЯДЫКИН Владимир Константинович — заведующей лабораторией, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. экон. наук.

E-mail: v.yadikin@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 19.03.2021

REFERENCES

- [1] **Z.T. Galiullin**, *Sovremennyye gazotransportnyye sistemy i tekhnologii* [tekst] / Z.T. Galiullin, S.Yu. Salnikov, V.A. Shchurovskiy // Moskva. – 2014, 345 s.
- [2] **Yu.S. Vasilyev**, *Vysokoeffektivnyye tsentrobezhnyye kompressory novogo pokoleniya. Nauchnyye osnovy rascheta, razrabotka metodov optimalnogo proyektirovaniya i osvoyeniye proizvodstva*. [tekst] / Yu.S. Vasilyev, P.I. Rodionov, M.I. Sokolovskiy // *Promyshlennost Rossii*. – 2000. – № 10–11. – М. – S. 78–85.
- [3] *Trudy nauchnoy shkoly kompressorostroyeniya SPbGPU*. [tekst] / Pod redaktsiyey Galerkina Yu.B. // – М.: Izd. «SPbGPU». – 2010.
- [4] **Yu.B. Galerkin, A.F. Rekstin, K.V. Soldatova, A.A. Drozdov, O.A. Solovyeva, V.B. Semenovskiy**, *Sostoyaniye inzhenernogo metoda optimalnogo gazodinamicheskogo proyektirovaniya i rascheta kharakteristik tsentrobezhnykh kompressorov. Chast 1. Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*. – 2019. – № 4. – S. 3–10.
- [5] **Yu.B. Galerkin, A.F. Rekstin, K.V. Soldatova, A.A. Drozdov, O.A. Solovyeva, V.B. Semenovskiy**, *Sostoyaniye inzhenernogo metoda optimalnogo gazodinamicheskogo proyektirovaniya i rascheta kharakteristik tsentrobezhnykh kompressorov. Chast 2. Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*. – 2020. – № 1. – S. 8–11.
- [6] **Yu.B. Galerkin, A.F. Rekstin, K.V. Soldatova, A.A. Drozdov, O.A. Solovyeva, V.B. Semenovskiy**, *Sovremennoye sostoyaniye inzhenernogo metoda optimalnogo gazodinamicheskogo proyektirovaniya i rascheta kharakteristik tsentrobezhnykh kompressorov. Chast 3. Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*. – 2020. – № 2. – S. 2–9.
- [7] **A.F. Rekstin, V.B. Semenovskiy, Y.B. Galerkin, A.A. Sokolov**, *The analysis of design and measured gas-dynamic characteristics of the centrifugal compressor within turboexpander aggregate*. – *Oil and Gas Engineering (OGE-2018) – AIP Conf. Proc.* 2007. – Omsk. – Russia. – 2018. 030028-1–030028-11; <https://doi.org/10.1063/1.5051889>
- [8] **Yu.B. Galerkin, V.B. Semenovskiy, K.V. Soldatova**, *Creating model stages of centrifugal compressor based on experimental data*. – *Oil and Gas Engineering- AIP Conf. Proc.* 2141. – Omsk. – Russia. – 2019, 030026-030026-8. <https://doi.org/10.1063/1.5122076>
- [9] **A. Rekstin, V. Semenovskiy, K. Soldatova, Y. Galerkin, K. Sokolov**, *The simulation of gas-dynamic characteristics of centrifugal compressors in turbo-expander units. International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019; Kazan. E3S Web of Conferences 124 (2019) 01005*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912401008>
- [10] **Yu.B. Galerkin**, *Turbokompressory*. [tekst] / Yu.B. Galerkin // Izd-vo KKhT, 2010. – SPb. – S. 650.
- [11] **Yu.B. Galerkin, I.B. Voynov, A.A. Drozdov**, *Sopostavleniye rezultatov SFD – raschety gazodinamicheskikh kharakteristik tsentrobezhnykh kompressorov pri pomoshchi programmy NUMECA Fine / Turbo i ANSYS SFX*. – *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*. – 2017. – № 2. – S. 16–19. (vypolneno v ramkakh dogovora 02.G25.31.0140).
- [12] **A.I. Borovkov, I.B. Voinov, Yu.B. Galerkin, A.G. Nikiforov, M.A. Nikitin**, *Voprosy modelirovaniya gazodinamicheskikh kharakteristik na primere modelnoy stupeni tsentrobezhnogo kompressora* // *Nauchno-tehnicheskkiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki*. 2018. T. 24, № 2. S. 44–57. DOI: 10.18721/JEST.24.2018.4
- [13] **A.I. Borovkov, I.B. Voinov, M.A. Nikitin, Yu.B. Galerkin, A.F. Rekstin, A.A. Drozdov**, *Modelirovaniye kharakteristik odnostupenchatogo tsentrobezhnogo kompressora gazoperekachivayushchego agregata* // *Nauchno-tehnicheskkiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki*. 2018. T. 24, № 3. S. 153–175. DOI: 10.18721/JEST.240313
- [14] **A.I. Borovkov, I.B. Voynov, A.F. Rekstin, B.V. Bakayev**, *Modelirovaniye kharakteristik dvukhstupenchatogo tsentrobezhnogo kompressora gazoperekachivayushchego agregata* // *Nauchno-tehnicheskkiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki*. 2019. T. 25, № 2. S. 87–104. DOI: 10.18721/JEST.25207
- [15] **A.I. Borovkov, I.B. Voynov, M.A. Nikitin, Yu.B. Galerkin, A.F. Rekstin, A.A. Drozdov**, *Experience of performance modeling the single-stage pipeline centrifugal compressor*. – *Oil and Gas Engineering- AIP Conf. Proc.* 2141. – Omsk. – Russia. – 2019, 030051-030051-10, <https://doi.org/10.1063/1.5122101>

- [16] **A. Borovkov, I. Voinov, Y. Galerkin, A. Nikiforov, M. Nikitin, O. Solovyeva, K. Kabalyk**, Issues of gas dynamic characteristics modeling: a study on a centrifugal compressor model stage. — E3S Web of Conferences 140, 06003 (2019). — International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2019) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914006003>
- [17] **A.I. Borovkov, I.B. Voinov, Yu.B. Galerkin, A.A. Drozdov, K.V. Soldatova**, Experimental characteristic simulation for two-stage pipeline centrifugal compressor. International Conference on Compressors and their Systems 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 604 (2019) 012052. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012052
- [18] **C. Rube, T. Rossbach, M. Wedeking, D.R. Grates, P. Jeschke**, Experimental and numerical investigation of the flow inside the return channel of a centrifugal process compressor. Turbine Technical Conference and Exposition, Montreal, Canada, 2015.
- [19] **Fabio De Bellis, Emanuele Guidotti, Dante Tommaso Rubino**, Centrifugal compressors return channel optimization by means of advanced 3D CFD. Turbine Technical Conference and Exposition, Montreal, Canada, 2015.
- [20] **Manabu Yagi, Takahito Nishioka, Hiromi Kobayashi, Hideo Nishida, Satoru Yamamoto**, Effects of return channel with splitter vanes on performance of multistage centrifugal compressor. Turbine Technical Conference and Exposition Montreal, Canada, 2015.
- [21] **A. Veress, R. Van den Braembussche**, Inverse design and optimization of a return channel for a multistage centrifugal compressor. Journal of Fluids Engineering, Vol. 126, 799–806, 2004.
- [22] **Y. Nishida, H. Kobayashi, H. Nishida, K. Sugimura**, Performance improvement of a return channel in a multistage centrifugal compressor using multiobjective optimization. Journal of Turbomachinery, Vol. 135, 031026 1–8, 2013
- [23] **A. Hildebrandt**, Aerodynamic optimization of a centrifugal compressor return channel and U-turn with Genetic Algorithms. ASME Turbo Expo 2011. ASME Paper GT2011-45067, 2011.
- [24] **A. Hildebrandt**, Numerical analysis of overall performance and flow phenomena of an automatically optimized tree-dimensional return channel system for multistage centrifugal compression systems. ASME Turbo Expo 2012. ASME Paper GT2012-68559, 2012.
- [25] **Yu. Galerkin, A. Rekstin, L. Marenina, A. Drozdov, O. Solovyeva, V. Semenovskiy**, Optimization of return channels of high flow rate centrifugal compressor stages using CFD methods. Energies 2020, 13 (22), 5968.
- [26] **Y.B. Galerkin, A.F. Rekstin, L.N. Marenina, K.V. Soldatova**, Creation of a parameterized model of a return channel flow path for CFD-researches. — Oil and Gas Engineering- AIP Conference Proceedings 2285, 030056 (2020) Omsk. — Russia.
- [27] **L. Marenina, Yu. Galerkin, A. Drozdov**, Stator elements optimization of centrifugal compressor intermediate type stage by CFD methods. — The 2nd International Conference on High Speed Turbomachines and Electrical Drives (HSTED-2020). — E3S Web of Conferences 178, 01013 (2020).
- [28] Seleznev, K. P. Tsentrobeznyye kompressory. [tekst] / K.P. Seleznev, Yu.B. Galerkin // L.: Mashinostroyeniye. — 1982, 271 s.

THE AUTHORS

BABICHENKO Igor' A. — *Join stock company "Turbokholod".*

E-mail: info@turbokholod.ru

MIKHAILOV Aleksey A. — *Join stock company "Turbokholod".*

E-mail: Mikhailov_A@turbokholod.ru

SOKOLOV Konstantin K. — *Join stock company "Turbokholod".*

E-mail: Sokolov@turbokholod.ru

BOROVKOV Aleksey I. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: vicerektor.ap@spbstu.ru

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

MAXIMENKO Ivan A. — *Jsc "SIF "Nevintermash".*
E-mail: maximenko_ivan@rambler.ru

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

SEMENOVSKIY Vasiliy B. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: swb@neva.ru

YADYKIN Vladimir K. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: v.yadikin@gmail.com

Received: 19.03.2021

DOI: 10.18721/JEST.27202
УДК 551.576

*В.И. Горынин¹, В.В. Рогожкин², С.Ю. Кондратьев³,
Е.Б. Мишин⁴, Е.В. Коленов⁵, А.В. Шеволдин⁶*

¹ Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов
«Прометей», Санкт-Петербург, Россия;

² АО «Атомпроект», Санкт-Петербург, Россия;

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

⁴ Московский проектный институт АО «Атомэнергопроект»,
Москва, Россия;

⁵ ПАО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия;

⁶ Санкт-Петербургский филиал Московского проектного института
АО «Атомэнергопроект», Санкт-Петербург, Россия

КУЛЕР ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ КЛИМАТА – РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПУСТЫНИ

Предложена геоинженерная технология и техническая система «Land Coolers» для генерации высотных облачных зонтично-теневых зон с целью регулируемого охлаждения земной поверхности и приземной атмосферы жаркого и экстремального по условиям жизни места планеты (пустыни). Это достигается путем получения облачности перистого типа (Cirrus spissatus и Cirrostratus) за счет использования ресурсов влаги моря, сбросовой энергии атомных или тепловых станций (установок) и господствующего потока высотных (геострофических) ветров. Система «Land Coolers» (Кулер) может быть использована для снижения солнечной радиации не только пустынь и полупустынь, но и других обезвоживающихся территорий на Земле. Зонтично-облачное техногенное формирование оптически плотной тени над пустыней способствует приходу в прибрежную, а затем в ее глубинную зону, морской облачности и дождевых осадков для смягчения климата пустыни и последующего ее озеленения. Универсальная система «Land Coolers» может использоваться также для решения актуальной проблемы дефицита воды путем безотходного и экологически чистого производства из атмосферного конденсата акватории моря больших объемов природной пресной воды дождевого и питьевого качества.

Ключевые слова: кулер; регулирование климата; проблемы пустыни; геоинженерная технология и система «Land Coolers»; охлаждение земной поверхности и приземной атмосферы пустыни; высотно-техногенная облачность перистого типа; дождевые осадки; безотходная и экологически чистая технология.

Ссылка при цитировании:

Горынин В.И., Рогожкин В.В., Кондратьев С.Ю., Мишин Е.Б., Коленов Е.В., Шеволдин А.В. Кулер для регулирования климата – решение проблемы пустыни // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 2. С. 23–37. DOI: 10.18721/JEST.27202

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*V.I. Gorynin¹, V.V. Rogozhkin², S.Yu. Kondratyev³,
E.B. Mishin⁴, E.V. Kolenov⁵, A.V. Shevoldin⁶*

¹ Central Research Institute of Structural Materials “Prometey”, Saint-Petersburg, Russia;

² JSC “Atomproekt”, Saint-Petersburg, Russia;

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia;

⁴ JSC "Atomenergoproekt", Moscow, Russia;

⁵ PJSC "Power machines", Saint-Petersburg, Russia;

⁶ JSC "Atomenergoproekt", Saint-Petersburg, Russia

CLIMATE CONTROL COOLER: THE SOLUTION TO THE DESERT PROBLEM

The paper proposes a geoengineering technology and technical system "Land Coolers" for generating high-altitude cloud umbrella-shade zones for the purpose of controlled cooling of the Earth's surface and surface atmosphere of the desert, a hot place with extreme survival conditions on our planet. This is achieved by obtaining cirrus-type clouds (Cirrus spissatus and Cirrostratus) using the resources of sea moisture, the discharge energy of nuclear or thermal stations (installations) and the dominant flow of high-altitude (geostrophic) winds. System "Land Coolers" (Cooler) can be used to reduce solar radiation not only in deserts and semi-deserts, but also in other dehydrated areas on Earth. The umbrella-cloud technogenic formation of an optically dense shade over the desert contributes to the arrival of marine clouds and rain first to the coastal zone, and then to its deeper areas to soften the desert climate and induce its subsequent greening. Universal system "Land Coolers" can also be used to solve the current problem of water scarcity by waste-free and environmentally friendly production of large volumes of natural fresh water of rain and drinking quality from atmospheric condensate in the sea area.

Keywords: water cooler; climate regulation; desert problems; geoengineering technology and the "Land Coolers" system; cooling of the Earth's surface and the surface atmosphere of the desert; high-altitude man-made cirrus cloud cover; rain precipitation; waste-free and environmentally friendly technology.

Citation:

V.I. Gorynin, V.V. Rogozhkin, S.Yu. Kondratyev, E.B. Mishin, E.V. Kolenov, A.V. Shevoldin, Climate control cooler: the solution to the desert problem, Materials Science. Power Engineering, 27 (02) (2021) 23–37, DOI: 10.18721/JEST.27202

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. В настоящее время прирост средней температуры воздуха нижних слоев атмосферы Земли, составивший примерно 0,8 °C за последние 100 лет, считается весьма высоким для естественных процессов [1]. Несмотря на относительно малую величину прироста, его негативные последствия характеризуются тенденцией роста. В частности, это наблюдаемый разброс климатических температур, когда зимой заметно холоднее, а летом аномально сухо и жарко. В последнее время рост летней жары, засухи, перегрева приземной атмосферы и числа более интенсивных, обширных и загрязняющих воздух лесных и степных пожаров, а также наводнений и т.д. стали реальной и все сложнее решаемой проблемой для сохранения животного мира и обеспечения безопасности населения Европы, Америки, Австралии, Азии и Африки.

Считается, что одной из причин глобального потепления (изменения климата) являются выбросы парниковых газов (CO₂) при сжигании ископаемых видов топлива, уменьшение биосферы леса — потребителя CO₂, интенсификация сельскохозяйственной, животноводческой и вулканической деятельности. В связи с этим в мире регламентируется сокращение выбросов CO₂, например, в Европейском Союзе к 2030 году запланировано его снижение на 55% по сравнению с уровнем 1990 года. Однако практически полное сокращение выбросов CO₂ в атмосферу за счет зеленой энергетики (солнечная, ветровая и другая энергетика) позволит стабилизировать количество парниковых газов за длительное время — лишь в течение 21 века и возможно 22 века, что неприемлемо долго для населения планеты.

В связи с отсутствием подхода к решению проблемы глобального потепления, а также опустынивания и обезвоживания, для разработки эффективной и конкурентноспособной геоинженер-

ной технологии, обеспечивающей противодействие природным негативным явлениям, целесообразно использование не имеющей мировых аналогов универсальной наземной системы «Land Coolers» [2]. Такая система имеет значительно меньшую стоимость, чем предлагаемые авиакосмические проекты для распыления в атмосфере аэрозольных химико-токсичных элементов для борьбы с глобальным потеплением или региональным изменением климата, требующие десятки и сотни миллиардов долларов США [3–7].

Система «Land Coolers» использует: (1) безграничный природный ресурс атмосферной влаги моря, (2) практически лишней (малополезный) ресурс теплового (парового, водяного и воздушного) энергетического сброса атомной или тепловой электрической станции через высотное сооружение градирни («инжектора») высотой 150 м и более и (3) природную (запад-восток) направленность потоков высотных (геострофических) ветров для генерации высотной оптически плотной облачности перистого типа [8]. Универсальная система «Land Coolers» является высокотехнологичным средством коррекции перегрева поверхности пустыни и обезвоживания территории, применяемым в зоне проблемного района, региона или более глобального масштаба. При этом решается проблема использования традиционных ископаемых видов топлива без теплового загрязнения окружающей среды, что позволяет эффективно реализовывать основные положения Парижского соглашения по климату без радикального отказа от применяемых объектов атомной и тепловой энергетики. Применение кулера одновременно с электрогенерацией можно считать новым видом «зеленой» энергетики, регулирующей климат.

Эти факторы позволяют сделать вывод, что геоинженерная система «Land Coolers» [2, 8] является практически безальтернативным реальным и доступным по стоимости и срокам изготовления и строительно-монтажных работ, инструментом коррекции пустыни или проблемной по перегреву, обезвоживанию и засухе территории большой площади.

В процессе климато-коррекционной эксплуатации система «Land Coolers» может также применяться для промышленного и экологически чистого производства природной пресной воды дождевого и питьевого качества из атмосферного пресноводного конденсата акватории моря, без образования и накопления вредных для человека и окружающей среды суши и моря отходов, вырабатываемых при опреснении морской воды практически независимо от выбранного способа ее опреснения.

Парадокс пустыни

Морское побережье пустыни с мая по октябрь, когда температуры воздуха и воды достигают днем $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно — это небо без облаков из влаги, испаряющейся с поверхности моря. Но утром на остывшей поверхности бетона наблюдаются следы воды из влажного морского воздуха, движимого ветром.

Причина отсутствия облаков над пустыней при избытке морской атмосферной влаги заключается в специфической структуре атмосферы прибрежно-морской пустыни при нагреве солнцем поверхности Земли. Над нагретой поверхностью пустыни в атмосфере в виде газовой оболочки формируются задерживающие слои («температурные инверсии»), препятствующие подъему влажного воздуха (рис. 1) на высоту нижнего яруса облакообразования в тропосфере.

Зимой, с ноября по март, задерживающих температурных инверсий нет, поскольку нагрев солнцем поверхности пустыни в этот период незначительный, что характерно для приморской пустыни. Конденсация водяного пара над морем и побережьем пустыни приводит к образованию дождевых облаков и выпадению осадков на больших территориях.

Пустыня, как геологический объект, является двухмерной природной аномалией, тонкой и плоской, уже на высоте 6 км (средний ярус тропосферы) жара исчезает, сменяясь холодом. В пещерах под пустыней тоже нет жары. То есть между этими «холодами» — зной, отсутствие влаги и

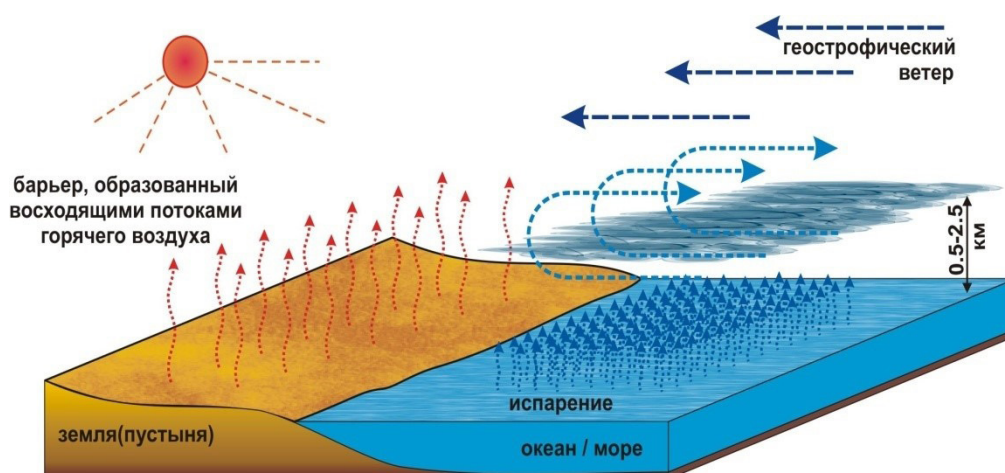


Рис. 1. Схема формирования «температурных инверсий» над поверхностью пустыни
Fig. 1. Diagram of the formation of "temperature inversions" over the desert surface



Рис. 2. Пояс пустынь на планете Земля
Fig. 2. The zone of deserts on planet Earth

горячий песок (глина, камень и др.). Эта природная аномалия не только устойчива, но и активно распространяется, вытесняя людей (рис. 2).

Условия избавления от пустыни

За последние 100 лет площадь самой большой пустыни Сахара увеличилась на 10% и сравнялась с площадью Европы, вызывая рост миграции населения из-за «водного» голода, исключая хозяйственную деятельность. Нет воды — нет и еды. Но даже минимальная реабилитация кругооборота воды в пустыне с появлением зеленых зон (оазисы) создаст условия для жизни и труда реэмигрантов.

Жизнь на поверхности земли обычно (в условиях умеренного и экваториального пояса) защищена зеленым листом. Солнце, нагревая планету, испаряет воду с поверхности океанов, морей, озер и рек. Она превращается в водяной пар и непрерывно поступает в атмосферу. Водяной пар выделяют в воздух и растения — процесс транспирации.

Тень от листа ограничивает отбор солнцем у земли пресной воды — основу жизни и противодействует осушению почвы. Лист, в отличие от песка и глины пустыни, потребляет и расходует солнечную энергию на прирост биомассы, а не на подогрев атмосферы, что принципиально важ-

но. Земля без листьев беззащитна перед солнцем. Солнце тратит много энергии, чтобы разделить молекулы воды, имеющие большую силу связи, и превратить их в пар. На создание 1 грамма водяного пара затрачивается 537 калорий солнечной энергии. Подсчитано, что за 1 минуту солнце испаряет на Земле миллиард тонн воды. При этом могут мелеть и исчезать реки и болота, затем выветриваться почва чернозема, оголяться слои глины, песка и осадочных пород. Возникает пустыня, которая сама себя защищает и воспроизводит.

Сухие русла рек и их выходы к морю — свидетельство того, что ранее системы пустыни Сахара были землей с лесами и реками. Есть ли возможность озеленения пустыни для возврата естества жизни? Пока это мечта человечества, но которая уже имеет геоинженерное решение с помощью стратегии системы «Land Coolers» и может быть осуществлена за короткое время с учетом проектирования и строительства.

Превращение пустыни: весна вместо засушливого лета

Атмосфера может содержать влагу в виде пара, частиц льда и капель дождя (это ее жидкое состояние). Воды в ней немного — ~0,001% от всей воды на Земле, что свидетельствует о возможности возврата дождя и озеленения пустыни.

Рассмотрим климатическую ситуацию в пустыне при работе системы «Land Coolers». В жаркий летний период над морем лето, а над пустыней (по предлагаемой технологии) — будет ранняя весна. Весной ночи в пустыне холодные. Инверсии в атмосфере отсутствуют, а рядом с прохладной пустыней парит разогретое днём летнее море с атмосферой, перенасыщенной влагой (не соленой, а пресной!). В отношении температуры воздуха суша и море поменяются местами.

Тогда, ночью возможно образование и приход в «холодную» пустыню дождевой облачности. Ночная гроза с ливневым дождем не очень вероятна, но облака и дожди меньшей интенсивности гарантированы. При наличии эффекта «холодной» пустыни вследствие «ночного» кругооборота воды в природе, такие дожди пройдут с весны до зимы. При этом отметим, что на берегу моря обычно больше осадков, а в глубине суши меньше. Количество выпадаемых осадков зависит от объема дождевых облаков в этом месте или сколько их доставит ветер.

Дело за малым — заменить лето в пустыне на весну. Весна позитивна везде, но особенно в пустыне.

Над пустыней: облака нижнего и верхнего яруса

Почти все облака образуются в тропосфере. Выделяют три яруса облаков: нижний — до 2 км, средний — от 2 км до 8 км и верхний — от 8 км до 18 км. Днем облака защищают поверхность Земли от перегрева солнцем, а ночью от охлаждения [9–10].

Ввод режима весны в летнее время для прибрежной пустыни возможен, например, с помощью образования над пустыней маловодной высотной техногенной облачности (ВТО) необходимой площади и плотности. На рис. 3 показана принципиальная схема ослабления барьера из горячих слоев воздуха с помощью ВТО с последующим проникновением с моря природных маловысотных форм дождевой облачности на прибрежную территорию. Возникает циркуляция атмосферы ранней весны, способствующая более масштабному распространению по территории суши влажных морских воздушных масс. Вечером и ночью эффект «холодной» пустыни будет усиливаться. Охлаждать пустыню целесообразно на протяжении всего жаркого периода года.

Маловысотная дождевая облачность сформируется над теплой поверхностью моря за счет интенсивного испарения в летнее дневное время. Приморские и приземные ветры смогут беспрепятственно и регулярно (практически суточно-сезонный цикл) перемещать дождевую облачность по территории пустыни. Ввиду неизбежности рассеивания высотных облаков в атмосфере форма и габариты ВТО и соответственно границы зонтично — теневой области на земле будут переменчивы. Вероятной формой «зонтика» ВТО (рис. 2) считается сектор с углом раскрытия ~15° [11].

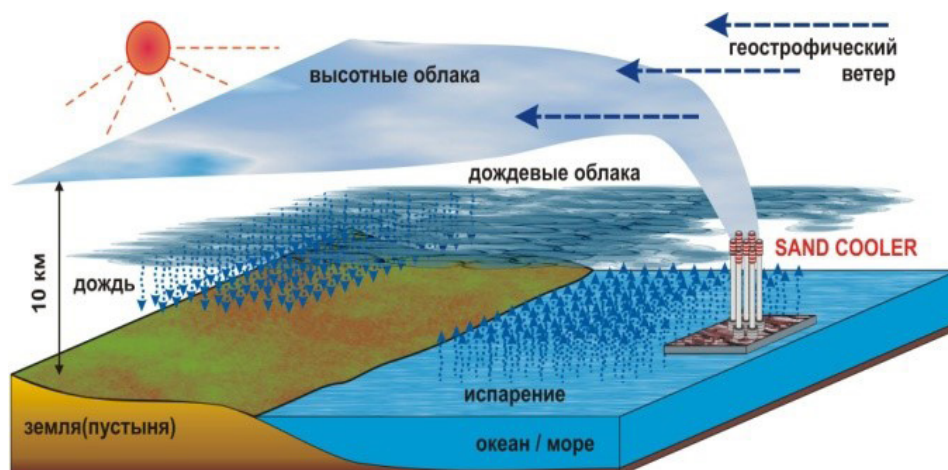


Рис. 3. Принципиальная схема ослабления барьера из горячих слоев воздуха над пустыней за счет образования высотной техногенной облачности

Fig. 3. Schematic diagram of the weakening of the barrier of hot air layers over the desert due to the formation of high-altitude technogenic clouds

Для практической реализации режима «холодной» пустыни необходимо следующее:

- (1) — собственно ВТО — маловодная и относительно долговечная;
- (2) — полезное направление прогнозируемого перемещения ВТО;
- (3) — устройство вывода объемов теплого влагосодержащего воздуха на заданный уровень высоты для образования ВТО.

Высотные облака — универсальное природное средство для рассеивания и поглощения достигшей Земли прямой солнечной радиации в широких пределах. Какая облачность лучше? Известно, что высотные аэрозольные и пепловые облака от деятельности вулканов влияют на климат Земли. Для наших целей, очевидно, это облака среднего яруса на высоте свыше 6 км. Прообразом этих облаков являются конденсационные следы от летящих на сравнительно большой высоте самолетов (*Cirrocumulus tractus*) (рис. 4).

Перистые облака (*Cirrus*) — самые высокие из всех видов облаков. Они образуются в атмосфере на высоте 8–18 км, где в течение всего года температура воздуха составляет $(-20)–(-60)^\circ\text{C}$. Они состоят из ледяных кристаллов и снежинок. Интерес представляют следующие разновидности облаков: перистые плотные (*Cirrus spissatus*, *Ci sp*), перисто-слоистые (*Cirrostratus*, *Cs*), перисто-кучевые (*Cirrocumulus Ci cm*) и некоторые другие (рис. 5).

Влагосодержание (η_{cs}) их весьма мало — $< 0,01 \text{ г/м}^3$ (1/3000 доля влагосодержания воздуха южных морей), что принципиально важно для осуществления режима весны в пустыне по технологии «Land Coolers». Измеримых осадков эти облака не дают. Прозрачность такой облачности зависит от ее толщины и водности. Это может обеспечивать снижение уровня солнечной радиации на 10% и более [12]. Время существования перистых облаков составляет десятки часов.

Перисто-слоистые облака (*Cirrostratus*) не имеют четких очертаний и представляют собой равномерно застилающую все небо туманную пелену, сквозь которую видны лишь диски Солнца и Луны.

Ветер является важным фактором, но ветер не приземный, направление и скорость которого могут меняться ежесуточно, а стабильный по направлению — высотный («самолетный», «геострофический») ветер на высоте от 6 км до 15 км (диапазон тропосферы). Вне экваториальных широт и полюсов Земли это высотный ветер верхнего яруса тропосферы западных направлений, скорость его варьируется в широких пределах от нескольких единиц до 30–40 м/с. Таким образом,



Рис. 4. Конденсационные следы от летящих на сравнительно большой высоте самолетов
Fig. 4. Condensation traces from aircraft flying at a relatively high altitude

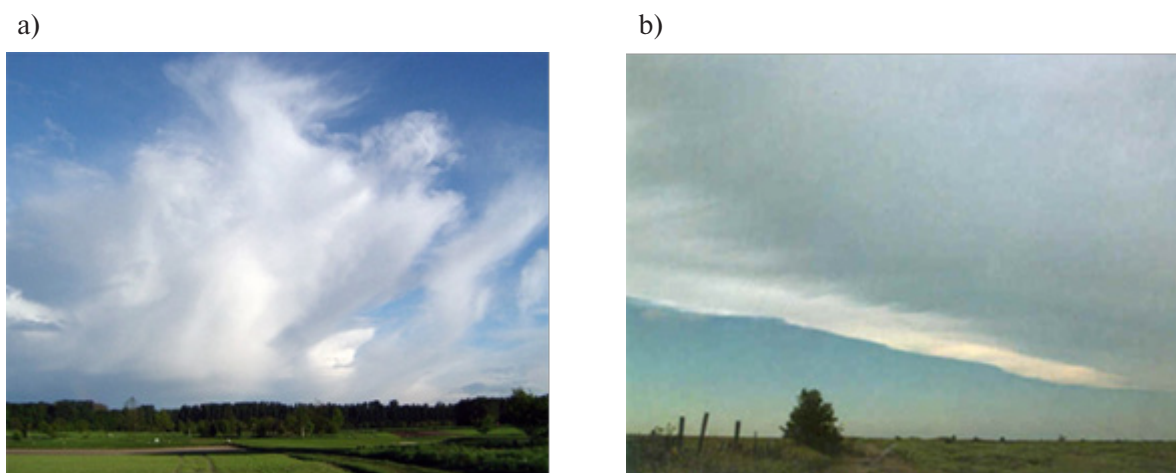


Рис. 5. Перисто-кучевые (а) и перисто-слоистые облака (б)
Fig. 5. Cirro cumulus (a) and Cirrostratus clouds (b)

ветер является фактором перемещения ВТО в предсказуемом направлении почти регулярно, а периметр пустыни, над которой расположится ВТО, будет определяться местонахождением ее источника.

Рассмотрим один из главных аспектов темы — сколько морского воздуха нужно, например, для подъема на уровень высоты горы Эверест (Джомолунгма 8848 м над уровнем моря) для получения значимой ВТО и каковы при этом будут энергетические затраты?

Весна в пустыне: требуемое количество морского воздуха для подъема на высоту 9000 м

На рис. 6 показаны типичные формы и траектории тропосферной струи теплого воздуха (при слабом приземном ветре).

Оценим относительно стабильные видимые размеры ВТО (в форме сектора), приняв 1 сутки за условное время оптического существования «вещества» техногенного облака-зонтика, а также количество морского воздуха, для вывода на высоту 6-15 км, т.е. определим производительность источника ВТО. При скорости, например, $v = 5 \text{ м/с}$ (18 км/час), такое техногенное облако за *одни сутки* пройдет расстояние $R = 24 \cdot 18 = 432 \text{ км}$.

a)



b)



Рис. 6. Формы и траектории тропосферной струи теплого воздуха (а-б)

Fig. 6. Shapes and trajectories of the tropospheric warm air steam (a-b)

Определим площадь 15° – сектора зонтичной ВТО:

$$SBTO = \pi \cdot R^2 \cdot 15^\circ / 360^\circ = 24000 \text{ км}^2.$$

Объем ВТО при толщине 0,5 км [10] составит:

$$V = 24000 \text{ км}^2 \cdot 0,5 \text{ км} = 12000 \text{ км}^3.$$

Найдем содержание воды в ВТО (водность перистого облака $\eta_{cs} = 0,01 \text{ г/м}^3 = 10 \text{ т/км}^3$):

$$M = \eta_{cs} = 120000 \text{ т}.$$

Дебет для поддержки существования такого «зонтика» составит:

$$Q_{ВТО} = M / (24 \cdot 3600) = 1,4 \text{ т/сек}.$$

При использовании в качестве «исходного сырья» воздуха акватории тропических морей (с влажностью $\eta_w = 30 \text{ г/м}^3 = 30000 \text{ т/км}^3$) производительность (по воздуху) Q нашего источника ВТО должна быть не менее:

$$Q = M / \eta_w = 120000 \text{ (т/сутки)} / 30000 \text{ (т/км}^3) = 4 \text{ км}^3/\text{сутки} \approx 50000 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Для скорости высотного ветра $v_b = 20 \text{ м/с}$ производительность Q должна быть не менее 200 тыс. $\text{м}^3/\text{сек}$. Соответственно размеры ВТО будут следующими:

$$R_{ВТО} = 432 \text{ км} \cdot 22/5 = 1900 \text{ км},$$

$$S_{ВТО} = \pi \cdot R^2 \cdot 15^\circ / 360^\circ = 470000 \text{ км}^2.$$

Объем при толщине 0,5 км составит:

$$V = 470000 \text{ км}^2 \cdot 0,5 \text{ км} = 235000 \text{ км}^3.$$

Будем считать значения $Q_{\min} = 50000 \text{ м}^3/\text{сек}$ и $Q_{\max} = 200000 \text{ м}^3/\text{сек}$ (соответственно расстояниям $R_{\min} = 432 \text{ км}$ и $R_{\max} = 1900 \text{ км}$), нижней и верхней границами необходимого расхода воздуха для поддержания ВТО.

Энергетические затраты на зонтичную защиту пустыни от солнца

Исходя из заданной производительности инжектора (по воздуху) $Q_A = 50000 \text{ м}^3/\text{сек}$, оценим величину мощности (N_{50}), затрачиваемой электровентиляторами для достижения воздушной струи высот 2 км и более [13]. Пусть диаметр выходного сопла инжектора $D_0 = 40 \text{ м}$, тогда для обеспечения значения Q_A начальная скорость воздушной струи должна быть $Vi_0 = Q_A / (\pi * D_0^2 / 4) = 40 \text{ м/сек} = 144 \text{ км/час}$. Такую скорость воздуха используют в дозвуковой аэродинамической трубе. Вертикальные струи воздуха с такими выходными параметрами, согласно оценке по формуле Пристли [14], могут достигать в условиях неустойчивой стратификации атмосферы высоты до 2 км и более с максимальной скоростью $Vi_2 = 4,5 \text{ м/сек}$ (рис. 7).

Оценим мощность инжектора N_{50} , необходимую для обеспечения производительности (по воздуху) $Q_A = 50000 \text{ м}^3/\text{сек}$, пользуясь соотношением:

$$N_{50} = (\pi/8) * \rho * D_0^2 * Vi_0^3 = 45 \text{ МВт}, \quad (1)$$

где $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха.

Оценим стабильные видимые размеры ВТО (в форме сектора) [10], принимая:

- 1) условное время оптического существования «вещества» зонтика ВТО $\tau_1 = 24 \text{ час}$,
- 2) изменение водосодержания морского воздуха ($\eta_w \approx 25 \text{ г/м}^3$) при образовании перистого облака ($\eta_{ci} \approx 0,01 \text{ г/м}^3 \approx \eta_w / 2500$) обусловлено рассредоточением 1:2500 воздушной массы ВТО на высоте $> 6 \text{ км}$.

Очевидно, объем ВТО с учетом рассредоточения (1:2500) в перистую облачность составит за сутки:

$$V_{\text{ВТО}} = Q_A * \tau_1 = 50000 (\text{м}^3/\text{с}) * 24 * 3600 (\text{с}) * 2500 \text{ м}^3 = 10800 \text{ км}^3.$$

При характерной толщине перистого облака $h_{ci} = 100...400 \text{ м}$ [10] площадь ВТО и экранируемой территории достигнет:

$$S_{\text{ВТО}} = V_{\text{ВТО}} / h_{ci} = (100...28) \text{ тыс. км}^2. \quad (2)$$

Глубина распространения ВТО по континенту RBTO для диапазона скорости высотного ветра (и соответственно ВТО) $V_{\text{ВТО}} = 5...30 \text{ м/с}$, равна:

$$R_{\text{ВТО}} = 24 * 3600 (\text{с}) * V_{\text{ВТО}} (\text{м/с}) = (430...2580) \text{ км}.$$

В зависимости от требуемой величины площади ослабления солнечной нагрузки на территории, экранируемой ВТО, и количества инжекторов в качестве источника энергии для электровентиляторов кулера могут использоваться теплосбрасывающие электростанции 100-1000 МВт.

Полезная модель прессинга пустыни

Рассмотрим техническое устройство для вывода потока «исходного сырья» – теплового влаго-содержащего воздуха на рабочую высоту 6-15 км.

Система «Land Coolers» [2] представляет собой энергетическую установку, работающую на свои модернизированные градирни-инжекторы. Тепловая мощность, уходящая в выпар градир-

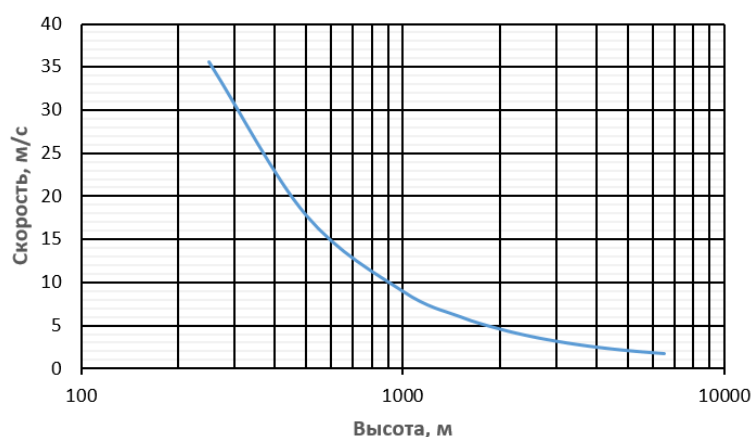


Рис. 7. Скорость и высота вертикальных струй воздуха, согласно оценке по формуле Пристли [14]

Fig. 7. The velocity and height of vertical air steams, according to the Priestley equation [14]

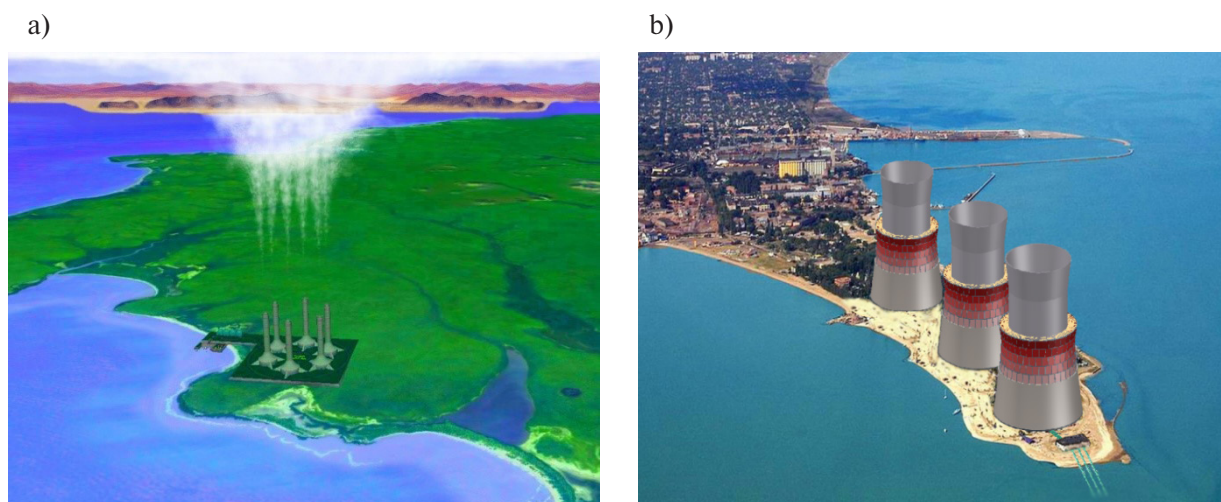


Рис. 8. Макеты систем «Land Coolers» [2] с 6 (а) и 3 (б) инжекторами

Fig. 8. Models of "Land Coolers" systems [2] with 6 (a) and 3 (b) injectors

ни, рекупируется для подогрева потока воздуха на 10-40 °С с целью повышения плавучести воздушной струи. На рис. 8 показаны варианты «Land Coolers» [2] соответственно с 6 и 3 инжекторами.

Инжекторы «LandCoolers» имеют высоту и производительность, обеспечивающие их независимость от приземного и тропосферного ветра нижнего яруса.

«LandCoolers» могут работать также в режиме *промышленной конденсации атмосферной влаги моря*, при этом система вентиляторов подает морской воздух не в инжекторы, а на охлаждение, в специальные охладители-конденсаторы, охлаждающей средой для которых может являться, например, морская вода. Образующийся пресноводный конденсат (до 0,5 т/с с каждого инжектора), близкий по качеству к дождевой воде, обеспечит производство природной пресной воды [15–17].

Система «LandCoolers» должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- 1) снабжать атмосферу продуктом природного взаимодействия моря и солнца;

- 2) работать длительное время бесперебойно;
- 3) быть энергонезависимой;
- 4) иметь приморское базирование;
- 5) обладать надежной защитой от цунами и других водных стрессов;
- 6) вырабатывать экологически чистый пресноводный конденсат природного происхождения без образования отходов [15–17];
- 7) контролироваться международным сообществом (органом ООН – UN-Water).

В качестве источников энергии инжекторов «Land Coolers» возможно использование (в зависимости от площади зонтично-затеняемой пустыни) энергетических установок мощностью от 100 МВт и более. Работа высотного инжектора может осуществляться не только тягой теплой струи воздуха, но также и за счет мощности винтовых вентиляторов для ускорения выхода потока воздуха из сопла и достижения уровня среднего яруса тропосферы [2]. Требуемое количество внутрикорпусных винтовых вентиляторов зависит от высоты башни инжектора.

Планирование озеленения пустыни

Системная борьба с пустыней, её орошение и озеленение осуществимы при условии применения технологии «Land Coolers». Начинать целесообразно с «молодых» пустынь, где есть остаточная водная инфраструктура: сезонные реки и озера, колодцы, мягкая почва и оазисы. Тогда осадки (и затраты) будут использованы более эффективно, а природе проще приспособиться. Важно также наличие национального и международного соглашения по количеству осадков и распределению этих ресурсов на территориях стран-регуляторов и стран-потребителей.

Решение о сооружении блоков «Land Coolers» возможно после предпроектных работ и авиационного определения Розы высотных воздушных течений для выбора площадки строительства инжекторов «Land Coolers». Монтаж энергетической установки и строительство инжекторов «Land Coolers» могут учитывать комплекс новых мероприятий по увеличению мощности и количества инжекторов.

Для решения проблемы прибрежной пустыни или обезвоживаемого региона целесообразна разработка стратегии на основе сооружения блоков системы «Land Coolers», расположенных вдоль побережья моря на одном или нескольких континентах, а также на островных территориях.

Перспективы системы «Land Coolers» для решения проблемы пустыни на планете

Система «Land Coolers» перспективна в первую очередь для борьбы с пустынями и полупустынями, омываемыми морями и океанами, например, Австралии, Ирана, Индии, Америки, Сахары, а также пустыни стран Ближнего востока и Аравийского полуострова. Территории стран, омываемые морями с востока, например, Китай, также могут быть включены в перечень перспективных для коррекции климата территории заданного масштаба (зона, регион и т.д.) с использованием системы «Land Coolers» при условии атмосферно-стабильного высотного воздушного фронта восточной направленности. Площадь корректируемых территорий зависит от размещения блоков системы «Land Coolers», составляя 300 тыс. км² и более, что сопоставимо с площадью Большой пустыни Виктория (Австралия), а также пустынь Руб-эль-Хали, Большой Нефуд (Саудовская Аравия) и др.

Система «Land Coolers» может использоваться и в Европе и Америке для коррекции изменения максимальных летних, включая среднегодовые, температур со снижением частоты отрицательных природно-климатических явлений типа циклонов-антициклонов и др. Влияние «Land Coolers» на коррекцию деградации пустынных и засушливых земель может ощущаться на расстоянии 1000 км и более от берега (рис. 9).

Заданное по масштабу (зона, регион и др.) воздействие на атмосферу и на окружающую среду с целью коррекции климата и кругооборота воды — именно соответственно такой является задача

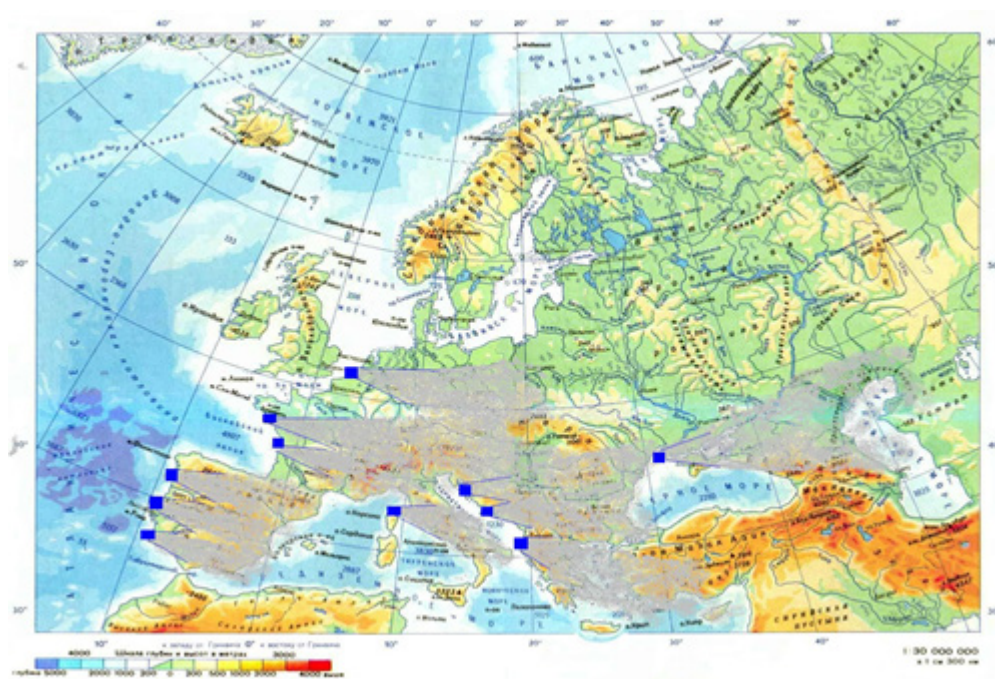


Рис. 9. Территории планеты, перспективные для применения системы «Land Coolers» (выделены серым цветом)

Fig. 9. The territories of the planet that are promising for the use of the "Land Coolers" system (highlighted in gray)

работы системы «Land Coolers» применительно к прибрежной пустыне или деградирующей проблемной территории.

Отметим, что эксплуатация блоков «Land Coolers» может сопровождаться шумом вследствие разнонаправленности ветров по высоте тропосферы, начиная с приземного ветра, что потребует их удаления от населенных пунктов.

Также отметим, что наземная технология «Land Coolers» значительно дешевле затратных и не безопасных аэрокосмических проектов коррекции климата, предложенных в США и Европе [4–7]. Её применение является необходимым и достаточным условием природоохранных проектов озеленения пустыни и защиты от солнца проблемных территорий, начиная с этапа подготовки создания в пустыне условий появления зеленых зон — оазисов. Использовать природный режим весны в пустыне вместо засушливого лета позволяет охлаждение пустыни влажными морскими воздушными массами.

В отличие от технологии «Land Coolers», ряд проектов, включая аэрокосмические, действующие исключительно на технической, а не на природной основе климатических процессов на земле, море и в атмосфере и их взаимодействия, не имеют достаточного реального коррекционного воздействия. Действуя только техническим путем, включая химический фактор, сложно обеспечить эффективный и стабильный процесс ослабления солнечной радиации и выпадения значимого количества осадков.

Заключение

В настоящее время опустынивание территории пытаются остановить с помощью тотальной экономии пресной воды, капельного полива, технологии «силиконовой долины» получения воды из воздуха пустыни, а также применения солнечной энергетики, что является не решением проблемы, а лишь малой отсрочкой времени проживания человека на проблемной засушливой территории.

Решение проблемы пустыни целесообразно проводить путем генерации и системного регулирования облачности с последующим выпадением дождевых осадков при условии применения наземного аэротермического кулера [2], поскольку деградация земли и образование пустыни есть следствие ранее сформированной совокупности природных процессов, в которой атмосферный кругооборот воды практически отсутствует, несмотря на имеющиеся для этого возможности атмосферной влаги морей и морской влажной облачности.

Что ожидает Землю в будущем — глобальное потепление или похолодание — науке неизвестно, поскольку не известна эволюция солнца и космических процессов. Известно лишь то, что пустыня расширяется, вытесняя человечество, ликвидировавшее к началу 21 века около половины площади жизненно важных лесов на планете, и отнимая у него воду, еду и свободу перемещения. Перегрев, обезвоживание суши и обширные лесные пожары стали реальной проблемой с тенденцией роста даже весьма благополучного по аридности региона Европы.

В связи с этим окружающая среда в возрастающей степени нуждается в корректирующем процессе охлаждения ближайших пустынь и деградирующих земель за счет кругооборота воды с помощью зонтичной высотно-техногенной перистой облачности, а также с восстановлением водности рек и озер, травяного покрытия полей и биосферы лесов на месте прибрежных пустынь и полупустынь, чтобы создать для миллионов и более людей возможности жизни и работы на восстановленной земле, не имеющей решения проблемы ее трансформации в территорию устойчивого развития. Таким средством решения проблемы пустыни, имеющим актуальный, экологический и гуманитарный потенциал для устойчивого развития, является универсальная система «Land Coolers» — охладители земель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Котляков В.М. Академическая география // Наука в России. 2008. № 4. С. 40–49.
- [2] Рогожкин В.В., Колонов Е.В., Горынин В.И., Шеволдин А.В. Кулер для регулирования климата. Патент РФ № 2734834, опубликовано 23.10.2020, Бюл. № 30.
- [3] Пять невероятных способов остановить глобальное потепление с помощью геоинженерии. 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ecobyт.ru/article/121112/457/>
- [4] Йорио Луиджи. Управление климатом как инструментом борьбы с глобальным потеплением. 2014. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.swissinfo.ch/rus/sci-tech/40807950/>
- [5] Lohman U., Gasparini B. A cirrus cloud climate dial? // Science. 2017. V. 357. P. 248–249.
- [6] Smith W., Wagner G. Stratospheric aerosol injection tactics and costs in the first 15 2021s of deployment // Environmental Research Letters. 2018. V. 13. № 124001.
- [7] Ricke K., Drouet L., Kalderia K., Tavoni M. Country – level social cost of carbon // Nature Climate Change. 2018. № 8. P. 895–900.
- [8] Рогожкин В.В., Горынин В.И., Мишин Е.Б., Колонов Е.В., Минкин А.И. COOLERS новое средство для обводнения пустыни / Сб. материалов Всероссийской конференции изобретателей. — СПб: Изд-во Политехнического университета, 2018. — С. 127–136.
- [9] Беспалов Д.П., Девяткин А.М., Довгалоук Ю.А. и др. Атлас облаков. — СПб: Д'АРТ, 2011. 248 с.
- [10] Андреев А.О., Дукальская М.В., Головина Е.Г. Облака: происхождение, классификация, распознавание. — СПб.: Изд. РГГМУ, 2007. — 228 с.
- [11] Вульфсон Н.И., Левин Л.М. Метеотрон как средство воздействия на атмосферу / Ин-т приклад. геофизики им. Е.К. Федорова. — М.: Гидрометеиздат: Москов. отд-ние, 1987. 131 с.
- [12] Григорьев Н.О., Саенко А.Г. Оценка прозрачности перистых облаков на основе анализа спутниковых фотографий // Материалы итоговой сессии Ученого совета 2005 г. Изд. РГГМУ, 2005. 224 с.
- [13] Пристли С.Х.Б. Турбулентный перенос в приземном слое атмосферы. Гидрометеиздат, 1964. 122 с.

- [14] Кухлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир, 1982. — 519 с.
- [15] Горынин В.И., Рогожкин В.В., Мишин Е.Б., Коленов Е.В., Скачков В.А. Конденсационный ресурс пресной воды — фактор будущего Земли // Сб. материалов Всероссийской конференции изобретателей. — СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2018. — С. 24–33.
- [16] Горынин В.И., Рогожкин В.В., Кондратьев С.Ю., Мишин Е.Б., Коленов Е.В. Технология и средства конденсации атмосферной влаги морей для производства пресной воды // Вестник машиностроения. 2019. № 7. С. 84–88.
- [17] Горынин В.И., Кондратьев С.Ю., Рогожкин В.В., Мишин Е.Б., Коленов Е.В. Конденсация атмосферной влаги акватории моря для поточного производства природной пресной воды // Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26. № 4. С. 23–35.
- [18] Вализер Н.А., Мошков К.В., Потапов К.А., Рогожкин В.В. Атомно-энергетический комплекс. Патент RU2504417C1. Оpubл. 20.01.2014 г.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГОРЫНИН Владимир Игоревич — начальник лаборатории, Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей», д-р техн. наук.

E-mail: z1dehy97@mail.wplus.net

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

E-mail: rogozhkin010@gmail.com

КОНДРАТЬЕВ Сергей Юрьевич — профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: petroprom2013@yandex.ru

МИШИН Евгений Борисович — директор Московского проектного института, Московский проектный институт АО «Атомэнергопроект», канд. техн. наук.

E-mail: mishin@aep.ru

КОЛЕНОВ Евгений Викторович — ведущий конструктор, ПАО «Силовые машины», без степени.

E-mail: evkol50@gmail.com

ШЕВОЛДИН Алексей Вячеславович — ведущий инженер, Санкт-Петербургский филиал Московского проектного института АО «Атомэнергопроект», без степени.

E-mail: avshev@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 08.06.2021

REFERENCES

- [1] V.M. Kotlyakov, Akademicheskaya geografiya // Nauka v Rossii. 2008. № 4. С. 40–49.
- [2] V.V. Rogozhkin, Ye.V. Kolenov, V.I. Gorynin, A.V. Shevoldin, Kuler dlya regulirovaniya klimata. Patent RF № 2734834, opublikovano 23.10.2020, Byul. № 30.
- [3] Pyat neveroyatnykh sposobov ostanovit globalnoye potepleniye s pomoshchyu geoinzhenerii. 2021. [Elektronnyy resurs]. URL: <https://www.ecobyт.ru/article/121112/457/>
- [4] Yorio Luidzhi, Upravleniye klimatom kak instrumentom borby s globalnym potepleniym. 2014. [Elektronnyy resurs]. URL: <https://www.swissinfo.ch /rus/sci-tech/40807950/>
- [5] U. Lohman, B. Gasparini, A cirrus cloud climate dial? // Science. 2017. V. 357. P. 248–249.

- [6] **W. Smith, G. Wagner**, Stratospheric aerosol injection tactics and costs in the first 15 years of deployment // *Environmental Research Letters*. 2018. V. 13. № 124001.
- [7] **K. Ricke, L. Drouet, K. Kalderia, M. Tavoni**, Country – level social cost of carbon // *Nature Climate Change*. 2018. № 8. R. 895–900.
- [8] **V.V. Rogozhkin, V.I. Gorynin, Ye.B. Mishin, Ye.V. Kolenov, A.I. Minkin**, COOLERS novoye sredstvo dlya obvodneniya pustyni / Sb. materialov Vserossiyskoy konferentsii izobretateley. – SPb: Izd-vo Politekhnikeskogo universiteta, 2018. – С. 127–136.
- [9] **D.P. Bespalov, A.M. Devyatkin, Yu.A. Dovgalyuk i dr.**, Atlas oblakov. – SPb: DART, 2011. 248 s.
- [10] **A.O. Andreyev, M.V. Dukalskaya, Ye.G. Golovina**, Oblaka: proiskhozhdeniye, klassifikatsiya, raspoznavaniye. – SPb.: Izd. RGGMU, 2007. – 228 s.
- [11] **N.I. Vulfson, L.M. Levin**, Meteotron kak sredstvo vozdeystviya na atmosferu / In-t priklad. geofiziki im. Ye.K. Fedorova. – M.: Gidrometeoizdat: Moskov. otd-niye, 1987. 131 s.
- [12] **N.O. Grigoryev, A.G. Sayenko**, Otsenka prozrachnosti peristyykh oblakov na osnove analiza sputnikovyykh fotografii // *Materialy itogovoy sessii Uchenogo soveta 2005 g.* Izd. RGGMU, 2005. 224 s.
- [13] **S.Kh.B. Pristli**, Turbulentnyy perenos v prizemnom sloye atmosfery. Gidrometeoizdat, 1964. 122 s.
- [14] **Kukhling Kh.** Spravochnik po fizike. M.: Mir, 1982. – 519 s.
- [15] **V.I. Gorynin, V.V. Rogozhkin, Ye.B. Mishin, Ye.V. Kolenov, V.A. Skachkov**, Kondensatsionnyy resurs presnoy vody – faktor budushchego Zemli // Sb. materialov Vserossiyskoy konferentsii izobretateley. – SPb.: Izd-vo Politekhnikeskogo universiteta, 2018. – S. 24–33.
- [16] **V.I. Gorynin, V.V. Rogozhkin, S.Yu. Kondratyev, Ye.B. Mishin, Ye.V. Kolenov**, Tekhnologiya i sredstva kondensatsii atmosferno y vlagi morey dlya proizvodstva presnoy vody // *Vestnik mashinostroyeniya*. 2019. № 7. С. 84–88.
- [17] **V.I. Gorynin, S.Yu. Kondratyev, V.V. Rogozhkin, Ye.B. Mishin, Ye.B. Kolenov**, Kondensatsiya atmosferno y vlagi akvatorii morya dlya potochno go proizvodstva prirodno y presno y vody // *Materialovedeniye. Energetika*. 2020. T. 26. № 4. С. 23–35.
- [18] **N.A. Valizer, K.V. Moshkov, K.A. Potapov, V.V. Rogozhkin**, Atomno-energeticheskiy kompleks. Patent RU2504417S1. Opubl. 20.01.2014g.

THE AUTHORS

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

ROGOZHNIKIN Vladimir V. – *JSC “Atomproekt”*.
E-mail: rogozhkin010@gmail.com

KONDRATYEV Sergey Yu. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: petroprom2013@yandex.ru

MISHIN Evgeniy B. – *JSC “Atomenergoproekt”*.
E-mail: mishin@aep.ru

KOLENOV Evgeniy V. – *PJSC “Power machines”*.
E-mail: evkol50@gmail.com

SHEVOLDIN Aleksey V. – *JSC “Atomenergoproekt”, St-Petersburg Branch*.
E-mail: avshev@gmail.com

Received: 08.06.2021

DOI: 10.18721/JEST.27203

УДК 62-1/-9

Э.Р. Маннанов, А.Г. Филин

АО «Силовые машины»,
Санкт-Петербург, Россия

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ СТАТОРНЫХ ОБМОТОК ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

В рамках исследования разработаны математические модели для оценки теплового состояния системы изоляции в стержнях статорной обмотки и проведения сравнительного анализа теплофизических воздействий на состояние элементов конструкции системы изоляции в пазовой части обмотки статора, зоне выхода обмотки из паза и лобовых частях обмотки. Авторы анализируют полученные экспериментальные данные и результаты математического моделирования теплофизических процессов для конструкции изоляции, выполненной по технологиям Global VPI и Resin Rich применительно к турбогенератору с воздушным охлаждением мощностью 225 МВт. В свете того, что штатный термоконтроль не предоставляет информации по среднему и максимальному перепадам температуры по толщине изоляции, максимальной температуры меди стержней обмотки статора, средней температуры на поверхности изоляции, расчетное выявление нагруженных критических зон в элементах конструкции изоляции является актуальной задачей проектирования турбогенераторов. Принятие обоснованных конструктивных решений при проектировании позволяет минимизировать локальные перегревы и повысить надежность системы изоляции.

Ключевые слова: турбогенератор, корпусная изоляция, обмотка статора, метод конечных элементов, тепловое состояние.

Ссылка при цитировании:

Маннанов Э.Р., Филин А.Г. Тепловое состояние электрической изоляции статорных обмоток турбогенераторов с воздушным охлаждением // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 2. С. 38–49. DOI: 10.18721/JEST.27203

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

E.R. Mannanov, A.G. Filin

JSC “Power machines”, Saint-Petersburg, Russia

ELECTRICAL INSULATION THERMAL STATE OF TURBINE GENERATORS STATOR WINDINGS WITH AIR-COOLING

Within the research, mathematical models were developed to evaluate the thermal state of the insulation system in the rods of the stator winding and for a comparative analysis of thermophysical effects on the state of structural elements of the insulation system at the slot part, frontal part of the stator winding and at the zone of winding exit from the slot. The authors analyze the obtained experimental data and the mathematical modeling results of thermophysical processes for the insulation structure implemented using Global VPI and Resin Rich technologies as applied to the air-cooled turbine generator with output of 225 MW. In light of the fact, the standard thermal control system does not provide information about the average and maximum temperature drops across the insulation thickness, the maximum copper temperature of the stator winding rods,

the average temperature on the insulation surface, the calculated identification of loaded critical zones in the elements of the insulation structure is a vital task in the design of turbine generators. Adopting sound design decisions minimizes local overheating and increases the insulation system reliability.

Keywords: turbine generator, main insulation, stator winding, finite element method, thermal state.

Citation:

E.R. Mannanov, A.G. Filin, Electrical insulation thermal state of turbine generators stator windings with air-cooling, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (02) (2021) 38–49, DOI: 10.18721/JEST.27203

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Электрическая изоляция стержней статора турбогенераторов с косвенным воздушным охлаждением отвечает двум противоречивым требованиям. С одной стороны, электрофизические свойства и толщина корпусной изоляции должны обеспечивать достаточную электрическую прочность, с другой — теплофизические свойства изоляции — высокий коэффициент теплопроводности с целью получения максимального уровня температур в обмотке в номинальном режиме машины ниже класса нагревостойкости применяемых изоляционных материалов. Конструкция системы изоляции обмотки статора представляет из себя «слоёный пирог», состоящий из внутреннего и внешнего полупроводящего покрытия, корпусной изоляции в виде пропитанных лент, нанесенных в несколько слоёв, и системы пазового уплотнения. Во многом, конструктивные особенности системы изоляции определяют технологии её производства, среди которых можно выделить известные Global VPI и Resin Rich, применяемые многими компаниями-изготовителями мощных турбогенераторов. Системы штатного термоконтроля теплового состояния обмотки статора турбогенератора зачастую не предоставляют информацию по среднему и максимальному перепадам температуры по толщине изоляции, максимальной температуры меди стержней обмотки статора, средней температуры на поверхности изоляции, поэтому расчетное определение картины температурного поля в системе изоляции является актуальной задачей проектирования турбогенераторов. Достоверное знание о локальных температурных максимумах и градиентах температур по толщине изоляции способствует принятию обоснованных конструктивных решений при проектировании, что, в свою очередь, позволяет минимизировать локальные перегревы и повысить надежность системы изоляции.

В работах [1–21] всесторонне рассматриваются вопросы, связанные исследованием сопряженных задач теплофизики и электротехники с целью создания новых систем электрической изоляции, повышения надежности системы изоляции и вращающихся электрических машин, в целом.

В рамках исследования авторы анализируют полученные экспериментальные данные и результаты математического моделирования теплофизических процессов для конструкции системы изоляции статорных обмоток турбогенератора мощностью 225 МВт, выполненной по технологиям Global VPI и Resin Rich для выявления нагруженных критических зон в элементах конструкции изоляции.

Численное моделирование

Для оценки теплового состояния электрической изоляции статорных обмоток турбогенераторов с воздушным охлаждением и принятии обоснованных конструктивных решений, в настоящем исследовании рассматривается система изоляции в пазовой части статорной обмотки и системы бокового уплотнения по ширине паза для зоны выхода обмотки из паза для технологии Global VPI (см. табл. 1, рис. 1).

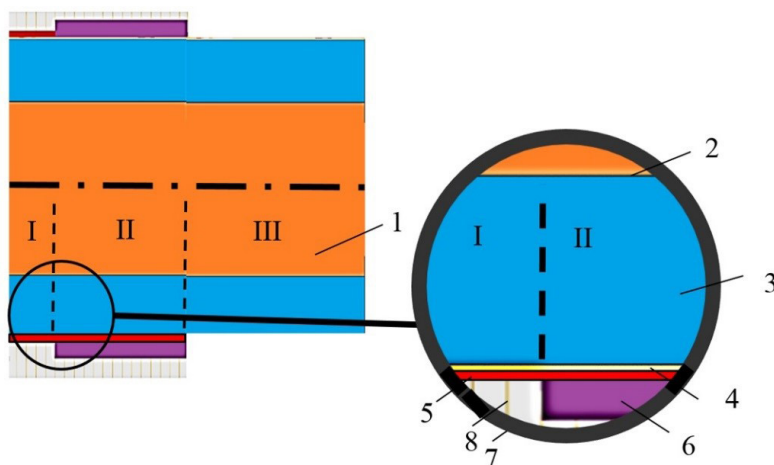


Рис. 1. Эскиз зоны выхода обмотки из паза для технологии Global VPI: I – Пазовая часть обмотки статора, II – Зона выхода обмотки из паза, III – Лобовая часть обмотки; позиции 1-8 соответствуют табл. 1

Fig. 1. Sketch of the winding exit zone from the slot for the Global VPI technology: I – Slot part of the stator winding, II – Zone of winding exit from the slot, III – Frontal part of the winding; positions 1-8 correspond to Table 1

Выкладка паза для технологии Global VPI

Таблица 1

Layout of the slot for Global VPI

Table 1

Global VPI (Конструкция разработана)		
№	Конструктивные элементы стержня статорной обмотки и системы бокового уплотнения по ширине паза	Толщина, %
1	Ширина плетеного медного стержня	75,300
2	Внутренняя коронозащита	0,788
3	Корпусная изоляция	9,940
4	Полупроводящая лента	0,757
5	Упругая прокладка	0,788
6	Пазовая коробка	6,310
7	Сердечник (Толщина листа сердечника)	1,100
8	Клей между листами сердечника	0,095
9	Ширина стержня	98,300
10	Ширина паза	100

Принимая во внимание высокую актуальность работ по модернизации системы изоляции с целью повышения надежности турбогенераторов с воздушным охлаждением, в данной работе разработана выкладка система изоляции для конструкции турбогенератора мощностью 225 МВт, реализованной по технологии Resin Rich с применением системы коронозащиты на ленточных материалах (см. табл. 2, рис. 2).

Учитывая решаемые задачи, требуется выполнить тепловой расчет для пазовой части, выхода обмотки из паза и лобовой части статора турбогенератора с воздушным охлаждением мощностью 225 МВт применительно к технологиям Global VPI и Resin Rich для различных вариантов конструкции в номинальном режиме работы, а также произвести сравнительную оценку данных технологий изготовления обмотки.

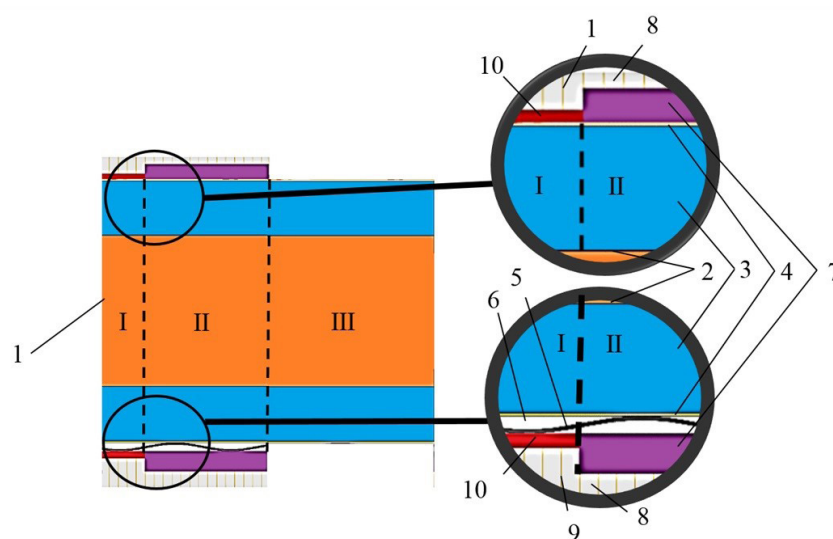


Рис. 2. Эскиз зоны выхода обмотки из паза для технологии Resin Rich: I – Пазовая часть обмотки статора, II – Зона выхода обмотки из паза, III – Лобовая часть обмотки; Позиции 1-10 соответствуют табл. 2
Fig. 2. Sketch of the winding exit zone from the slot for the Resin Rich technology: I – Slot part of the stator winding, II – Zone of winding exit from the slot, III – Frontal part of the winding; positions 1-10 correspond to Table 2

Таблица 2

Выкладка паза для технологии Resin Rich

Table 2

Layout of the slot for Resin Rich

Resin Rich (Пазовое уплотнение с одной стороны)		
№	Конструктивные элементы стержня статорной обмотки и системы бокового уплотнения по ширине паза	Толщина, %
1	Ширина плетеного медного стержня	75,300
2	Внутренняя коронозащита	0,788
3	Высокотеплопроводная корпусная изоляция	10,380
4	Внешняя коронозащита	0,315
5	Гофрированная прокладка	1,260
6	Воздушный зазор	0,310
7	Пазовая коробка	6,310
8	Сердечник	1,100
9	(Толщина листа сердечника)	0,095
10	Клей (между листами сердечника)	0,130
11	Ширина стержня	98,300
12	Ширина паза	100

Особенности конструкции торцевой зоны статора турбогенератора с воздушным охлаждением мощностью 225 МВт:

- зубцовая зона удерживается от распушевки нажимными пальцами, формирующие дополнительно радиальные вентиляционные каналы. Кроме того, для предотвращения распушевки

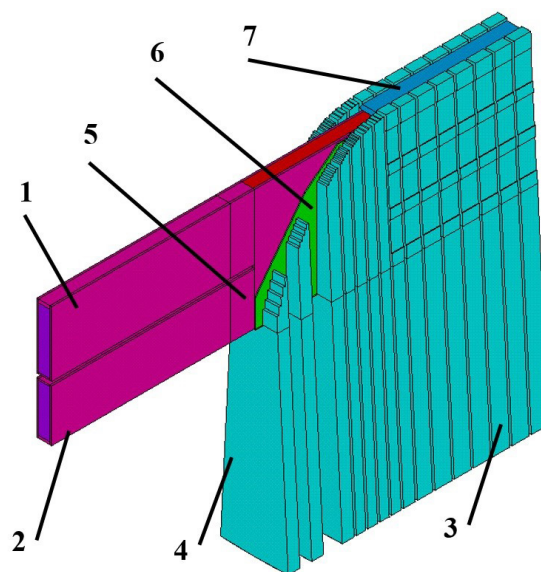


Рис. 3. Модель статора турбогенератора в лобовой части, выходе обмотки из паза и в пазовой части в пакете ANSYS: 1 – верхний стержень обмотки статора; 2 – нижний стержень обмотки статора; 3 – основные пакеты сердечника статора; 4 – торцевые пакеты сердечника статора; 5 – поверхность, закрытая замазкой, расположенной между соседними стержнями в месте выхода обмотки статора из паза; 6 – изоляционная коробка; 7 – клин пазовый

Fig. 3. Stator model of the turbine generator in the frontal part, the winding exit zone from the slot and in the slot part in ANSYS: 1 – upper bar of the stator winding; 2 – the lower bar of the stator winding; 3 – main packages of the stator core; 4 – end packages of the stator core; 5 – a surface covered with a putty located between adjacent bars at the zone of winding exit from the slot; 6 – insulating box; 7 – slot wedge

активной стали в торцевых зонах, а также для улучшения формы поля в зазоре в торцевых зонах крайние пакеты выполняют ступенчатыми;

- при выходе из паза стержни скрепляются замазкой;
- в паз на длине скошенных пакетов вкладывается пазовая коробка из изоляционного материала с целью предотвращения механических повреждений корпусной изоляции стержней при укладке.

В качестве расчётной программы для теплового расчета выбран пакет ANSYS. Исходными данными для его проведения служат результаты электромагнитного (тепловыделения) и вентиляционного (распределение расходов и скоростей воздуха в каналах) расчетов. Последний произведен посредством вентиляционной схемы замещения. Принимаются следующие допущения расчетной геометрической модели:

- в силу тепловой симметрии расчетная область ограничена плоскостями симметрии зубца в тангенциальном направлении, а также 8-ю основными пакетами сердечника статора в аксиальном направлении;
- стержни статора при выходе из паза искусственно спрямлены, так как это не оказывает влияния на результаты теплового расчета, но при этом упрощает построение геометрической модели.

Значения теплопроводности материалов системы изоляции были определены посредством разработанной авторами методики и программного обеспечения, учитывающих изоляцию стержней статора, пазовое уплотнение и ступенчатость стенки паза [1].

Модель статора турбогенератора в месте выхода обмотки из паза в пакете ANSYS представлена на рис. 3. Модель пазовой части активной зоны, включающая сердечник и обмотку статора, была верифицирована посредством эксперимента, проведенного на испытательном стенде в косвен-

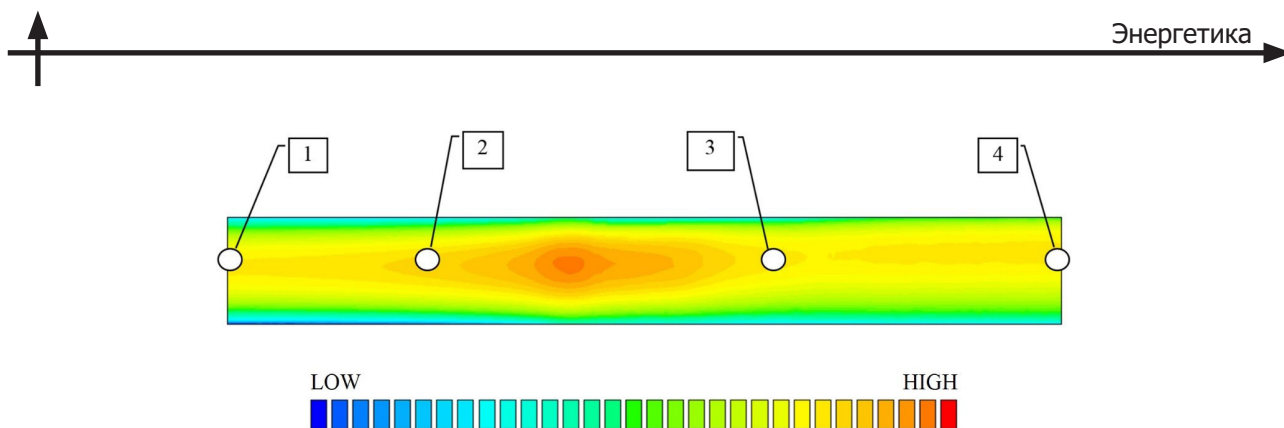


Рис. 4. Картина температурного поля меди проводников верхнего стержня турбогенератора, с указанием положения закладки оптоволоконных датчиков температуры: 1 – замеры в лобовой части, 2 – замеры на стыке пазовой и лобовой части, 3 – замеры в месте выхода обмотки из паза, 4 – замеры в пазовой части

Fig. 4. Temperature distribution in the copper conductors of the upper bar of the turbine generator with an indication of the position of fiber-optic temperature sensors insertion: 1 – measurements in the frontal part, 2 – measurements at the junction of the slot and frontal parts, 3 – measurements at the zone of winding exit from the slot, 4 – slot part

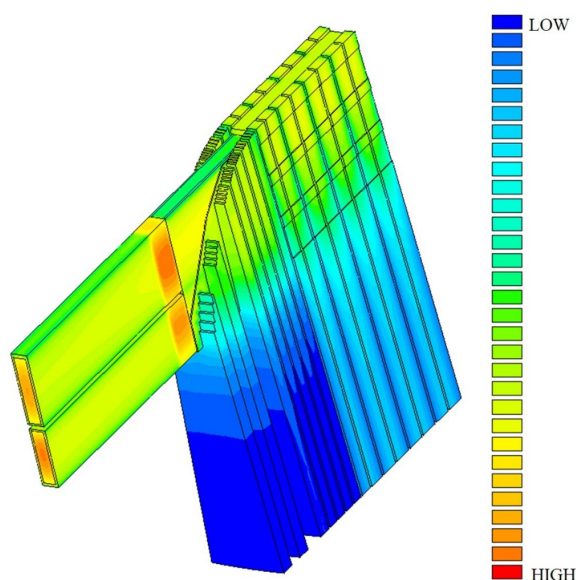


Рис. 5. Картина температурного поля в зоне выхода обмотки из паза

Fig. 5. Temperature distribution in the zone of the winding exit from the slot

ном режиме работы машины (режим короткого замыкания), по результатам которого было установлено расхождение опытных и расчетных данных 1 % [1].

Основное условие сопоставления двух технологий изготовления системы изоляции – сохранение электромагнитных нагрузок в обмотке и сердечнике статора посредством сохранения геометрических размеров медных проводников обмотки статора и геометрии паза. При этом, для технологии Resin Rich разработана выкладка паза с применением системы коронозащиты на ленточных материалах (см. табл. 2).

На рис. 4 проиллюстрирована картина температурного поля гомогенизированной среды, моделирующей медные проводники верхнего стержня, применительно к технологии Global VPI.

На рис. 5 представлена картина температурного поля обмотки и сердечника статора в зоне выхода обмотки из паза.

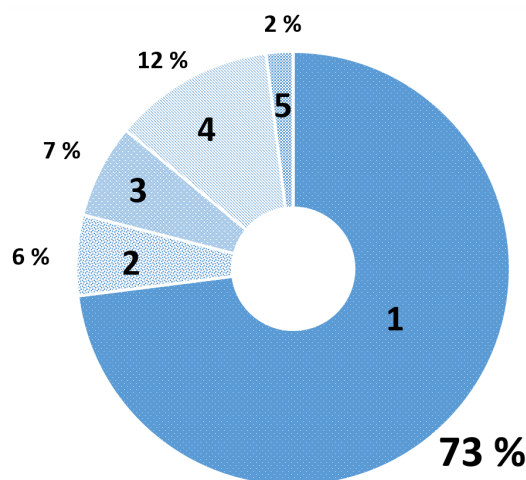


Рис. 6. Вклад элементов конструкции в термическое сопротивление системы изоляции, %:

1 – корпусная изоляция; 2 – ступенчатый паз статора; 3 – воздушный зазор;

4 – гофрированная прокладка; 5 – коронозащитное покрытие

Fig. 6. Contribution of structural elements to the thermal resistance of the insulation system, %:

1 – main insulation; 2 – stepped slot wall; 3 – air gap; 4 – ripple spring; 5 – corona protecting layer

Полученная картина температурного поля для исследуемой области позволяет вычислить средний и максимальный перепад температуры по толщине изоляции на расчетных участках: пазовая, лобовая части и место выхода обмотки из паза; максимальную температуру меди верхнего и нижнего стержня обмотки статора, среднюю температуру на поверхности изоляции.

Уровень средних перепадов температур по толщине изоляции для технологий Resin Rich и Global VPI на расчетных участках обмотки статора на 20 % ниже возможной границы зоны риска появления расслоений в изоляции [1–5].

На рис. 6 приведена расчетная оценка вклада элементов конструкции в термическое сопротивление системы изоляции обмотки статора турбогенератора с воздушным охлаждением для технологии Resin Rich.

Снижение уровня нагрева обмотки статора и уменьшение перепадов температур по толщине корпусной изоляции наиболее эффективно за счет повышения теплопроводности корпусной изоляции [5–17].

Анализ экспериментальных и расчетных данных

Экспериментальное исследование теплового состояния обмотки статора турбогенератора мощностью 225 МВт с воздушным охлаждением производилось посредством штатного температурного контроля, а также дополнительного оснащения машины оптоволоконными термодатчиками. На рис. 7 изображена принципиальная схема расположения оптоволоконных датчиков в верхнем стержне обмотки статора по длине, а также штатного термосопротивления.

Место расположения оптоволоконного датчика, штатного термосопротивления, а также термомпары, регистрирующей температуру зубца сердечника статора, в поперечном сечении верхнего стержня статора схематично изображено на рис. 8.

В табл. 3 сведен анализ расчетных данных и результатов эксперимента по определению теплового состояния верхних стержней (где ожидаются наибольшие температуры) обмотки статора турбогенератора мощностью 225 МВт с воздушным охлаждением посредством оптоволоконных датчиков, находящихся под корпусной изоляцией стержней применительно к технологии изготовления Global VPI.

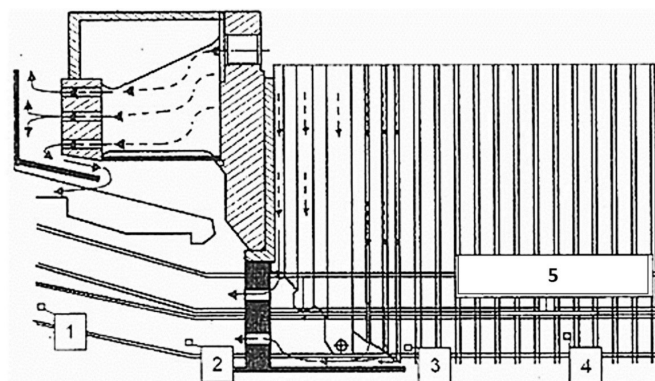


Рис. 7. Схема расположения оптоволоконных датчиков в верхнем стержне обмотки статора по длине:
1 – лобовая часть, 2 – граница пазовой и лобовой частей, 3 – вблизи скоса крайних пакетов,
4 – верхний стержень по меди 1/3 по высоте. Поз. 5 – штатное

Fig. 7. Layout of fiber-optic sensors in the upper rod of the stator winding along the length: 1 – the frontal part,
2 – the border of the slot and frontal parts, 3 – near the bevel of the extreme packages,
4 – the upper rod 1/3 in height. Pos. 5 – standard thermal resistance thermometer

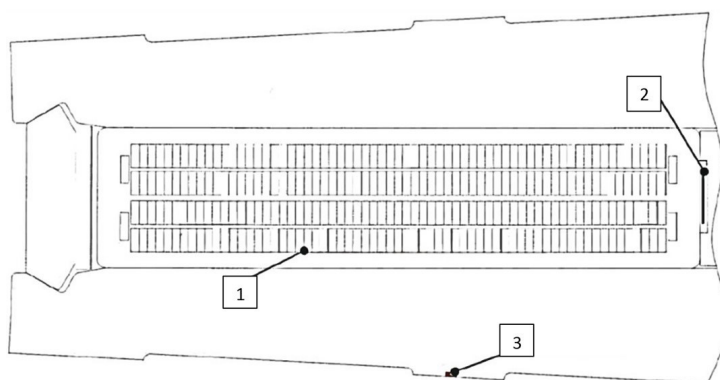


Рис. 8. Схема расположения температурных датчиков в пазовой зоне статора турбогенератора:
1 – оптоволоконный датчик, 2 – термометр сопротивления, 3 – термопара

Fig. 8. Layout of temperature sensors in the slot part of the turbine generator stator:
1 – fiber-optic sensor, 2 – standard thermal resistance thermometer, 3 – thermocouple

Таблица 3

Анализ расчетных данных и результатов эксперимента

Table 3

Analysis of calculated data and experimental results

Участок обмотки статора	Температура расчетная по отношению к замеренной, %
Верхний стержень по меди 1/3 по высоте	89,3
Вблизи скоса крайних пакетов	86,2
Граница пазовой и лобовой частей	97,7
Лобовая часть	92,2

Представленное выше расхождение расчетных и опытных данных объясняется условиями проведения натурных испытаний: с пониженным расходом в статорном контуре охлаждения, вызванным вынужденными изменениями в узлах вентиляционного тракта машины, а также расположением вентиляционных распорок в каналах зубцов основных пакетов. Дополнительно требует более детальной проработки вопрос распределения добавочных потерь в обмотке статора в зоне выхода обмотки из паза.

Результаты рассчитанного теплового состояния системы изоляции, изготовленной по технологии Resin Rich с применением системы коронозащиты на ленточных материалах, выполнены в свете модернизации системы изоляции с целью повышения надежности турбогенераторов с воздушным охлаждением по разработанной авторами конструкции системы изоляции для турбогенератора мощностью 225 МВт и сведены в табл. 4.

Таблица 4

Сравнительный анализ расчетных данных

Table 4

Comparative analysis of calculated data

Участок обмотки статора	Средний перепад температуры по толщине системы изоляции Resin Rich по отношению к расчетной Global VPI, %
Верхний стержень по меди 1/3 по высоте	109,6
Граница пазовой и лобовой частей	112,3

Как можно заметить из таблицы 4, наличие воздуха в системе бокового уплотнения стержней в пазовой части статора по причине применения гофрированных прокладок снижает эквивалентный коэффициент теплопроводности системы изоляции, находящейся на пути основного теплового потока от проводников обмотки к поверхности охлаждающих каналов, что несущественно ухудшает тепловое состояние изоляции, изготовленной по технологии Resin Rich.

Заключение

В настоящей работе произведено математическое моделирование теплового состояния обмотки статора турбогенератора с воздушным охлаждением мощностью 225 МВт для конструкции изоляции, выполненной по технологии Global VPI, и варианта конструкции для технологии Resin Rich с ленточными полупроводящими покрытиями. По результатам произведенных расчетов следует заключить:

- 1) При переходе на технологию Resin Rich для системы коронозащиты на ленточных материалах тепловое состояние обмотки статора в сравнении с технологией Global VPI ухудшается несущественно, что обусловлено увеличением перепада температуры по толщине системы изоляции вследствие наличия низкотеплопроводного воздуха в боковом уплотнении посредством гофрированной прокладки;
- 2) Уровень средних перепадов температур по толщине изоляции для технологий Resin Rich и Global VPI в лобовых частях, в зоне выхода из паза и в пазовой части обмотки статора не превышает возможной границы зоны риска появления расслоений в изоляции;
- 3) Исходя из уровня расчетных и замеренных значений температур в системе изоляции, включая наружные полупроводящие покрытия, для обеспечения её работоспособности требуется применение электроизоляционных материалов класса нагревостойкости F;
- 4) Основная возможность снижения уровня нагрева обмотки статора заключается в уменьшении перепадов температур по толщине корпусной изоляции, что наиболее эффективно осуществляется за счет повышения теплопроводности корпусной изоляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Technique for calculating the thermal conductivity coefficient of the insulation system / E.R. Mannanov, A.G. Filin, V.O. Belko // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW), 2021 IEEE NW Russia. – 2021. – pp. 1193–1196. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396705
- [2] The effect of discharge activity on the performance of corona-protective semiconducting coatings of the stator bar insulation / A.S. Reznik, I.O. Ivanov, T.M. Shikova, A.M. Andreev, E.R. Mannanov // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW), 2021 IEEE NW Russia. – 2021. – pp. 1228–1231. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396613
- [3] Андреев А.М., Дубицкий С.Д., Муравьева Т.Н., Шикова Т.М. Моделирование теплофизических свойств электрической изоляции со стохастической геометрией расчетной области // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2016. № 4. С. 89–97. DOI 10.5862/JEST.254.10
- [4] Степанов В.В., Петреня Ю.К., Андреев А.М., Костельов А.М., Маннанов Э.Р., Талалов В.А. Влияние свойств компонентов на эффективную теплопроводность полимерных композитных материалов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 4. С. 85–94. DOI: 10.18721/JPM.11408
- [5] Азизов А.Ш., Андреев А.М., Костельов А.М., Поликарпов Ю.И. Теплопроводность системы изоляции статорной обмотки мощных турбогенераторов с воздушным охлаждением // Электротехника № 3, 2009, С. 26–28.
- [6] Reine B., Di-Tomaso J., Dusserre G., Olivier P.A. Study of thermal behavior of thermoset polymer matrix filled with micro and nanoparticles // Proc. of the 15th European Conference on Composite Materials. Venice, Italy, 24–28 June, 2012. Pp. 1–9.
- [7] Шевчук Р.Э., Гаев А.В. Разработка и обоснование модели материала изоляции шин статора турбогенератора // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт прикладной математики и механики. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. С. 118–121.
- [8] Гаев А.В., Шевчук Р.Э. Расчетно-экспериментальная методика анализа и оценки вибрационного состояния токоведущих элементов электрических машин с композитной изоляцией // Надежность и безопасность энергетики. М.: «НПО Энергобезопасность», № 4 (35), 2016. С. 60–65.
- [9] Mishra D., Satapathy A. A study on thermal and dielectric characteristics of solid glass microsphere filled epoxy composites, Polymer Science Book Series, No. 1: Research Advances, Practical Applications and Educational Aspects, A. Méndez-Vilas, A. Solano (Eds.), Formatex Research Center, Badajoz, Spain (2016) 13–28.
- [10] Hong He, Renli Fu, Yanchun Han, Yuan Shen, Xiufeng Song. Thermal conductivity of ceramic particle filled polymer composites and theoretical predictions // J. Mater. Sci. 2007. Vol. 42. No. 16. Pp. 6749–6754. DOI: 10.1007/s10853-006-1480-y
- [11] Jae-Jun Park, Seong-Sik Shin, ChanYoung Yoon. Electrical and mechanical properties of epoxy micro-sized alumina composite and the effect of nano-sized alumina on those properties // Transactions on Electrical and Electronic Materials. 2015. Vol. 16. No. 5. Pp. 260–262.
- [12] Патент CN106366573 Preparation method of epoxy resin micro-nano composite insulating material. STATE GRID CORPORATION OF CHINA (SGCC)* Номер заявки: CN201610838317 20160920 Дата публикации: 2017-02-01.
- [13] Raju L. Epoxy Resin Rich System for Electrical Machines // 16th Electrical/Electronics Insulation Conference, October 1983. pp. 430–438.
- [14] Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H. Electric Insulation for Rotating Machines // Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair. New Jersey: Wiley-Interscience, 2004, pp. 137–179.
- [15] Jin H., Tsekmes I.A., Wu J., Mor A.R., Smit J. The effect of frequency on the dielectric strength of epoxy resin and epoxy resin based nanocomposites // International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Toyohashi, 2017, pp. 141–143.

[16] **Belko V.O., Petrenya Y.K., Andreev A.M., Kosteliov A.M., Roitgarz M.B.** Numerical simulation of discharge activity in hv rotating machine insulation // In the collection: Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019. 2019. P. 800–802. DOI: 10.1109/ElConRus.2019.8657272

[17] **Toshikatsu T.** Dielectric Nanocomposites with Insulating Properties // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, 2005. – P. 914–928.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МАННАНОВ Эмиль Рамилевич – инженер-конструктор 1 категории, АО «Силовые машины», без степени.

E-mail: emil-mannanov@mail.ru

ФИЛИН Алексей Григорьевич – руководитель группы, АО «Силовые машины», канд. техн. наук.

E-mail: Filin_AG@power-m.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 16.04.2021

REFERENCES

[1] Technique for calculating the thermal conductivity coefficient of the insulation system / E.R. Mannanov, A.G. Filin, V.O. Belko // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (ElConRus-NW), 2021 IEEE NW Russia. – 2021. – pp. 1193–1196, DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396705

[2] The effect of discharge activity on the performance of corona-protective semiconducting coatings of the stator bar insulation / A.S. Reznik, I.O. Ivanov, T.M. Shikova, A.M. Andreev, E.R. Mannanov // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (ElConRusNW), 2021 IEEE NW Russia. – 2021. – pp. 1228–1231, DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396613

[3] **A.M. Andreyev, S.D. Dubitskiy, T.N. Muravyeva, T.M. Shikova**, Modelirovaniye teplofizicheskikh svoystv elektricheskoy izolyatsii so stokhasticheskoy geometriyey raschetnoy oblasti // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskkiye nauki. 2016. № 4. S. 89–97. DOI: 10.5862/JEST.254.10

[4] **V.V. Stepanov, Yu.K. Petrenya, A.M. Andreyev, A.M. Kostelov, E.R. Mannanov, V.A. Talalov**, Vliyaniye svoystv komponentov na effektivnuyu teploprovodnost polimernykh kompozitnykh materialov // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskkiye nauki. 2018. T. 11. № 4. S. 85–94. DOI: 10.18721/JPM.11408

[5] **A.Sh. Azizov, A.M. Andreyev, A.M. Kostelov, Yu.I. Polikarpov**, Teploprovodnost sistemy izolyatsii statornoy obmotki moshchnykh turbogeneratorov s vozdushnym okhlazhdeniyem // Elektrotehnika № 3, 2009, S. 26–28.

[6] **B. Reine, J. Di-Tomaso, G. Dusserre, P.A. Olivier**, Study of thermal behavior of thermoset polymer matrix filled with micro and nanoparticles // Proc. of the 15th European Conference on Composite Materials. Venice, Italy, 24–28 June, 2012. Pp. 1–9.

[7] **R.E. Shevchuk, A.V. Gayev**, Razrabotka i obosnovaniye modeli materiala izolyatsii shin statora turbogeneratora // Nedelya nauki SPbPU: materialy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Institut prikladnoy matematiki i mekhaniki. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2016. Pp. 118–121.

[8] **A.V. Gayev, R.E. Shevchuk**, Raschetno-eksperimentalnaya metodika analiza i otsenki vibratsionnogo sostoyaniya tokovedushchikh elementov elektricheskikh mashin s kompozitnoy izolyatsiyey // Nadezhnost i bezopasnost energetiki. M.: «NPO Energobezopasnost», № 4 (35), 2016. Pp. 60–65.

- [9] **D. Mishra, A. Satapathy**, A study on thermal and dielectric characteristics of solid glass microsphere filled epoxy composites, Polymer Science Book Series, No. 1: Research Advances, Practical Applications and Educational Aspects, A. Méndez-Vilas, A. Solano (Eds.), Formatex Research Center, Badajoz, Spain (2016) 13–28.
- [10] **Hong He, Renli Fu, Yanchun Han, Yuan Shen, Xiufeng Song**, Thermal conductivity of ceramic particle filled polymer composites and theoretical predictions // J. Mater. Sci. 2007. Vol. 42. No. 16. Pp. 6749–6754. DOI: 10.1007/s10853-006-1480-y
- [11] **Jae-Jun Park, Seong-Sik Shin, ChanYoung Yoon**, Electrical and mechanical properties of epoxy micro-sized alumina composite and the effect of nano-sized alumina on those properties // Transactions on Electrical and Electronic Materials. 2015. Vol. 16. No. 5. Pp. 260–262.
- [12] Patent CN106366573 Preparation method of epoxy resin micro-nano composite insulating material. STATE GRID CORPORATION OF CHINA (SGCC)* Nomer zayavki: CN201610838317 20160920 Data publikatsii: 2017-02-01.
- [13] **L. Raju**, Epoxy Resin Rich System for Electrical Machines // 16th Electrical/Electronics Insulation Conference, October 1983. pp. 430–438.
- [14] **G.C. Stone, E.A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani**, Electric Insulation for Rotating Machines // Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair. New Jersey: Wiley-Interscience, 2004, pp. 137–179.
- [15] **H. Jin, I.A. Tsekmes, J. Wu, A.R. Mor, J. Smit**, The effect of frequency on the dielectric strength of epoxy resin and epoxy resin based nanocomposites // International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Toyohashi, 2017, pp. 141–143.
- [16] **V.O. Belko, Y.K. Petrenya, A.M. Andreev, A.M. Kosteliov, M.B. Roitgarz**, Numerical simulation of discharge activity in hv rotating machine insulation // In the collection: Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019. 2019. P. 800–802. DOI: 10.1109/ElConRus.2019.8657272
- [17] **T. Toshikatsu**, Dielectric Nanocomposites with Insulating Properties // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, 2005. P. 914–928.

THE AUTHORS

MANNANOV Emil R. – JSC “Power machines”.

E-mail: emil-mannanov@mail.ru

FILIN Aleksey G. – JSC “Power machines”.

E-mail: Filin_AG@power-m.ru

Received: 16.04.2021

DOI: 10.18721/JEST.27204
УДК 621.671

*Е.С. Козик, С.И. Богодухов,
В.С. Гарипов, Е.В. Свиденко*

Оренбургский государственный университет,
Оренбург, Россия

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ НА СВОЙСТВА ТВЕРДОГО СПЛАВА ВК8

Наиболее применимыми способами повышения стойкости твердых сплавов является механическая обработка, нанесение износостойких плёнок и покрытий. Наряду с этим интерес представляет другое направление улучшения эксплуатационных свойств режущего инструмента — термическая обработка. Общие недостатки указанных способов — незначительное повышение стойкости и недостаточная стабильность получаемых результатов. В связи с этим нами была проведена серия экспериментальных работ, направленных на исследование влияния высокотемпературного ионного азотирования изделий из твердых сплавов на их эксплуатационные характеристики (прочность и стойкость). Применение упрочняющих технологий обработки режущего инструмента для снижения неустойчивости его режущих свойств остается актуальной проблемой. Существуют различные методы упрочнения твердосплавного режущего инструмента, которые условно разделены на три группы: механическая обработка, нанесение покрытий и термическая обработка, причем термообработка проста в осуществлении и позволяет получать приемлемые результаты. Режимы ионного азотирования порошковых твердых сплавов существенно отличаются от режимов обработки компактных сталей. Наличие пористости интенсифицирует многие химические процессы при высокотемпературном ионном азотировании за счет значительной активности поверхности изделий из порошковых материалов и повышает чувствительность к окислению и обезуглероживанию во время нагрева. Цель данной работы состояла в определении влияния температуры ионного азотирования (изменение температур) на прочность, на изгиб и стойкость образцов твердых сплавов.

Ключевые слова: твердые сплавы марки ВК8, высокотемпературное ионное азотирование, твердость, прочность, структура.

Ссылка при цитировании:

Козик Е.С., Богодухов С.И., Гарипов В.С., Свиденко Е.В. Влияние режимов высокотемпературного ионного азотирования на свойства твердого сплава ВК8 // *Материаловедение. Энергетика*. 2021. Т. 27, № 2. С. 50—61. DOI: 10.18721/JEST.27204

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*E.S. Kozik, S.I. Bogodukhov,
V.S. Garipov, E.V. Svidenko*

Orenburg State University,
Orenburg, Russia

INFLUENCE OF HIGH-TEMPERATURE ION NITRIDING REGIMES ON THE PROPERTIES OF THE VK8 HARD ALLOY

The most applicable methods for increasing the resistance of hard alloys are mechanical treatment, application of wear-resistant films and coatings. Along with this, heat treatment is another promising direction of improving the operational properties of cutting tools. The general disadvantages of these methods are a slight increase in durability and insufficient stability of the results obtained. In this regard, we carried out a series of experimental tests aimed at studying the effect of heat treatment of hard alloy products on their performance characteristics (hardness and wear resistance). The use of hardening technologies for processing cutting tools to reduce the instability of its cutting properties remains an urgent problem. There are various methods of hardening carbide cutting tools, which are conventionally divided into three groups: machining, coating and heat treatment, while heat treatment is easy to implement and allows obtaining acceptable results. The modes of heat treatment of powdered hard alloys differ significantly from the modes of processing compact steels. The presence of porosity intensifies many chemical processes during heat treatment due to the significant surface activity of products made of powder materials and increases the sensitivity to oxidation and decarburization during heating for quenching. The purpose of this work was to determine the influence of the effect of heat treatment (change in heating temperatures before quenching and tempering) on the hardness, strength, bending and wear resistance of hard alloy samples.

Keywords: hard alloys of the VK8 brand, high-temperature ion nitriding, hardness, strength, structure.

Citation:

E.S. Kozik, S.I. Bogodukhov, V.S. Garipov, E.V. Svidenko, Influence of high-temperature ion nitriding regimes on the properties of the VK8 hard alloy, Materials Science. Power Engineering, 27 (02) (2021) 50–61, DOI: 10.18721/JEST.27204

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Твердые сплавы широко и эффективно применяются в металлообработке. Определено, что твердосплавным инструментом снимается около 70% всей стружки при металлорежущей обработке. Однако при интенсивном изменении в металлообработке (появление новых труднообрабатываемых материалов, применение станочных комплексов многоцелевых станков с ЧПУ) повышает требования к работоспособности и надежности твердосплавного инструмента [1, 2]. Поэтому необходимо не только создавать новые твердые сплавы с заданными свойствами, но и улучшать качество наиболее распространенных твердых сплавов. Из анализа большого количества наиболее применяемых методов повышения стойкости твердосплавного инструмента можно выделить как поверхностную термообработку, так и различные диффузионные и другие химико-термические способы обработки, нанесение покрытий, наплавка и другие способы [3–5]. В машиностроении все больше находят применение инструментальные материалы с тонкими покрытиями. Материал для покрытий: карбиды, нитриды, карбонитриды, бориды, силициды тугоплавких металлов [7–10]. В ранее проведенных работах были изучены процессы нанесения покрытий на двухкарбидные твердые сплавы при низких температурах [6]. Однако весь перечень применяемых методов не дает ответа на вопросы желаемого упрочнения и повышения износостойкости однокарбидных твердых сплавов.

Целью работы является изучение влияния температурных режимов ионного азотирования на эксплуатационные характеристики однокарбидных твердых сплавов.

Методология проведения работы заключается в выявлении закономерностей влияния температурных интервалов ионного азотирования на толщину, химический состав, микроструктуру поверхностного слоя однокарбидного твердого сплава и эксплуатационные свойства.

Материалы и методы

Объектом данного исследования являлись изделия из твердых сплавов марки VK8 (неперетачиваемые пластины с отверстием и без него и штабики размером 5×5×35 мм).



Рис. 1. Штабик из твердого сплава ВК8 в исходном состоянии
Fig. 1. Stab made of VK8 hard alloy in its original state

Высокотемпературное ионное азотирование твердых сплавов марки ВК8 проводили в вакуумной печи НГВ6/6-1 при температуре от 800 °С до 1000 °С (вакуум 6,665 Па), в среде диссоциированного аммиака, длительность выдержки при заданной температуре от 1 до 2 часов. Сущность процесса заключается в том, что в герметичном контейнере создается разряженная инертная атмосфера [16]. Штабик от 15 до 30 мин, разогревается от 800 °С до 1000 °С за счет высоких скоростей ионов азота в зоне высокой напряженности, соударяясь с деталью (катодом), внедряются в ее поверхность. Катод (штабик) — это отрицательный полюс источника помещали в контейнер, установленный в печи и присоединённый к положительному полюсу источника постоянного напряжения (анод). В качестве исходных материалов при проведении исследований использовали твердые сплавы группы ВК (ВК8) в виде неперетачиваемых пластин с отверстием и без него и штабиков размером 5×5×35 мм (рис. 1), состав и основные физико-механические свойства сплавов на основе WC-Co (по ГОСТ 3882-74) приведены в табл. 1.

Таблица 1
Химический состав, предел прочности при изгибе, плотность и твердость сплава на основе WC-Co
Table 1
Chemical composition, flexural strength, density and hardness of WC-Co based alloy

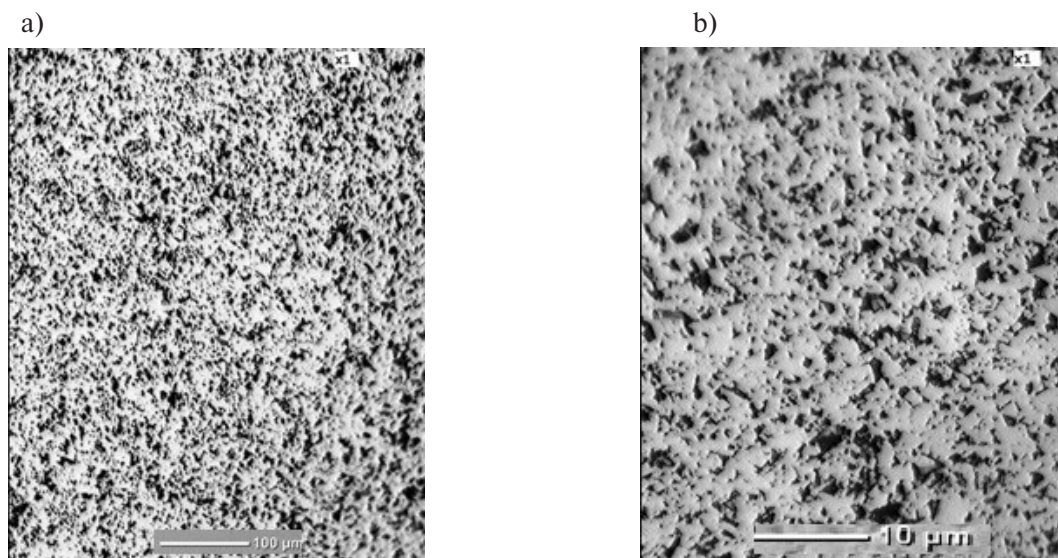
Марка сплава	Химический состав, %		Предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$, Н/мм ² не менее	Плотность, γ , г/см ³	Твердость, HV ₃₀ , Н/мм ²
	WC	Co			
ВК8	92	8	1617 ± 44,1	14,6	1500,0

Структуру исходных материалов и после ионного азотирования насыщения изучали на микровизоре μ Viso-MET и на растровом электронном микроскопе Jeol JCM-6000 при увеличении 1000-3000 крат.

Микроструктура твердого сплава ВК8 представлена на рис. 2 и состоит из двух фаз: угловатых светлых зерен фазы WC, окаймленных темной фазой (твердого раствора карбида WC в кобальте).

Нагружение образцов на изгиб проводили с помощью приспособления, изготовленного с учетом ГОСТ 9391-80 и машины универсальной разрывной ИР 5047-50-10, имеющей тензометрический силоизмеритель позволяющий определять действующую нагрузку с погрешностью ±1 Н.

Схемы нагружения применяли стандартные по ГОСТ 10632-2014. Результаты фиксировались многоканальной тензометрической станцией ММТС-64.01. Предел погрешности измерений этой системы не превышает 0,1 %.

Рис. 2. Микроструктура сплава на основе WC-Co, а $\times 500$, б $\times 1000$ Fig. 2. Microstructure of WC-Co based alloy, а $\times 500$, б $\times 1000$

Анализ химического состава проводили на растровом электронном микроскопе JeolJSM- 6000.

После заточки проводили испытание пластин после высокотемпературного ионного азотирования на стойкость. Испытания резанием проводили на токарно-винторезном станке 16K20 торцевым точением. Частота вращения шпинделя, n , составляла 800 об/мин, подача, s , 0,39 мм/об.

Проведен рентгеноструктурный анализ на рентгеновском дифрактометре ДРОН-4-07.

Результаты

Для измерения относительной продольной деформации использовались проволоочные тензодатчики на плёночной или бумажной основе с базой 5 или 10 мм.

Выбор приклеиваемых тензодатчиков в качестве основного вида преобразователей относительной деформации в электрический сигнал обуславливается рядом их положительных свойств: высокой точностью преобразования деформации в изменение сопротивления; практически неограниченным частотным диапазоном; малыми габаритными размерами и весом, не оказывающими влияния на объект исследования, дистанционность измерения [11].

Прогиб определяется по формуле

$$y_D = \frac{F \cdot l^3}{48E \cdot J_x}. \quad (1)$$

Если взять значение прогиба [11, 12] на заданном интервале нагрузки на прямой, то можно из формулы (1) получить значение модуля упругости без применения средств тензометрии, например, подсчитано для ВК8 (2 режим)

$$0,000035 = \frac{500 \cdot 0,035^3 \cdot 12}{48E \cdot 0,004^4},$$

где $J_x = \frac{bh^3}{12}$, м;

l – пролет, 0,03 м;

F – выбранный интервал нагрузки, 500 Н;

y_D – прогиб при выбранном интервале (изменении) нагрузки, взятый из графика, мм.

Проводим прямую по методу наименьших квадратов для каждой кривой. Выбираем интервал изменения нагрузки на 500 Н, в диапазоне, где кривая наиболее близка к прямой, в начальном ее этапе (то есть там, где нагрузка наиболее близка к минимальной) и по графику определяем прогиб. В качестве примера определение прогиба на рисунке приведено для 1 кривой. Эти данные подставляем в формулу 1 и получаем из нее значение модуля упругости.

При анализе данного рис. 3 видно, что ионное азотирование при высоких температурах снижает модуль упругости на 23,4 % материала ВК8.

Так как в области упругой деформации модуль упругости зависит от напряжения, то его снижение на 23,4 % показывает на положительную динамику влияния высокотемпературного ионного азотирования на снижение напряженного состояния твердого сплава ВК8.

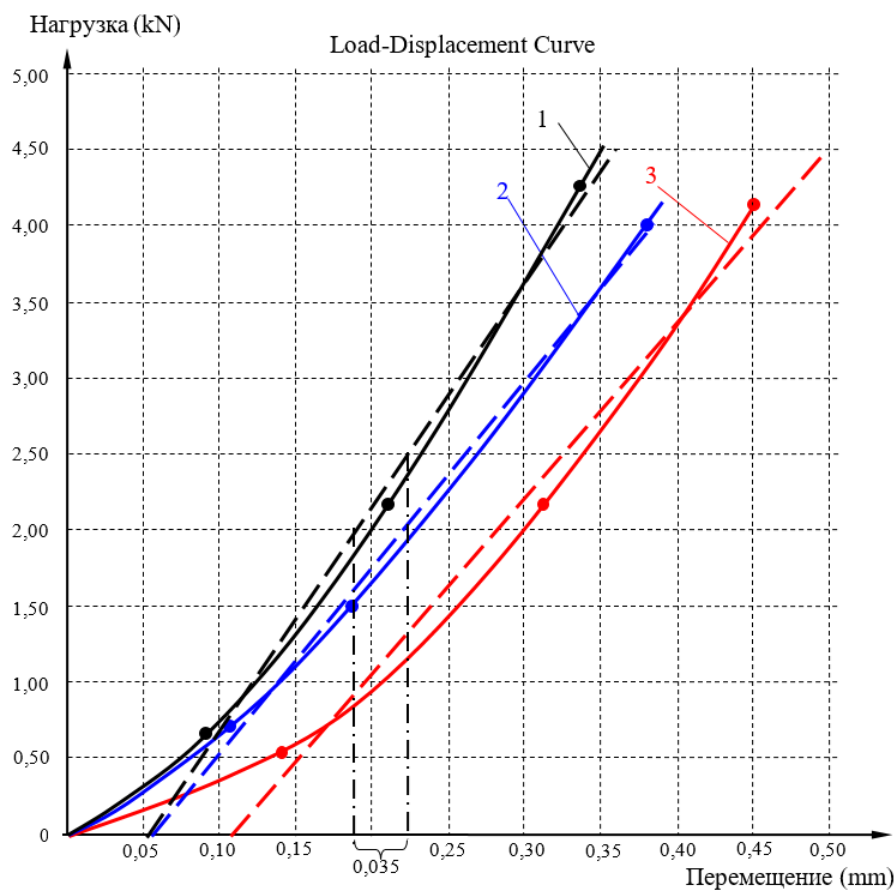


Рис. 3. Зависимость поперечной нагрузки от перемещения для сплава на основе WC-Co после различных температур ионного азотирования

Пунктирной линией показана прямая после обработки результатов эксперимента по способу наименьших квадратов.

1 – твердый сплав ВК8 (1), исходный, $E = 598$ ГПа. 2 – твердый сплав ВК8 (2), ионное азотирование при $T_{\text{нагр}} = 1000$ °С, в течении 2 ч, $E = 465$ ГПа; 3 – твердый сплав ВК8 (3), ионное азотирование при $T_{\text{нагр}} = 900$ °С, в течении 2 ч, $E = 458$ ГПа

Fig. 3. Dependence of lateral load on displacement for WC-Co based alloy after different temperatures of ion nitriding

The dotted line shows the straight line after processing the results of the experiment using the least squares method.

1 – hard alloy VK8 (1), initial, $E = 598$ GPa. 2 – hard alloy VK8 (2), ion nitriding at $T_{\text{naqr}} = 1000$ S, for 2 h, $E = 465$ GPa; 3-hard alloy VK8 (3), ion nitriding at $T_{\text{naqr}} = 900$ S, for 2 h, $E = 458$ GPa

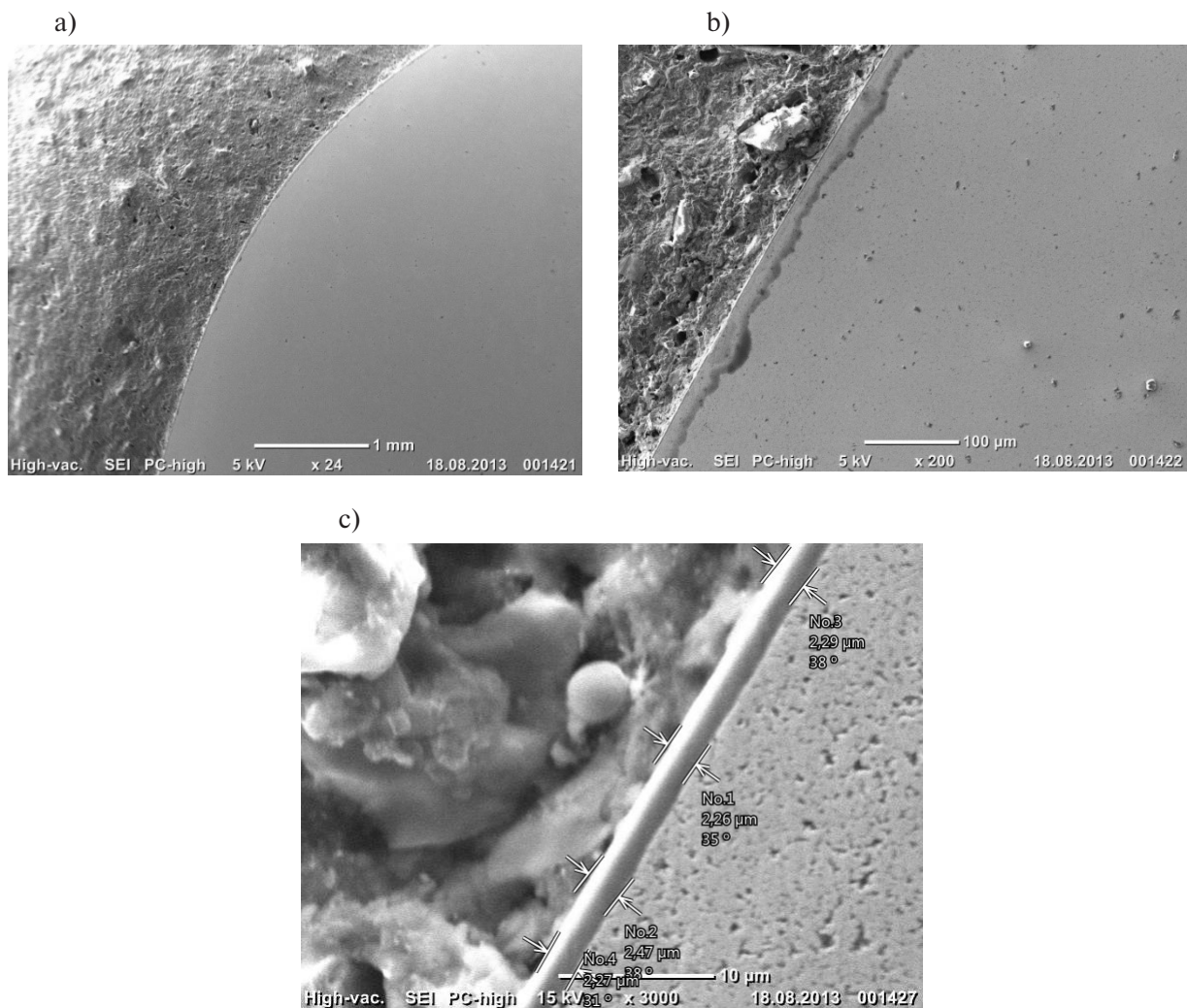


Рис. 4. Микроструктура для сплава на основе WC-Co после ионного азотирования, а – при температуре 900 °C; б – 1000 °C; в – толщина слоя после ионного азотирования при температуре 900 °C

Fig. 4. Microstructure for an alloy based on WC-Co after ionic nitriding, а – at a temperature of 900 °C; б – 1000 °C; в – layer thickness after ion nitriding at a temperature of 900 °C

Микроструктура твердого сплава ВК8 и толщина поверхностного слоя, после высокотемпературного ионного азотирования показана на рис. 4. Толщина слоя составляет от 2,23 до 2,5 мкм и мало зависит от повышения температуры с 900 °C до 1000 °C.

На рис. 5 представлен результат анализа химического состава в 5 точках от поверхности по глубине, в твердом сплаве ВК8 после ионного азотирования (ХТО) при температуре 900 °C. Прослеживается уменьшение содержания азота вглубь образца.

Результаты испытаний показаны на рис. 6. Анализ результатов стойкостных испытаний показывает, что ионное азотирование по указанным выше режимам приводит к изменению эксплуатационных характеристик твердосплавного инструмента с покрытиями. Наибольшую стойкость, то есть наименьший износ, показывают инструменты после ионного азотирования по режиму: ионное азотирование при 1000 °C (№ 5). Твердость пластины после данной обработки составила 1650HV₃₀. Стойкость инструмента с пластинами, после ионного азотирования по другим режимам, несколько ниже.

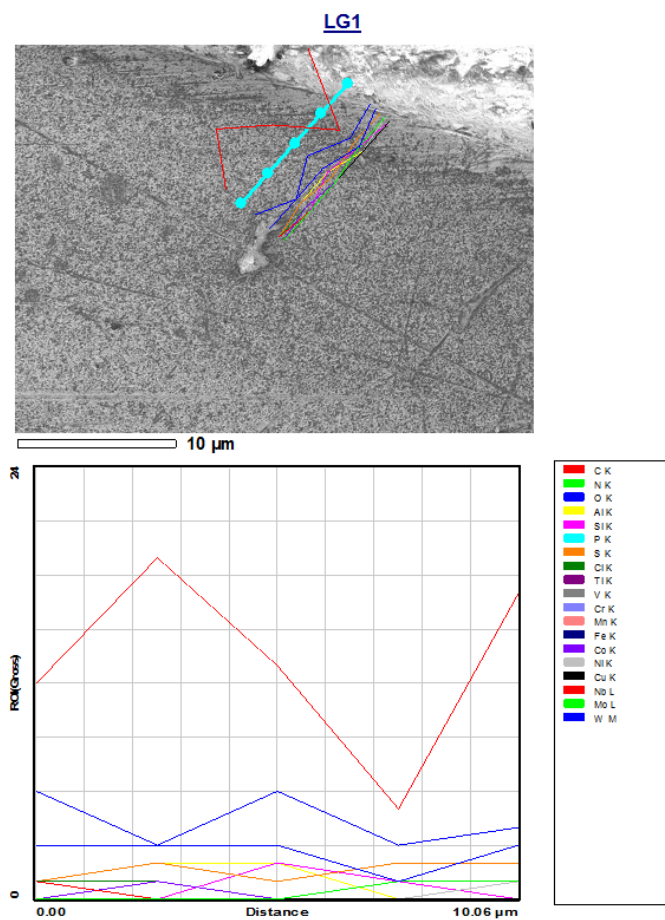
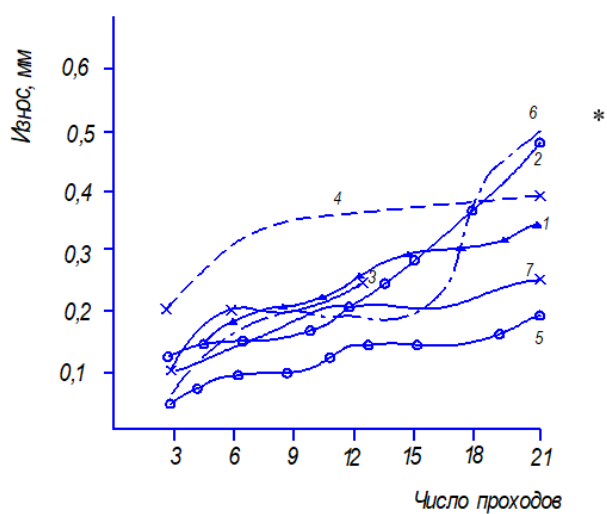


Рис. 5. Ориентировочный химический состав сплавов на основе WC-Co после ХТО при температуре 900 °С
Fig. 5. Approximate chemical composition of WC-Co based alloys after HTT at 900 °C



* — цифры на кривых соответствуют режимам обработки (1-3 — ионное азотирование при температуре 900 °С;
4 — исходный образец; 5-7 — ионное азотирование при 1000 °С).

Рис. 6. Стойкостные испытания твердосплавных пластин ВК8
Fig. 6. Resistance tests of hard-alloy plates VK8

Обсуждение

Стойкость после ионного азотирования инструмента связана с изменением структуры твердого сплава. Фазовый состав, размер параметров решетки, размер блоков, напряжения I рода определяли после высокотемпературного ионного азотирования. Результаты рентгеноструктурного анализа показывают, что фазовый состав твердого сплава остается неизменным [13–16]. Период элементарной ячейки Co в сплаве ВК8, рассчитанный по линии (222) равен 0,3462 нм. Однако установлено, что технологические режимы влияют на фактор интенсивности ряда линий. Отношение интегральных интенсивностей с индексами $\left(\frac{001}{101}\right), \left(\frac{002}{120}\right)$ [12] для рассчитанных отношений составляет:

– ионное азотирование при температуре 900 °С

$$\frac{I(001)}{I(101)} = 0,137; \frac{I(002)}{I(110)} = 0,356$$

– ионное азотирование при температуре 1000 °С

$$\frac{I(001)}{I(101)} = 0,158; \frac{I(002)}{I(110)} = 0,490$$

– стандартная пластинка (без ионного азотирования)

$$\frac{I(001)}{I(101)} = 0,214; \frac{I(002)}{I(110)} = 0,524$$

По данным вычисления рентгенограммы для WC и Co были построены графики зависимости параметров структуры (рис. 7).

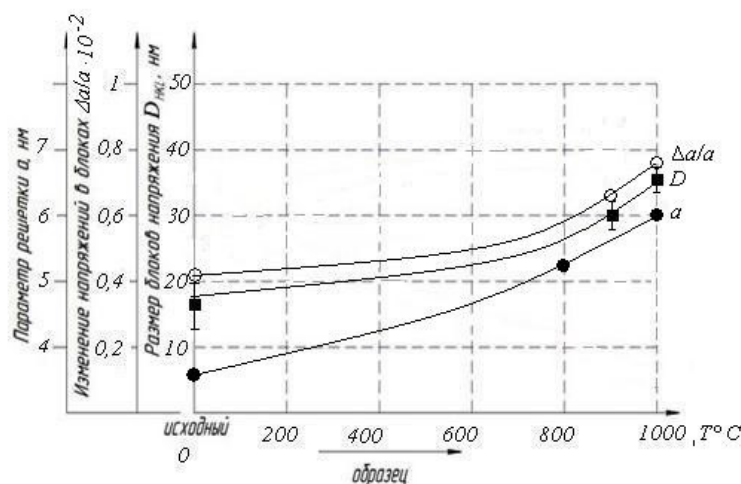


Рис. 7. Изменение параметров решетки, блоков и напряжений в блоках сплавов на основе WC-Co в зависимости от температуры ионного азотирования

Fig. 7. Changes in lattice parameters, blocks and stresses in blocks of alloys based on WC-Co depending on the temperature of ion nitriding

Изучение изменений напряженного состояния в поверхностных слоях твердосплавных изделий проводили на основе рентгеноструктурного анализа методом аппроксимации.

На рис. 7 показано увеличение периода «а» решетки карбида вольфрама и микроискажений «ε» и уменьшение размеров « D_{HKL} » блоков.

На основании, проведенной работы можно сделать предварительное заключение, что высокотемпературное ионное азотирование от 900 °С до 1000 °С обеспечивает повышение режущих свойств твердого сплава ВК8 от 1,5 до 3 раз. Например, износ исходной пластины по передней грани после 5 проходов составляет 0,2-0,25 мм, а после ионного азотирования, 2 ч, $T_{\text{хто}} = 900$ °С износ пластины по передней грани составляет 0,08. Повышение температуры ионного азотирования до 1000 °С уменьшает износ после 5 проходов до 0,02 мм.

Выводы

1. Изучена микроструктура твердого сплава ВК8 и толщина диффузионного слоя после высокотемпературного ионного азотирования. Толщина слоя составляет от 2,23 до 2,5 мкм и мало зависит от повышения температуры с 900 °С до 1000 °С.

2. По методу наименьших квадратов для каждой кривой испытания твердых сплавов на деформацию после высокотемпературного ионного азотирования выбираем интервал изменения нагрузки и определяем прогиб, затем подсчитываем значение модуля упругости. При анализе выявляем, что ионное азотирование от 900 °С до 1000 °С снижает модуль упругости на 23,4 % материала ВК8 по сравнению с исходным.

3. На стойкость твердых сплавов группы ВК влияет фазовый состав поверхностных слоев после высокотемпературного ионного азотирования от 900 °С до 1000 °С, а также его структурные характеристики — период решетки фазовых составляющих, размеры блоков и микроискажения. Увеличение периода решетки карбида вольфрама и микроискажений происходит одновременно с уменьшением размера блоков.

4. На основании, проведенной работы можно сделать предварительное заключение, что высокотемпературное ионное азотирование от 900 °С до 1000 °С, обеспечивает повышение режущих свойств твердого сплава ВК8 от 1,5 до 3 раз. Например, износ исходной пластины по передней грани после 5 проходов составляет 0,2-0,25 мм, а после ионного азотирования, 2 ч, $T_{\text{хто}} = 900$ °С износ пластины по передней грани составляет 0,08. Повышение температуры ионного азотирования до 1000 °С уменьшает износ после 5 проходов до 0,02 мм.

Требуется дальнейшее проведение исследований на стойкость, многократное испытание на износ и резание до потери режущих свойств, которое проводится в данное время на ООО "Технология", г. Оренбург.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Zhang Li., Wang Yuan-Jie., Yu Xian-wang., Chen Shu., Xiong Xiang-Jin. Crack propagation characteristic and toughness of functionally graded WC—CO cemented carbide. Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 26 (4) (2018) 295—300.
- [2] Colovcan V.T. Some analytical consequences of experiment data on properties of WC—Co hard metals. IntJ. Refract. Met. HardMater. 26 (4) (2018) 301—305.
- [3] Богодухов С.И. Высокотемпературное ионное азотирование твердосплавных неперетачиваемых пластин марки Т15К6 / С.И. Богодухов, Е.С. Козик, Е.В. Свиденко // Металловедение и термическая обработка. 4 (2019) 30—39.
- [4] Patsera E.I., Levashov E.A., Kurbatkina V.V., Kovalev D.Yu. Production of ultra-high temperature carbide (Ta,Zr)C by self-propagating high-temperature synthesis of mechanically activated mixtures. Ceram. Int. 41(7) (2015) 8885—8893.

- [5] Chebykin E.P., Stepanova O.G., Goldberg E.L., Gorbarenko S.A., Panov V.S. Geochemical multielement signatures of glacial and interglacial facies of the okhotsk sea deepwater sediments during the past 350 kyr: A response to global climate changes at the orbital and millennial scales. *Paleoceanography*. 30 (3) (2015) 303–316.
- [6] Свиденко Е.В. Повышение эксплуатационных свойств титановольфрамовых твердых сплавов с использованием технологии высокоэнергетической обработки: диссертация ... кандидата технических наук: 05.16.01 / Свиденко Е.В. — Оренбург, (2016) 174.
- [7] Способ упрочнения твердых сплавов / Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В.; патентообладатель Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Оренбургский государственный университет". - № 2018136804 заявл. 18.10.2018 опубл. 01.07.2019, 19 (2019).
- [8] Способ упрочнения ультрадисперсного твердого сплава азотированием / С.И. Богодухов, Е.С. Козик, Е.В. Свиденко; патентообладатель Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Оренбургский гос. ун-т". - № 2019116142 заявл. 27.05.2019 опубл. 12.11.2020, 19 (2020).
- [9] Hell J., Chirtoc M., Eisenmenger-Sittner C., Hutter H., Kornfeind N., Kijamnajsuk P., Kitzmantel M., Neubauer E., Zellhofer K. Characterisation of sputter deposited niobium and boron interlayer in the copper–diamond system. *Surf. Coat. Technol.* 208 (2018) 24–31.
- [10] Qiu W.Q., Liu Z.W., He L.X., Zeng D.C., Mai Y.-W. Improved interfacial adhesion between diamond film and copper substrate using a Cu(Cr)–diamond composite interlayer. *Mater. Lett.* 81 (2018) 155–157.
- [11] Panov V.S., Zaitsev A.A. Developmental tendencies of technology of ultradispersed and nanosized WC–CO hard alloys alloyed with tantalum carbide. *12. Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 56 (4) (2015) 477–485.
- [12] Zhang Z., Chen D.L. Contribution of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites. *Mater. Sci. Eng. A*. 483 (2018) 148–152.
- [13] Zaitsev A.A., Kurbatkina V.V., Levashov E.A. Features of the effect of nanodispersed additives on the sintering process and properties of powdered cobalt alloys. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 49 (2) (2018) 120–126.
- [14] Zaitsev A.A., Kurbatkina V.V., Levashov E.A. Features of the influence of nanodispersed additions on the process of and properties of the Fe–Co–Cu–Sn sintered alloy. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 49 (5) (2018) 414–419.
- [15] Panov V.S. Nanostructured sintered WC–CO hard metals (review) *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 53(11) (2018) 643–654.
- [16] Zaitsev A.A., Sidorenko D.A., Levashov E.A., Kurbatkina V.V., Andreev V.A., Rupasov S.I., Sevast'yanov P.V. Diamond tools in metal bonds dispersion-strengthened with nanosized particles for cutting highly reinforced concrete. *J. Superhard Mater.* 34 (6) (2010) 423–431.
- [17] Zaitsev A.A., Sidorenko D.A., Levashov E.A., Kurbatkina V.V., Rupasov S.I., Andreev V.A., Sevast'yanov P.V. Designing and application of a dispersion-reinforced binder based on Cu–Ni–Fe–Sn alloy for cutting tools made of ultrahard materials. *J. Superhard Mater.* 34 (4) (2018) 270–280.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОЗИК Елена Станиславовна — доцент, Оренбургский государственный университет, канд. техн. наук.

E-mail: ele57670823@yandex.ru

БОГОДУХОВ Станислав Иванович — профессор, Оренбургский государственный университет, д-р техн. наук.

E-mail: ogu@mailgate.ru

ГАРИПОВ Владимир Станиславович — доцент, Оренбургский государственный университет, канд. техн. наук.

E-mail: vladimir.garipov@mail.ru

СВИДЕНКО Екатерина Валерьевна — старший преподаватель, Оренбургский государственный университет, канд. техн. наук.
E-mail: tzvetkova.katia2016@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 20.04.2021

REFERENCES

- [1] **Li. Zhang, Yuan-Jie. Wang, Xian- wang. Yu, Shu. Chen, Xiang-Jin. Xiong**, Crack propagation characteristic and toughness of functionally graded WC–CO cemented carbide. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 26 (4) (2018) 295–300.
- [2] **V.T. Colovcan**, Some analytical consequences of experiment data on properties of WC–Co hard metals. *Int J. Refract. Met. Hard Mater.* 26 (4) (2018) 301–305.
- [3] **S.I. Bogodukhov**, Vysokotemperaturnoye ionnoye azotirovaniye tverdosplavnykh neperetachivayemykh plastin marki T15K6 / S.I. Bogodukhov, Ye.S. Kozik, Ye.V. Svidenko // *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka.* 4 (2019) 30–39.
- [4] **E.I. Patsera, E.A. Levashov, V.V. Kurbatkina, D.Yu. Kovalev**, Production of ultra-high temperature carbide (Ta,Zr)C by self-propagating high-temperature synthesis of mechanically activated mixtures. *Ceram. Int.* 41(7) (2015) 8885–8893.
- [5] **E.P. Chebykin, O.G. Stepanova, E.L. Goldberg, S.A. Gorbarenko, V.S.Panov**, Geochemical multielement signatures of glacial and interglacialfacies of the okhotsk sea deepwater sediments during the past 350 kyr: A response to global climate changes at the orbital and millennial scales. *Paleoceanography.* 30 (3) (2015) 303–316.
- [6] **Ye.V. Svidenko**, Povysheniye ekspluatatsionnykh svoystv titanovolframovykh tverdykh splavov s ispolzovaniyem tekhnologii vysokoenergeticheskoy obrabotki : dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk : 05.16.01 / Svidenko Ye.V. — Orenburg,(2016) 174.
- [7] Sposob uprochneniya tverdykh splavov / Bogodukhov S. I., Kozik Ye. S., Svidenko Ye. V.; patentoobladatel Feder. gos. byudzh. obrazov. uchrezhdeniye vyssh. obrazovaniya "Orenburgskiy gosudarstvennyy universitet".- № 2018136804 zayavl. 18.10.2018 opubl. 01.07.2019, 19 (2019).
- [8] Sposob uprochneniya ultradispersnogo tverdogo splava azotirovaniyem / S.I. Bogodukhov, Ye.S. Kozik, Ye.V. Svidenko; patentoobladatel Feder. gos. byudzh. obrazov. uchrezhdeniye vyssh. obrazovaniya "Orenburgskiy gos. un-t".- № 2019116142zayavl. 27.05.2019 opubl. 12.11.2020,19 (2020).
- [9] **J. Hell, M. Chirtoc, C. Eisenmenger-Sittner, H. Hutter, N. Kornfeind, P. Kijamnajsuk, M. Kitzmantel, E. Neubauer, K. Zellhofer**, Characterisation of sputter deposited niobium and boron interlayer in the copper–diamond system. *Surf. Coat. Technol.* 208 (2018) 24–31.
- [10] **W.Q. Qiu, Z.W. Liu, L.X. He, D.C. Zeng, Y.-W. Mai**, Improved interfacial adhesion between diamond film and copper substrate using a Cu(Cr)–diamond composite interlayer. *Mater. Lett.* 81 (2018) 155–157.
- [11] **V.S. Panov, A.A. Zaitsev**, Developmrntal tendenxies of technology of ultradispersed and nanosized WC–CO hard alloys alloved with tantalum carbide. *12. Russian Journal of Non-Ferrous Metals.* 56 (4) (2015) 477–485.
- [12] **Z. Zhang, D.L. Chen**, Contribution of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites. *Mater. Sci. Eng. A.* 483(2018) 148–152.
- [13] **A.A. Zaitsev, V.V. Kurbatkina, E.A. Levashov**, Features of the effect of nanodispersed additives on the sintering process and properties of powdered cobalt alloys. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 49 (2) (2018) 120–126.
- [14] **A.A. Zaitsev, V.V. Kurbatkina, E.A. Levashov**, Features of the influence of nanodispersed additions on the process of and properties of the Fe–Co–Cu–Sn sintered alloy. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 49(5) (2018) 414–419.

[15] **V.S. Panov**, Nanostructured sintered WC–CO hard metals (review) Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 53 (11) (2018) 643–654.

[16] **A.A. Zaitsev, D.A. Sidorenko, E.A. Levashov, V.V. Kurbatkina, V.A. Andreev, S.I. Rupasov, P.V. Sevast'yanov**, Diamond tools in metal bonds dispersion-strengthened with nanosized particles for cutting highly reinforced concrete. J. Superhard Mater. 34 (6) (2010) 423–431.

[17] **A.A. Zaitsev, D.A. Sidorenko, E.A. Levashov, V.V. Kurbatkina, Rupasov S.I., V.A. Andreev, P.V. Sevast'yanov**, Designing and application of a dispersion-reinforced binder based on Su–Ni–Fe–Sn alloy for cutting tools made of ultrahard materials. J. Superhard Mater. 34 (4) (2018) 270–280.

THE AUTHORS

KOZIK Elena S. – *Orenburg State University.*

E-mail: ele57670823@yandex.ru

BOGODUKHOV Stanislav I. – *Orenburg State University.*

E-mail: ogu@mailgate.ru

GARIPOV Vladimir S. – *Orenburg State University.*

E-mail: vladimir.garipov@mail.ru

SVIDENKO Ekaterina V. – *Orenburg State University.*

E-mail: tzvetkova.katia2016@yandex.ru

Received: 20.04.2021

DOI: 10.18721/JEST.27205

УДК 66.091.3

Ю.З. Васильева, А.Я. Пак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия

СИНТЕЗ КАРБИДА МОЛИБДЕНА В САМОЭКРАНИРУЮЩЕЙСЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАЗМЕ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований, показывающие возможность реализации безвакуумного электродугового синтеза катализаторов на основе карбидов молибдена для реакции электрохимического разложения воды. Метод позволяет вести синтез карбидных фаз при горении дугового разряда постоянного тока в открытой воздушной среде за счет достижения эффекта самоэкранирования реакционного объема. По данным рентгеновской дифрактометрии в продукте синтеза идентифицированы две фазы карбидов молибдена: Mo_2C и $\text{Mo}_{1.2}\text{C}_{0.8}$, фаза исходного молибдена, а также фаза графита. В серии экспериментов удалось реализовать управление фазовым составом продукта синтеза путем изменения расстояния между исходными реагентами и зоной инициирования и горения дугового разряда. Оцененная каталитическая активность синтезированных образцов близка к активности катализаторов на основе карбидов молибдена, полученных другими методами.

Ключевые слова: карбид молибдена, электродуговая плазма, безвакуумный метод, электрокатализатор, получение водорода.

Ссылка при цитировании:

Васильева Ю.З., Пак А.Я. Синтез карбида молибдена в самоэкранирующей электродуговой плазме // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 2. С. 62–72. DOI: 10.18721/JEST.27205

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Yu.Z. Vassilyeva, A.Ya. Pak

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

SYNTHESIS OF MOLYBDENUM CARBIDE IN SELF-SHIELDING ELECTRIC ARC PLASMA

The paper presents the results of vacuum-free electric arc synthesis of catalysts based on molybdenum carbides, which can be used for hydrogen production by electrochemical water splitting. The synthesis of carbide phases is possible due to self-shielding effect of the reaction volume during DC arcing in open-air environment. According to X-ray diffractometry data, there are two phases of molybdenum carbides in the synthesized product: Mo_2C and $\text{Mo}_{1.2}\text{C}_{0.8}$, the phase of initial molybdenum, and the phase of graphite were identified. In a series of experiments, the authors were able to control the phase composition of the synthesis product by changing the distance between the initial reagents and the zone of initiation and combustion of the arc discharge. The estimated catalytic activity of the synthesized samples is close to the activity of catalysts based on molybdenum carbides obtained by other methods.

Keywords: molybdenum carbide, electric arc plasma, vacuum-free method, electrocatalyst, hydrogen production.

Citation:

Yu.Z. Vassilyeva, A.Ya. Pak, Synthesis of molybdenum carbide in self-shielding electric arc plasma, Materials Science. Power Engineering, 27 (02) (2021) 62–72, DOI: 10.18721/JEST.27205

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Одной из глобальных проблем человечества является переход на следующий уровень развития энергетических технологий. В этой связи в последние несколько десятилетий ведутся разработки в области возобновляемой энергетики. Одним из наиболее важных и технологически сложных направлений следует считать освоение и повсеместное применение водорода как экологически чистого энергоносителя [1]. Соответственно, развитие методов и устройств получения водорода является одной из глобальных приоритетных задач. В настоящее время широко распространённой технологией получения водорода является конверсия углеводородного топлива, к основным недостаткам которой можно отнести использование невозобновляемых ископаемых видов топлива и выделение большого количества парниковых газов [2]. Известным перспективным подходом является получение высокочистого водорода методом электрохимического разложения воды. При этом для ускорения реакции применяют различные катализаторы, преимущественно, на основе металлов платиновой группы (рутений, родий, палладий, осмий, иридий, платина). Однако высокая стоимость, особый порядок обращения, а также относительно небольшие запасы ограничивают их повсеместное использование [3]. Исследователями по всему миру предпринято множество попыток поиска составов альтернативных катализаторов, в частности, на основе карбидов переходных металлов [4–6]. Карбиды молибдена демонстрируют стабильность в кислотных и щелочных средах и относительно высокую активность в реакции выделения водорода (HER) благодаря схожей платиноподобной электронной структуре [7].

Существует множество методов получения карбидов молибдена, например, карботермическое восстановление оксида молибдена, пиролиз, механосинтез, лазерная абляция и др. [8–11]. Большинство методов требуют дорогостоящих и/или редких прекурсоров, сложных относительно опасных процедур, громоздкого оборудования, значительных затрат времени и энергии, что ограничивает их широкое практическое применение. Важным направлением в этой области является использование электроразрядной плазмы ввиду широких возможностей достижения высоких температур и скоростей реакций. В последние годы активно развивается метод электродугового синтеза ультрадисперсных материалов с использованием в качестве рабочей среды атмосферного или синтетического воздуха [12–13]. Существенным преимуществом метода является осуществление процесса получения заданного материала при нормальном давлении в открытой воздушной атмосфере, что позволяет значительно упростить конструкцию экспериментальной установки за счет отказа от баллонов с инертными газами, вакуумных насосов, газовых линий, запорной арматуры, а также герметичной камеры. Данный метод реализуется за счет создания автономной газовой среды в процессе эмиссии газов CO и CO₂, ограничивающих поступление атмосферного кислорода в реакционную зону.

Принципиальная возможность реализации синтеза катализатора на основе ультрадисперсного карбида молибдена в графитоподобной допированной азотом углеродной матрице безвакуумным электродуговым методом показана в работе [14]. Значительными недостатками изложенного метода [14] являются практически неконтролируемое загрязнение продукта графитом в следствие процесса эрозии анода, а также отсутствие возможности регулирования теплового режима обработки, что не позволяет контролировать фазовый состав.

В настоящей работе изложены результаты экспериментальных исследований, направленных на осуществление попытки синтеза катализатора для получения водорода из воды безвакуумным электродуговым методом и управления фазовым составом путем регулирования теплового воздействия на смесь исходных реагентов.

Методы и материалы

Экспериментальные исследования были выполнены на плазмохимическом электродуговом реакторе совмещенного типа [15]. В качестве электродов были использованы графитовые стержни круглого сечения, расположенные соосно горизонтально внутри графитового стакана, являющегося реакционной камерой. В качестве источника углерода использовали углеродный порошок «Сибунит» (производитель: ФГБОУН Институт проблем переработки углеводородов СО РАН), источником молибдена служил порошок, состоящий из кубической модификации металлического молибдена (производитель: ФГАОУ ВО НИ ТПУ; 10-100 нм; 99,95 %); также в смесь добавляли меламин $C_3H_6N_6$ (производитель: ЗАО «НПФ Технохим»; 40-60 мкм; 99,8 %) в качестве источника азота (что может положительно сказываться на свойствах получаемого катализатора за счет образования углерод-азотной графитоподобной матрицы [16]). Смесь исходных компонентов предварительно смешивали в шаровой мельнице в массовом соотношении $C : Mo : C_3H_6N_6 = 2 : 1 : 1$ и затем помещали на дно графитового стакана в количестве 0,5 г. В серии экспериментов варьировали расстояние от дна графитового стакана, покрытого смесью исходных реагентов, до зоны инициирования и горения дугового разряда в пределах от 10 мм до 20 мм с шагом 5 мм ($H = 10$ мм, $H = 15$ мм, $H = 20$ мм). Плазма дугового разряда осуществляла нагрев исходного сырья для реализации фазовых переходов в целях синтеза катализатора на основе карбида молибдена. Для создания дугового разряда источник постоянного тока настраивали на силу тока 200 А. Время поддержания дугового разряда было выбрано $10 \pm 0,1$ с, что обеспечивает количество подведенной энергии, достаточное для формирования карбида молибдена в рассматриваемой системе [14]. Вольтамперные характеристики дугового разряда фиксировались цифровым осциллографом марки DS1052E посредством датчика Холла, а также омического делителя напряжения. Температуру внешней стенки графитового стакана измеряли пирометром марки BENEZECH GM1850. Анализ состава генерирующейся газовой среды проводили с использованием газоанализатора ТЕСТ-1 (Бонэр, г. Новосибирск).

После проведения синтеза полученный порошок собирали с внутренней поверхности графитового стакана, измельчали в агатовой ступке и анализировали различными методами. Исследование структуры и фазового состава полученных образцов было выполнено с помощью рентгеновского дифрактометра марки Shimadzu-XRD 7000 (Япония, $CuK\alpha$ -излучение). Анализ элементного состава, морфологии и размера частиц был осуществлен на растровом электронном микроскопе марки Tescan-Vega 3 SBU (Чехия) с приставкой энергодисперсионного анализа Oxford X-Max-50, а также на просвечивающем электронном микроскопе марки Jeol JEM-2100F. Присутствие азота в продукте определяли методом элементного микроанализа с использованием CHNS анализатора Thermo Flash EA 2000 (Италия).

Электрохимические исследования проводились с использованием типичной электролитической трехэлектродной ячейки и рабочей станции марки CHI 604E. В качестве электрода сравнения выступал насыщенный каломельный электрод (SCE), противоэлектродом являлась платиновая нить, рабочим электродом – цилиндрический стеклоуглеродный электрод (СУ) L-типа. Исследования каталитической активности материалов в реакции выделения водорода проводили в растворе 0,5 М H_2SO_4 ($pH = 0,3$) после его предварительной очистки в потоке газа N_2 99,999% в течение 30 минут. Для этого регистрировались вольтамперные характеристики при скорости развертки потенциала 5 (или 1) мВ/с. Плотность тока нормировалась к геометрической площади рабочего электрода (диаметр – 3 мм²). Для подготовки рабочего элект-

трода предварительно 10 мг образца и 20 мкл раствора нафiona (5 масс. %) диспергировали в 980 мкл этанола с помощью обработки ультразвуком не менее 30 минут для образования гомогенного раствора. Затем 3 мкл раствора наносили на рабочую поверхность СУ электрода, после чего подвергали сушке при нормальных условиях окружающей среды. Оценка потенциалов в данной работе проводилась относительно обратимого водородного электрода (RHE) на основе уравнения Нернста: $E_{vs RHE} = E_{vs SCE} + E_{SCE}^{\circ} + 0,059 \text{ pH}$. $E_{SCE}^{\circ} = 0,241 \text{ В}$.

Результаты и их обсуждение

Согласно полученным типичным осциллограммам тока и напряжения количество выделившейся энергии в среднем составило $60 \pm 5 \text{ кДж}$. С учетом фактического времени синтеза ($\sim 10 \text{ с}$) величина средней мощности составила $\sim 6,5 \text{ кВт}$. По литературным данным, в зоне привязки дуги температура плазмы может составлять от $4\,000^{\circ}\text{C}$ до $10\,000^{\circ}\text{C}$ в зависимости от силы тока источника питания [17–18]. Ввиду известного градиента температурного поля по мере удаления от зоны привязки дуги температура существенно снижается: на расстоянии $H = 10 \text{ мм}$ температура поверхности материала, нагреваемого плазмой, составляет $\sim 1750^{\circ}\text{C} - 2100^{\circ}\text{C}$, на расстоянии $H = 15 \text{ мм}$ температура составляет $\sim 1200^{\circ}\text{C} - 1300^{\circ}\text{C}$, на расстоянии $H = 20 \text{ мм}$ – до 1000°C [17–18]. В соответствии с известной диаграммой состояний Мо-С [19] достигаемые в серии экспериментов параметры соответствуют условиям синтеза карбидов молибдена.

На рис. 1 представлены данные газового анализа формирующейся в процессе синтеза автономной самоэкранирующейся среды и фотограмма процесса синтеза. Как видно (рис. 1а-в), в начальный момент времени содержание кислорода составляет $\sim 21 \text{ об.}\%$, что близко с нормальной концентрации кислорода в атмосферном воздухе; затем после зажигания дугового разряда концентрация кислорода снижается до $\sim 2,2 \text{ об.}\%$. В результате воздействия высоких температур в зоне горения разряда кислород воздуха вступает в реакцию с углеродом, образуя угарный газ, который доокисляется до углекислого газа, согласно уравнениям (1), (2).



Максимальная концентрация СО достигает $\sim 21 \text{ об.}\%$, $\text{CO}_2 \sim 7 \text{ об.}\%$. В результате термического разложения меламина происходит образование водорода (до $\sim 5,2 \text{ об.}\%$); также следует отметить, что в образующемся газе присутствует небольшое содержание метана ($\text{CH}_4 < 0,2 \text{ об.}\%$) и оксида азота ($\text{NO}_2 < 0,035 \text{ об.}\%$). Таким образом, в процессе синтеза при горении дугового разряда формируется неокислительная среда, что позволяет полагать возможным синтез карбидов.

По данным типичных рентгеновских дифрактограмм (рис. 2а) видно, что в образцах присутствуют фазы карбида молибдена, а именно, орторомбическая фаза Mo_2C (ICDD № 04-016-3695) и гексагональная фаза $\text{Mo}_{1,2}\text{C}_{0,8}$ (ICDD № 04-006-2272). В сравнении с проведенными ранее исследованиями [14] в настоящей работе удалось добиться доминирования обозначенных выше фаз карбидов молибдена, что видно по относительной интенсивности дифракционных максимумов. Также на дифрактограммах идентифицируются рефлексы исходных компонентов, соответствующих фазе графита (ICDD № 04-015-2407) и кубической фазе молибдена (ICDD № 01-077-8340). Как было отмечено ранее, в процессе безвакуумного электродугового синтеза в полости графитового стакана образуется экранирующая среда, состоящая из газов СО и CO_2 и подавляющая окисление получаемого продукта. Тем не менее, было обнаружено, что продукты синтеза, полученные при расстоянии $H = 10 \text{ мм}$ (от места расположения исходной смеси до зоны горения дугового разряда, рис. 2а, картина 1) характеризуются малым содержанием фазы оксида молибдена Mo_4O_{11} (ICDD № 04-012-4450), о чем свидетельствуют следы на углах $22,54 \text{ град}$, $24,02 \text{ град}$

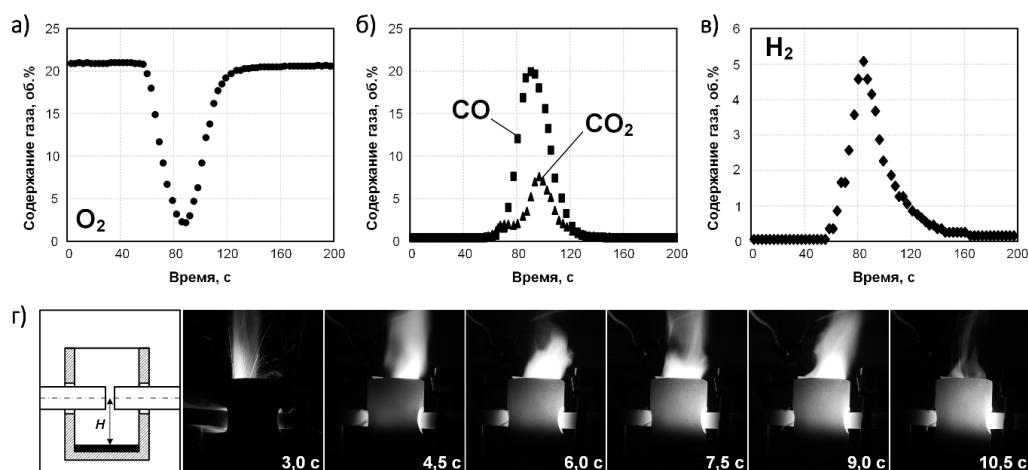


Рис. 1. Данные газового анализа образующейся атмосферы процесса синтеза (а-в) и фотограмма процесса синтеза (г)

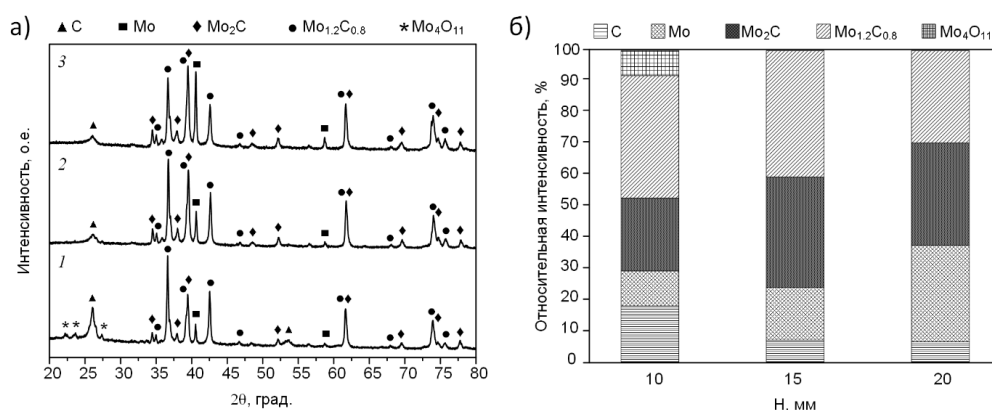


Рис. 2. Типичные результаты рентгенофазового анализа полученных образцов: (а) картины рентгеновской дифракции, (б) соотношение интенсивностей главных дифракционных максимумов идентифицированных фаз

и 27,75 град. Вероятно это связано попаданием кислорода воздуха в зону синтеза из отверстий в боковых стенках графитового стакана; при этом с увеличением расстояния от дна тигля с исходными реагентами до продольной оси электродов (то есть до оси отверстий в боковых стенках катода) на картинах рентгеновской дифракции следов оксидов молибдена не обнаружено. Эти данные позволяют сделать вывод о возможности достижения эффекта экранирования реакционного объема от кислорода воздуха в ходе горения дугового разряда в открытой воздушной среде при определенной геометрии электродной системы.

Как можно заметить из рис. 2б, с увеличением расстояния до зоны горения дугового разряда увеличивается интенсивность максимумов исходного молибдена в продукте, вероятно, ввиду снижения температуры в реакционной зоне на дне графитового стакана. Установлено, что, чем ближе дуговой разряд горит к исходной смеси, тем выше интенсивность главного максимума графита. Вероятно, это связано с интенсификацией процесса массообмена между анодом и другими элементами разрядного контура, в данном случае, с графитовым стаканом при уменьшении расстояния между ними.

На основании проведенного рентгенофазового анализа можно утверждать, что оптимальным расстоянием от зоны горения дугового разряда до места расположения исходной смеси в рассма-

триваемой системе следует считать $H = 15$ мм (рис. 2а, картина 2); т.к. при этом обеспечивается достижение эффекта экранирования реакционного объема от кислорода воздуха при наибольшем выходе искоемых фаз карбидов молибдена.

На рис. 3 представлены полученные типичные электронно-микроскопические снимки для образцов с $H = 10$ мм (рис. 3а,б) и для образцов с большей высотой (рис. 3в,г). Использование детектора обратно-рассеянных электронов (рис. 3б,г) позволяет рассмотреть структуру образца в режиме фазового контраста, так наиболее светлые частицы соответствуют более «тяжелым» элементам — молибдену, темные частицы соответствуют более легким элементам, в данном случае — углероду. Можно заметить, что большую часть составляют частицы карбида молибдена. Для рассмотрения топографии поверхности были сделаны снимки с использованием детектора вторичных электронов (рис. 3а,в). Как видно, значительную часть выделенной фракции составляют скопления новообразованных частиц карбида молибдена размером порядка 10 мкм; наиболее крупные частицы с размерностью 25–30 мкм соответствуют графиту. Методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии был оценен элементный состав синтезированных образцов. Установлено, что образцу, рентгеновская дифрактограмма которого представлена на рис. 2а ($H = 10$ мм, картина 1) соответствует содержание в среднем ~53,0 масс.% молибдена, ~36,7 масс.% углерода, а также ~6,3 масс.% кислорода и ~4,0 масс.% различных примесей. Для образцов, полученных при увеличенном расстоянии между зоной горения дуги и исходным сырьем ($H = 15$ мм, $H = 20$ мм) основными химическими элементами являются молибден (~44,2 %) и углерод (~49,8 %), при этом содержание кислорода снижается до ~4,0 %, прочих примесей — до ~2,0 %, соответственно. Во всех образцах методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии азот не идентифицирован в значительных количествах, но присутствует на уровне следов. По данным элементного CHNS микроанализа удалось установить присутствие азота в синтезированных образцах до ~1 масс.%. Полученные результаты растровой электронной микроскопии подтверждают данные рентгеновской дифрактометрии.

По снимкам просвечивающей электронной микроскопии, изображенным на рис. 4, видно, что материал представляет собой углеродную матрицу с погруженными в нее частицами, вероятно, молибдена и/или карбида молибдена размерами преимущественно до ~100 нм. На электронном снимке высокого разрешения (рис. 4в) можно заметить частицы типа «ядро-оболочка». Ядро частиц характеризуется более высокой плотностью, чем оболочка, судя по картине дифракции электронов в ядре наблюдается двойникование структуры. При этом, определенные межплоскостные расстояния: $\sim 2,60 \pm 0,02$ Å и $\sim 2,28 \pm 0,02$ Å соответствуют структуре карбида молибдена Mo_2C ; оболочка частицы состоит из упорядоченных слоев с межплоскостным расстоянием $\sim 3,6 \pm 0,02$ Å, что соответствует графитоподобной структуре. Увеличенное межплоскостное расстояние относительно стандартного для фазы графита ($\sim 3,4$ Å) может быть вызвано допированием структуры графита атомами азота [20]. В среднем количество слоев в оболочке составляет ~10–12 шт. На картине электронной дифракции (рис. 4б) можно заметить два размытых кольца с межплоскостными расстояниями $\sim 3,6$ Å и $\sim 2,14$ Å, близких к графитоподобной углеродной структуре. Также идентифицируются отдельные рефлексы, соответствующие межплоскостным расстояниям $\sim 2,6$ Å; $\sim 1,83$ Å; $\sim 1,65$ Å; $\sim 1,35$ Å; $\sim 1,22$ Å и $\sim 1,1$ Å, принадлежащие фазе Mo_2C . Полученные результаты согласуются с данными рентгеновской дифрактометрии. Подобная структура материала описана в работе [21], в которой наночастицы карбида молибдена в углеродной матрице получены методом механической активации в инертной среде.

Для оценки возможности применения полученных материалов в качестве электрокатализаторов в реакции выделения водорода были проведены электрохимические исследования с использованием типичной трехэлектродной ячейки в 0,5 М растворе H_2SO_4 . На рис. 5а представлены снятые вольтамперограммы. Измеренное начальное перенапряжение для электрода №1 ($H = 10$ мм, картина дифракции 1, рис. 2а) составляет $\eta_1 = 287$ мВ, при этом для достижения плот-

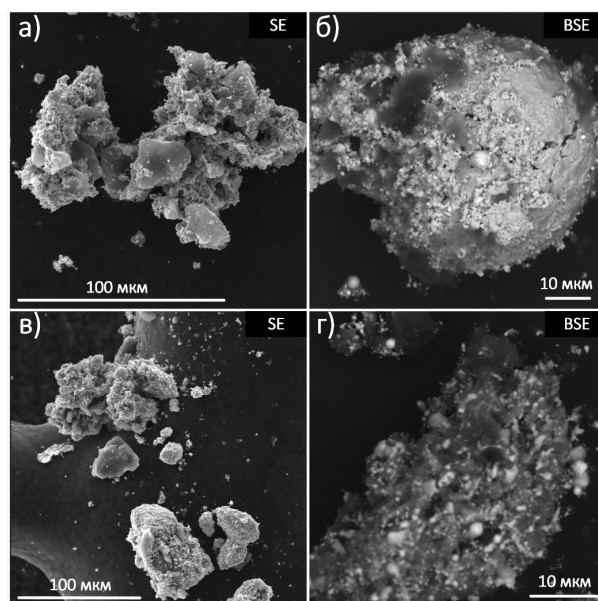


Рис. 3. Типичные снимки растровой электронной микроскопии в режиме обратно-рассеянных и вторичных электронов образцов, синтезированных при $H = 10$ мм (а, б); $H = 15$ мм и $H = 20$ мм (в, г)

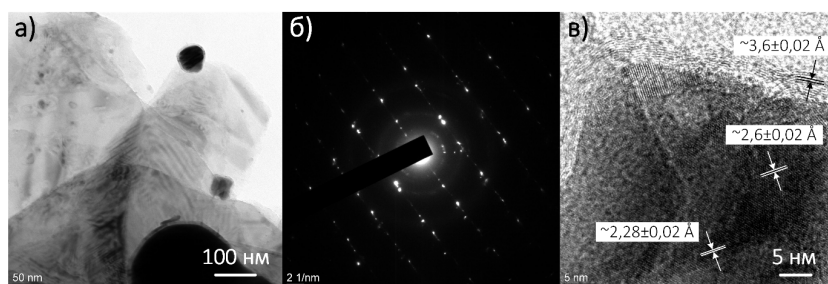


Рис. 4. Снимки просвечивающей электронной микроскопии (а, в) и картина электронной дифракции на выделенной области (б)

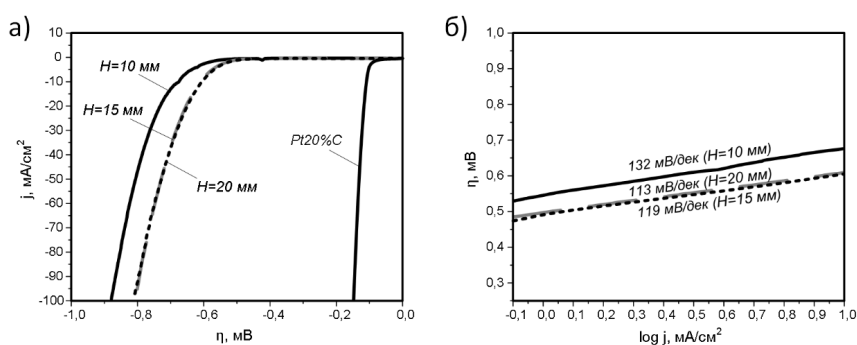


Рис. 5. Вольтамперограммы (а) и графики Тафеля (б)

ности тока 10 mA/cm^2 требуется перенапряжение $\eta_{10} = 416 \text{ мВ}$. Среди всех образцов электрод № 3 ($H = 20 \text{ мм}$, картина дифракции 3 на рис. 2а) демонстрирует лучшую активность в реакции HER: $\eta_1 = 232 \text{ мВ}$, $\eta_{10} = 345 \text{ мВ}$. При этом полученные значения перенапряжения для электрода № 2

($H = 15$ мм, картина дифракции 2, рис. 2а) практически совпадают с аналогичными значениями для электрода № 3 и составляют $\eta_1 = 238$ мВ, $\eta_{10} = 349$ мВ. Как известно, стандартному катализатору Pt(20%)/C для достижения плотности тока 10 мА/см^2 требуется перенапряжение менее 100 мВ. Также известно, что электрод, выполненный полностью из углерода, демонстрирует очень низкую активность в реакции HER. Это указывает на то, что каталитические характеристики синтезированных образцов связаны с присутствием карбида молибдена в составе катализатора. Полученные экспериментальные данные соответствуют активности других материалов на основе карбидов молибдена, описанных в литературе, например, в работах [22–23].

С помощью уравнения Тафеля, показывающего связь между скоростью химической реакции и перенапряжением, можно описать электрохимическую кинетику процесса на поверхности катализатора. На рис. 5б представлены тафелевские зависимости электродов. Значение наклона Тафеля для стандартного электрода на основе Pt(20%)/C составляет около 30 мВ/дек [24]. Аналогичные значения для исследуемых электродов № 1, 2, 3 составили: 132 мВ/дек, 113 мВ/дек и 119 мВ/дек, соответственно. Таким образом, электрод, изготовленный из синтезированного порошка с наибольшим содержанием фаз карбидов молибдена (дифрактограмма 2, рис. 2а), демонстрирует наилучшие показатели в реакции выделения водорода из воды.

Заключение

По совокупности представленных данных можно сделать вывод о возможности получения катализатора на основе карбида молибдена безвакуумным электродуговым методом для реакции электрохимического разложения воды. В отличие от проведенных ранее экспериментальных исследований в рамках заявленного метода удалось обеспечить доминирование в порошковом продукте синтеза фаз карбида молибдена. В работе достигнуты условия формирования автономной газовой среды, состоящей преимущественно из газов CO, CO₂ и H₂, предотвращающей окисление продуктов синтеза кислородом воздуха. Определены геометрические параметры системы электродов, при которых в пределах точности метода рентгеновской дифрактометрии, в продуктах синтеза отсутствует фаза оксида молибдена. Каталитическая активность полученных образцов ниже, чем у стандартного катализатора на основе платины и углерода, но сравнима с активностью других катализаторов на основе карбидов молибдена, полученных различными методами. Таким образом, предлагаемый безвакуумный электродуговой метод пригоден для синтеза катализаторов на основе карбидов молибдена, предназначенных для получения водорода из воды.

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90088.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Thomas J.M., Edwards P.P., Dobson P.J., Owen G.P. Decarbonising energy: The developing international activity in hydrogen technologies and fuel cells. *Journal of Energy Chemistry*, 51 (2020) 405–415.
- [2] Holladay J.D., Hu J., King D.L., Wang Y. An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today*, 139 (2009) 244–260.
- [3] Qu K., Y. Zheng, Y. Jiao, et al. Polydopamine-Inspired, Dual Heteroatom-Doped Carbon Nanotubes for Highly Efficient Overall Water Splitting. *Advanced Energy Materials*, 7 (2017) 1602068.
- [4] Morales-Guio C.G., Stern L.A., Hu X. Nanostructured hydrotreating catalysts for electrochemical hydrogen evolution. *Chemical Society Review*, 43 (2014) 6555–6569.
- [5] Kim J.K., Park S.K., Kang S.K. Structure-optimized CoP-carbon nanotube composite microspheres synthesized by spray pyrolysis for hydrogen evolution reaction. *Journal of Alloys and Compounds* 763 (2018) 652–661.

- [6] **Mahmood N., Yao Y., Zhang J.W., et al.** Electrocatalysts for Hydrogen Evolution in Alkaline Electrolytes: Mechanisms, Challenges, and Prospective Solutions. *Advanced Science*, 5 (2018) 1700464.
- [7] **Wan C., Regmi Y.N., Leonard B.M.** Multiple phases of molybdenum carbide as electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction. *Angewandte Chemie*, 53 (2014) 6407–6410.
- [8] **Madrigal-Camacho M., Vilchis-Nestor A.R., Camacho-Lopez M., Camacho-Lopez M.A.** Synthesis of MoC@Graphite NPs by short and ultra-short pulses laser ablation in toluene under N₂ atmosphere. *Diamond and Related Materials* 82 (2018) 63–69.
- [9] **Yosida Y., Oguro I.** Superconductivity in a high-temperature cubic phase of MoC_x encapsulated in the multiwall carbon nanocages. *Physica C*, 442 (2006) 97–100.
- [10] **Vasilevich A.V., Baklanova O.N., Lavrenov A.V.** Molybdenum Carbides: Synthesis and Application in Catalysis. *Solid Fuel Chemistry*, 54 (6) (2020) 354–361.
- [11] **Wang S., Wang J., Zhu M., et al.** Molybdenum carbide-modified nitrogen-doped carbon vesicle encapsulating nickel nanoparticles: A highly efficient, low-cost catalyst for hydrogen evolution reaction. *Journal of the American Chemical Society*, 137 (2015) 15753–15759.
- [12] **Berkmans A.J., Jagannatham M., Reddy D.R., et al.** Synthesis of thin bundled single walled carbon nanotubes and nanohorn hybrids by arc discharge technique in open air atmosphere. *Diamond and Related Materials*, 55 (2015) 12–15.
- [13] **Zhao J., Wei L., Yang Z., et al.** Continuous and low-cost synthesis of high-quality multi-walled carbon nanotubes by arc discharge in air. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 44 (7-8) (2012) 1639–1643.
- [14] **Vassilyeva Y.Z., Butenko D.S., Li S., et al.** Synthesis of molybdenum carbide catalyst by DC arc plasma in ambient air for hydrogen evolution. *Materials Chemistry and Physics*, 254 (2020) 123509.
- [15] **Мартынов Р.С., Пак А.Я., Мамонтов Г. Я.** Устройство для получения порошка на основе карбида бора. Пат. 2700596 Российская Федерация, МПК С 01 В 32/991, В 22 F 9/14; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО НИ ТПУ. № 2019111857, заявл. 19.04.19; опубл. 18.09.19, Бюл. № 26. 8 с.: 2 ил.
- [16] **Xia K., Guo J., Xuan C., Huang T., Deng Z., Chen L., Wang D.** Ultrafine molybdenum carbide nanoparticles supported on nitrogen doped carbon nanosheets for hydrogen evolution reaction. *Chinese Chemical Letters*, 30 (2019) 192–196.
- [17] **Shimizu T., Tashiro S., Tanaka M., Inaba T.** Simulating effects of gas flow on arc plasma to anode heat transfer during incinerator ash treatment. *Thin Solid Films*, 518 (2009) 952–956.
- [18] **Wang X., Luo Y., Chi L., Fan D.** Numerical investigation of transport phenomena of arc plasma in argon-oxygen gas mixture. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 154 (2020) 119708.
- [19] **Guardia-Valenzuela J., Bertarelli A., Carra F., Mariani N., Bizzaro S., Arenal R.** Development and properties of high thermal conductivity molybdenum carbide – graphite composites. *Carbon*, 135 (2018) 72–84.
- [20] **Tang Y., Wang X., Chen J., et al.** PVP-assisted synthesis of g-C₃N₄-derived N-doped graphene with tunable interplanar spacing as high-performance lithium/sodium ions battery anodes. *Carbon*, 174 (2021) pp. 98–109.
- [21] **Василевич А.В., Бакланова О.Н., Голинский Д.В., Тренихин М.В., Лавренев А.В.** Механохимический синтез высокодисперсных карбидсодержащих катализаторов для гидроконверсии тяжелых нефтяных остатков // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. 2018. № 4. С. 564–574.
- [22] **Wang W., Liu C., Zhou D., et al.** In-situ synthesis of coupled molybdenum carbide and molybdenum nitride as electrocatalyst for hydrogen evolution reaction. *Journal of Alloys and Compounds*, 792 (2019) 230–239.
- [23] **Regmi Y.N., Wan C., Duffee K.D., Leonard B.M.** Nanocrystalline Mo₂C as a Bifunctional Water Splitting Electrocatalyst. *ChemCatChem*, 7 (2015) 3911–3915.
- [24] **Wang J., Xia H., Peng Z., et al.** Graphene Porous Foam Loaded with Molybdenum Carbide Nanoparticulate Electrocatalyst for Effective Hydrogen Generation. *ChemSusChem*, 9 (2016) 855–862.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВАСИЛЬЕВА Юлия Захаровна — инженер-исследователь, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, без степени.

E-mail: yzv1@tpu.ru

ПАК Александр Яковлевич — научный сотрудник, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, канд. техн. наук.

E-mail: ayapak@tpu.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 22.04.2021

REFERENCES

- [1] J.M. Thomas, P.P. Edwards, P.J. Dobson, G.P. Owen, Decarbonising energy: The developing international activity in hydrogen technologies and fuel cells. *Journal of Energy Chemistry*, 51 (2020) 405–415.
- [2] J.D. Holladay, J. Hu, D.L. King, Y. Wang, An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today*, 139 (2009) 244–260.
- [3] K. Qu, Y. Zheng, Y. Jiao, et al. Polydopamine-Inspired, Dual Heteroatom-Doped Carbon Nanotubes for Highly Efficient Overall Water Splitting. *Advanced Energy Materials*, 7 (2017) 1602068.
- [4] C.G. Morales-Guio, L.A. Stern, X. Hu, Nanostructured hydrotreating catalysts for electrochemical hydrogen evolution. *Chemical Society Review*, 43 (2014) 6555–6569.
- [5] J.K. Kim, S.K. Park, Y.C. Kang, Structure-optimized CoP-carbon nanotube composite microspheres synthesized by spray pyrolysis for hydrogen evolution reaction. *Journal of Alloys and Compounds* 763 (2018) 652–661.
- [6] N. Mahmood, Y. Yao, J.W. Zhang, et al. Electrocatalysts for Hydrogen Evolution in Alkaline Electrolytes: Mechanisms, Challenges, and Prospective Solutions. *Advanced Science*, 5 (2018) 1700464.
- [7] C. Wan, Y.N. Regmi, B.M. Leonard, Multiple phases of molybdenum carbide as electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction. *Angewandte Chemie*, 53 (2014) 6407–6410.
- [8] M. Madrigal-Camacho, A.R. Vilchis-Nestor, M. Camacho-Lopez, M.A. Camacho-Lopez, Synthesis of MoC@Graphite NPs by short and ultra-short pulses laser ablation in toluene under N₂ atmosphere. *Diamond and Related Materials* 82 (2018) 63–69.
- [9] Y. Yosida, I. Oguro, Superconductivity in a high-temperature cubic phase of MoC_x encapsulated in the multiwall carbon nanocages. *Physica C*, 442 (2006) 97–100.
- [10] A.V. Vasilevich, O.N. Baklanova, A.V. Lavrenov, Molybdenum Carbides: Synthesis and Application in Catalysis. *Solid Fuel Chemistry*, 54 (6) (2020) 354–361.
- [11] S. Wang, J. Wang, M. Zhu, et al. Molybdenum carbide-modified nitrogen-doped carbon vesicle encapsulating nickel nanoparticles: A highly efficient, low-cost catalyst for hydrogen evolution reaction. *Journal of the American Chemical Society*, 137 (2015) 15753–15759.
- [12] A.J. Berkman, M. Jagannatham, D.R. Reddy, et al. Synthesis of thin bundled single walled carbon nanotubes and nanohorn hybrids by arc discharge technique in open air atmosphere. *Diamond and Related Materials*, 55 (2015) 12–15.
- [13] J. Zhao, L. Wei, Z. Yang, et al. Continuous and low-cost synthesis of high-quality multi-walled carbon nanotubes by arc discharge in air. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 44 (7-8) (2012) 1639–1643.
- [14] Y.Z. Vassilyeva, D.S. Butenko, S. Li, et al. Synthesis of molybdenum carbide catalyst by DC arc plasma in ambient air for hydrogen evolution. *Materials Chemistry and Physics*, 254 (2020) 123509.

- [15] **R.S. Martynov, A.Ya. Pak, G.Ya. Mamontov**, Ustrojstvo dlya polucheniya poroshka na osnove karbi-da bora [Device for production of powder based on boron carbide], Russian Federation Patent, No. 2700596 (2019).
- [16] **K. Xia, J. Guo, C. Xuan, T. Huang, Z. Deng., L. Chen, D. Wang**, Ultrafine molybdenum carbide nano-particles supported on nitrogen doped carbon nanosheets for hydrogen evolution reaction. *Chinese Chemical Letters*, 30 (2019) 192–196.
- [17] **T. Shimizu, S. Tashiro, M. Tanaka, T. Inaba**, Simulating effects of gas flow on arc plasma to anode heat transfer during incinerator ash treatment. *Thin Solid Films*, 518 (2009) 952–956.
- [18] **X. Wang, Y. Luo, L. Chi, D. Fan**, Numerical investigation of transport phenomena of arc plasma in ar-gon-oxygen gas mixture. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 154 (2020) 119708.
- [19] **J. Guardia-Valenzuela, A. Bertarelli, F. Carra, N. Mariani, S. Bizzaro, R. Arenal**, Development and properties of high thermal conductivity molybdenum carbide – graphite composites. *Carbon*, 135 (2018) 72–84.
- [20] **Y. Tang, X. Wang, J. Chen, et al.** PVP-assisted synthesis of g-C₃N₄-derived N-doped graphene with tunable interplanar spacing as high-performance lithium/sodium ions battery anodes. *Carbon*, 174 (2021) pp. 98–109.
- [21] **A.V. Vasilevich, O.N. Baklanova, D.V. Golinskij, M.V. Trenihin, A.V. Lavrenov**, Mechanochemical Syn-thesis of Fine Carbide-Containing Catalysts for Hydroconversion of Heavy Oil Residues. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*, 4 (2018) 564–574.
- [22] **W. Wang, C. Liu, D. Zhou, et al.** In-situ synthesis of coupled molybdenum carbide and molybdenum ni-tride as electrocatalyst for hydrogen evolution reaction. *Journal of Alloys and Compounds*, 792 (2019) 230–239.
- [23] **Y.N. Regmi, C. Wan, K.D. Duffee, B.M. Leonard**, Nanocrystalline Mo₂C as a Bifunctional Water Split-ting Electrocatalyst. *ChemCatChem*, 7 (2015) 3911–3915.
- [24] **J. Wang, H. Xia, Z. Peng, et al.** Graphene Porous Foam Loaded with Molybdenum Carbide Nanopar-ticulate Electrocatalyst for Effective Hydrogen Generation. *ChemSusChem*, 9 (2016) 855–862.

THE AUTHORS

VASSILYEVA Yuliya Z. — *National Research Tomsk Polytechnic University.*
E-mail: yzv1@tpu.ru

PAK Alexander Ya. — *National Research Tomsk Polytechnic University.*
E-mail: ayapak@tpu.ru

Received: 22.04.2021

DOI: 10.18721/JEST.27206

УДК 621.672

*Е.С. Козик, С.И. Богодухов,
Е.В. Свиденко, И.В. Руднев*

Оренбургский государственный университет,
Оренбург, Россия

ТЕРМООБРАБОТКА СПЛАВА ВК4

В работе проводили изучение влияния многократной, ступенчатой с промежуточными отпусками, закалки на физико-механические и эксплуатационные характеристики твердых сплавов. В качестве исходного материала использовали сплав ВК4 (неперетачиваемые 4-х гранные пластины и штабики размером 5×5×35 мм). Были определены физико-механические свойства исходных твердых сплавов WC-Co (VK4). Затем проводили поисковые работы по 11 режимам термической обработки в соляных ваннах. В каждом режиме исследовали по 10–15 пластин. После проведения поисковых исследований установили этапы и структурные изменения в процессе двукратной термообработки спеченных твердых сплавов. Физические свойства твердого сплава ВК4 после термической обработки практически не изменились (увеличилась в 2 раза коэрцитивная сила), однако отмечено увеличение на 10–30 % предела прочности при сжатии и твердости. В результате проведенных испытаний было установлено, что обработанные предложенными способами термической обработки пластины повысили свою стойкость в 1,5–2 раза.

Ключевые слова: твердый сплав ВК4, износ при резании, физико-механический свойства, соляные ванны, стойкость.

Ссылка при цитировании:

Козик Е.С., Богодухов С.И., Свиденко Е.В., Руднев И.В. Термообработка сплава ВК4 // *Материаловедение. Энергетика*. 2021. Т. 27, № 2. С. 73–83. DOI: 10.18721/JEST.27206

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*E.S. Kozik, S.I. Bogodukhov,
E.V. Svidenko, I.V. Rudnev*

Orenburg State University,
Orenburg, Russia

HEAT TREATMENT OF VK4 ALLOY

In this work, we studied the effect of multiple, stepwise hardening with intermediate tempering on the physical, mechanical and operational characteristics of hard alloys. Alloy VK4 was used as the initial material (non-resurfacing 4-sided plates and sticks with a size of 5×5×35 mm). The physical and mechanical properties of the initial hard alloys WC-Co (VK4) were determined. Then, prospecting work was carried out on 11 modes of heat treatment in salt baths. In each mode, 10–15 plates were examined. After conducting prospecting studies, the stages and structural changes in the process of double heat treatment of sintered hard alloys were established. The physical properties of the VK4 hard alloy after heat treatment practically did not change (the coercive force increased by 2 times), however, an increase of 10–30% in ultimate strength in compression and hardness was noted. As a result of the tests carried out, it was found that the plates treated by the proposed methods of heat treatment increased their durability by 1.5–2 times.

Keywords: hard alloy VK4, cutting wear, physical and mechanical properties, salt baths, durability.

Citation:

E.S. Kozik, S.I. Bogodukhov, E.V. Svidenko, I.V. Rudnev, Heat treatment of VK4 alloy, Materials Science. Power Engineering, 27 (02) (2021) 73–83, DOI: 10.18721/JEST.27206

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. На структуру твердых, сплавов могут влиять самые разнообразные факторы. Количественное соотношение компонентов твердых сплавов, эксплуатационные, физико-механические свойства каждой структурной составляющей. Температура, защитная атмосфера спекания (процесс взаимодействия с влажным, осушенным водородом или конвертированным газом) и скорость охлаждения после спекания. Деформация и напряжения между фазами твердого сплава при различных видах упрочнения твердых сплавов, взаимодействие карбидных фаз твердых сплавов с обрабатываемыми материалами [1, 9].

Но влияние этих факторов, как отдельно, так и в совокупности можно направить по желаемому направлению, оказывая влияние на них, а, следовательно, получая нужную структуру [2–8].

Основными элементами структуры твердых сплавов влияющих на износостойкость твердосплавных пластин являются:

- 1) фазовый состав;
- 2) величина карбидных зерен;
- 3) наличие «кольцевой структуры»;
- 4) пористость.

Фазовый состав, который идентифицируется наличием определенных фаз, имеющими разную твердость и прочность, которые будут зависеть от степени растворения одних фаз в других, а это, в свою очередь, вызвано их кристаллическим строением, видом элементарной и примитивной решеток, силой связи между атомами, электронным строением, а также внешними условиями получения фазового состава, например: скоростью охлаждения, наличием свободного углерода, величиной зерен исходных смесей, условиями спекания, средой, в которой производят спекание. Таким образом, изменяя внешние условия, можно влиять на элементы структуры сплавов, на саму структуру, а, следовательно, и на режущие свойства сплавов. Поэтому можно считать естественным, что существует такой вид термической обработки [10], который влияя на физические, технологические свойства изменяет микроструктуру твердого сплава и тем самым влияет на эксплуатационные свойства, то есть на режущие свойства и стойкость.

Необходимо только доказать, что эти свойства сплава не достигают своих оптимальных значений при принятом методе спекания, иначе говоря, существующий метод получения твердых сплавов, который не обеспечивает получения лучших режущих свойств. Но их можно было бы достигнуть, применяя иной метод термической обработки [11, 12].

Современные методы спекания твердых сплавов имеют под собой одностороннюю основу. Все они базируются на недопущении в структурный состав сплава «хрупких фаз», то есть таких фаз, которые снижают прочность, твердость и другие физико-механические свойства. При определенных условиях спекания могут быть достигнуты желаемые результаты. Таким образом, автоматически, исключая возможность появления хрупких фаз (пусть даже теоретически), отбрасывают заранее такие условия термообработки, которые могли бы привести к возникновению этих «хрупких» фаз. Проводившиеся до сих пор методы термической обработки твердых сплавов, хотя и давали некоторое повышение их свойств, но незначительное [13–15]. Целью работы является изучение влияния многократной, ступенчатой с промежуточными отпусками, закалки на физико-механические и эксплуатационные характеристики твердых сплавов состава: 96 %; W 4% Co.

Материалы и методы

В качестве исходного материала использовали сплав ВК4 (неперетачиваемые 4-х гранные пластины и штабики размером 5×5×35 мм).

Определили физико-механические свойства исходных твердых сплавов WC-Co (BK4): плотность сплавов, теплопроводность, удельную теплоемкость, коэффициент линейного расширения, электрическое сопротивление, твердость, предел прочности при изгибе.

Плотность сплавов WC-Co, при содержании кобальта 4%, в пределах 15,0 г/мм³. Теплопроводность – в пределах 0,1-0,16 кал/(см·с·град). Удельная теплоемкость для сплавов WC-Co лежит в пределах 0,035-0,05 кал/(г·град) при температуре до 100 °С и увеличивается примерно до 0,07-0,08 при 1000 °С. Коэффициент линейного расширения – $6 \cdot 10^{-6}$. Электрическое сопротивление сплавов составляет около 19 мк·Ом·см. Из магнитных свойств сплавов была определена величина коэрцитивной силы. Твердость сплавов WC-Co по Виккерсу составляет 1100-1700 Н/мм². Определяли предел прочности при сжатии по ГОСТ 20019-74.

В табл. 1 приведена последовательность процесса проведения термической обработки твердого сплава ВК4 при нагреве в соляных ваннах [6].

Таблица 1

Процесс термической обработки при нагреве в соляных ваннах

Table 1

The process of heat treatment when heated in salt baths

Операции	Среда	Температура, °С	Время, мин
Предварительный нагрев	соляная ванна предварительного нагрева 80-85 % BaCl ₂ + 20-15 % NaCl	800	2
Окончательный нагрев	соляная ванна окончательного нагрева 100 % BaCl ₂	950-1150	4
Закалка	масло И-20	40-60	5
Нагрев при отпуске	50 % KNO ₃ +50 % NaNO ₂	250-500	15
	соляная ванна Н-495	600	15
Отмывка	вода	95	3
Нейтрализация	3 % раствор HCl в воде	20	3-6
Промывка	вода	80-100	3-6
Сушка	воздух	90-100	3-6

Результаты

Проводились поисковые работы по 11 режимам термической обработки в соляных ваннах. Пластины подверглись дополнительной термообработке по 10 вариантам, а в 11-й партии использовались пластины в исходном состоянии, то есть без термообработки. В каждом опыте принимались по 10–15 пластин.

Варианты термической обработки были следующие:

1) пластины подвергались предварительному нагреву под закалку 800 °С с выдержкой при этой температуре в течении 2 мин, с последующим окончательным нагревом до 1150 °С и выдержкой в течении 4 мин, затем закалка в масле при температуре 60 °С и отпуск на автоматической линии (АЛ) при температуре 600 °С и выдержкой в течении 10 минут (800 °С – 2 мин → 1150 °С – 4 мин, закалка в масле 60 °С, отпуск на АЛ 600 °С – 10 мин);

2) $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин}$, закалка в масле $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, отпуск на АЛ $600\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ мин}$, отмывка;

3) $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин}$, закалка в масле $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин}$, закалка в масле $60\text{ }^{\circ}\text{C}$;

4) $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин} \rightarrow$ изотермическая закалка (ИЗ) $300\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ мин}$, с последующим охлаждением в воде;

5) $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин}$, ИЗ $200\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ мин}$; вторичная закалка $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин}$, ИЗ $200\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ мин}$;

6) $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин}$, закалка в масле $60\text{ }^{\circ}\text{C}$;

7) $880\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин}$, закалка в масле $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, отпуск $200\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ мин}$;

8) $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин}$, закалка в масле $60\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow$ отпуск на АЛ $600\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ мин}$;

9) $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин}$, закалка в масле $60\text{ }^{\circ}\text{C}$;

10) $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин} \rightarrow$ ИЗ $60\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ мин} \rightarrow$ отмывка в воде и вторичная закалка $800\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ мин} \rightarrow 1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ мин} \rightarrow$ ИЗ $560\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ мин}$;

Пластины, прошедшие дополнительную термообработку (по 10 вариантам), и пластины в исходном состоянии подвергались стойкостным испытаниям на токарно-винторезном станке 1К62 при поперечном точении заготовок $\varnothing 200\text{ мм}$ и внутренним $\varnothing 25$ из стали 50. Точение осуществлялось от центра к периферии без применения СОЖ, по 20 проходов (рис. 1). Резец с неперетачиваемой пластиной устанавливался по линии центров станка, вылет его из резцедержателя принимался не более двойной высоты державки. Геометрические параметры следующие: передний угол 15° , задний 12° , радиус при вершине $0,5\text{ мм}$ [9]. Условия испытания следующие:

Частота вращения n , мин^{-1}	630
Подача S , мм/об	0,11
Глубина резания t , мм	2

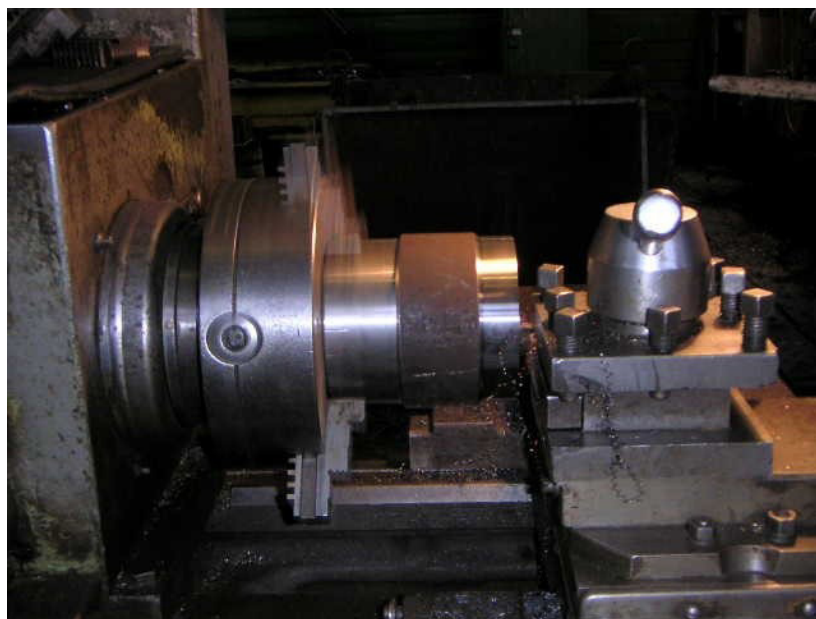


Рис. 1. Испытания твердосплавных пластин VK4

Fig. 1. Testing of hard-alloy plates VK4

Наименьший износ пластин наблюдался при использовании резцов, термообработанных по вариантам 1, 9, 10. Средние значения твердости и износа пластин для этих режимов приведены в табл. 2.

Таким образом, для внедрения в производство рекомендуются следующие три режима термической обработки:

- 1) режим 1, 800 °С – 2 мин → 1150 °С – 4 мин, закалка в масле 60 °С, отпуск на АЛ 600 °С – 10 мин;
- 2) режим 9, 800 °С – 2 мин → 1150 °С – 4 мин, закалка в масле 60 °С;
- 3) режим 10, 800 °С – 2 мин → 1150 °С – 4 мин → ИЗ 60 °С – 10 мин → отмывка в воде и вторичная закалка 800 °С – 2 мин → 1150 °С – 4 мин → ИЗ 560 °С – 10 мин.

Таблица 2

Сводная таблица данных по твердости и износу при резании для лучших режимов

Table 2

Summary table of cutting hardness and wear data for the best cutting modes

№ режима	Твердость HV	Относительный поверхностный износ		Интенсивность износа	
		по уголку $h_{от\ ут}$, мкм/м ²	задней поверхности $h_{от\ з}$, мкм/м ²	угловая $\varepsilon_{уг}$, км/мин	по задней поверхности $\varepsilon_{уг}$, мкм/мин
Исходные	1160	15821	22500	209	297
Режим 1, 800 °С – 2 мин → → 1150 °С – 4 мин, закалка в масле 60 °С, отпуск на АЛ 600 °С – 10 мин	1752	14642	20105	193,4	264
Режим 9, 800 °С – 2 мин → → 1150 °С – 4 мин, закалка в масле 60 °С	1687	15355	21606	202,8	287
Режим 10, 800 °С – 2 мин → → 1150 °С – 4 мин → → ИЗ 60 °С – 10 мин → → отмывка в воде и вторичная закалка 800 °С – 2 мин → → 1150 °С – 4 мин → → ИЗ 560 °С – 10 мин	1708	15178	21071	200,5	278

Обсуждение

В экспериментальной работе установлены этапы и структурные изменения в процессе двукратной термообработки спеченных твердых сплавов.

1) При первичном нагреве спеченных пластин происходит ослабление удерживающих связей в фазах $\eta_2 - W_6Co_6C$ и $\varepsilon_2 - Co_3W_2C_2$.

В результате за время поддержания заданной температуры происходит частичное диффузионное растворение этих фаз в других составляющих. Таким образом, увеличивается процент чистого кобальта. В результате нагрева фаза η_2 , (поскольку увеличилось содержание кобальта) начинает диффундировать к поверхностям карбидов. Таким образом возрастает прочность и твердость сплава. Чтобы не допустить обратного процесса сплав быстро охлаждается (закаливается) в масле.

2) В результате первой закалки мы получили повышение твердости к прочности сплава за счет диффундирования $\eta_2 - W_6Co_6C$ и $\varepsilon_2 - Co_3W_2C_2$ фаз. Однако в результате быстрого охлаждения

между зёрнами карбидов возникли напряжения, которые могут явиться причинами выкрашивания и поломок пластин в момент резания. Поэтому с целью снятия этих напряжений проводится 15-ти минутный отпуск сплава.

3) Следующим этапом является вторичная закалка. Температура ее ниже температуры нагрева под первую закалку порядка 200 °С. Это необходимо для того, чтобы исключить возможность появления η_1 , η_2 и ε -фаз. При температуре второй заправки карбид вольфрама в очень малом количестве растворяется в кобальте.

Таким образом, возникает структура, которая оказывает положительное влияние на режущие свойства, увеличивая их до 3-х раз (имеется в виду стойкость) за счет более равномерной по физико-механическим свойствам структуры: ввиду растворимости WC в Co несколько повышается твердость связки без изменения прочностных (вязущих) ее свойств. Время второй заправки равно времени первой заправки, и поэтому диффузия карбидных составляющих в связку не могут произойти.

Чтобы закрепить полученные свойства, проводят быстрое охлаждение в масле.

4) Для того, чтобы снять вновь возникающие в процессе второй заправки напряжения, проводится вторичный отпуск. Но температура этого отпуска должна быть обязательно меньше 417 °С — температуры при которой начинается полиморфное превращения α -кобальта (ГПЦ) в β -кобальт (ГЦК), нами была принята температура 300 °С.

Проведенные металлографические исследования (рис. 2, 3) подтвердили вышеприведенные аргументы.

В результате всей термической обработки (закалок, отпусков) зёрна карбидов несколько уменьшились в размерах, данная картина прослеживается на фратографиях излома (рис. 4-6).

После проведения термической обработки в солях по 11 режимам были определены физико-механические свойства сплава (96 %; W 4% Co) (табл. 3).

Таблица 3

Свойства твердого сплава (96 %; W 4% Co)

Table 3

Properties of hard alloy (96 %; W 4% Co)

Режим Т.О.	Физические свойства					Механические свойства		
	Размер основной массы карбидных зерен, мкм	Коэрцитив- ная сила, Э	Удельное электро- сопро- тивление, мкОм см	Коэф- фициент линейного термиче- ского рас- ширения 10 ⁶ град-1	Плотность, г/см ²	Предел прочности при сжа- тии, МПа	Твердость	
							HRA	HV, H/мм ²
Режим 1	2-3	140-180	19,3	0,12	14,9-15,1	4360	90,5	1752
исход- ный	2-5	60-90	18,8	0,12	14,9-15,1	4110	88,0	1160

Физические свойства твердого сплава ВК4 после термической обработки практически не изменились (увеличилась в 2 раза коэрцитивная сила), однако отмечено увеличение на 10-30 % предела прочности при сжатии и твердости.

В результате проведенных испытаний было установлено, что обработанные предложенными способами термической обработки пластины повысили свою стойкость в 1,5-2 раза.

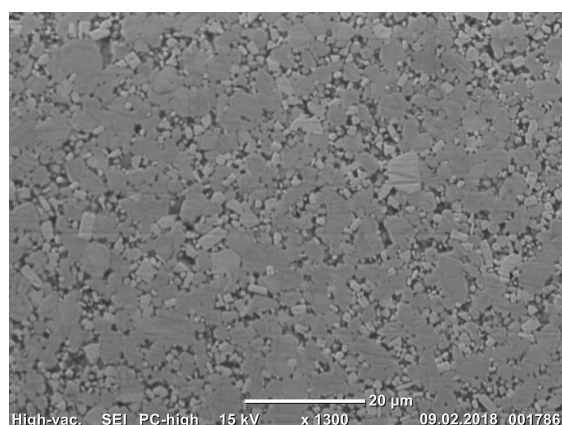


Рис. 2. Микроструктура твердого сплава (96 % W 4% Co) после многократной, ступенчатой закалки по режиму 1, $\times 1300$

Fig. 2. Microstructure of a hard alloy (96 %; W 4% Co) after repeated, stepwise quenching according to the mode 1, $\times 1300$

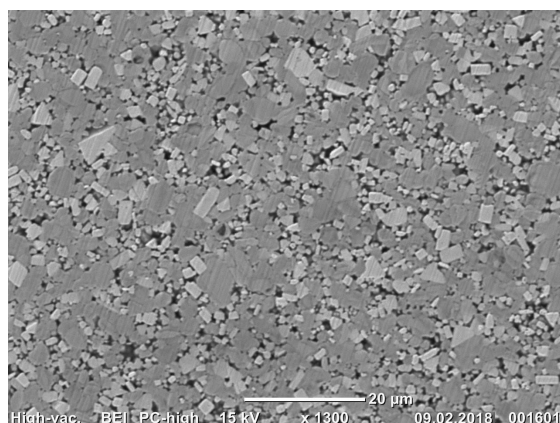


Рис. 3. Микроструктура твердого сплава (96 % W 4% Co) после многократной, ступенчатой закалки по режиму 2, $\times 1300$

Fig. 3. Microstructure of a hard alloy (96 %; W 4% Co) after repeated, stepwise quenching according to the mode 2, $\times 1300$



Рис. 4. Фрактография излома твердого сплава (96 % W 4% Co) после многократной, ступенчатой закалки по режиму 1, $\times 1000$

Fig. 4. Fractography of the fracture of a hard alloy (96 %; W 4% Co) after repeated, stepwise quenching according to the mode 1, $\times 1000$

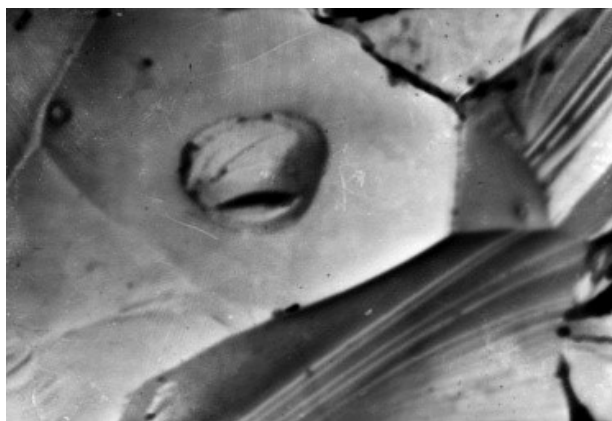


Рис. 5. Фрактография излома твердого сплава (96 %; W 4% Co) после многократной, ступенчатой закалки по режиму 9, $\times 1000$

Fig. 5. Fractography of the fracture of a hard alloy (96 %; W 4% Co) after repeated, stepwise quenching according to the mode 9, $\times 1000$

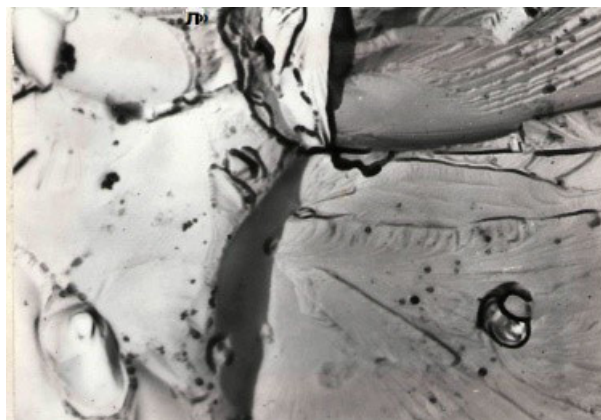


Рис. 6. Фрактография излома твердого сплава (96 %; W 4% Co) после многократной, ступенчатой закалки по режиму 10, $\times 1000$

Fig. 6. Fractography of the fracture of a hard alloy (96 %; W 4% Co) after repeated, stepwise quenching according to the mode 10, $\times 1000$

Полагаем, что повышенная стойкость в % отношении означает следующее: в 1,5-2,5 раза увеличивается стойкость от повышения твердости и прочности за счет диффузионного растворения ϵ , η_1 , η_2 и χ -фаз, и в 2-3,5 раза увеличивается стойкость от возникающей «кольцевой» структуры, обеспечивающей равномерность свойств и некоторое повышение твердости и прочности.

Термообработанные по 1 режиму пластины, доведенные алмазным кругом, показали стойкость примерно 200 минут, в тоже время, как стандартная стойкость при таком же режиме составляет около 40 минут, износ до 0,8 мм.

Выводы

1. Применили метод, многократной, ступенчатой с промежуточными отпусками, закалки сплава ВК4.
2. В результате проведенных испытаний было установлено, что обработанные предложенными способами термической обработки пластины повысили свою стойкость в 1,5-2 раза.

3. В 1,5–2,5 раза увеличивается стойкость от повышения твердости и прочности за счет диффузионного растворения ϵ , η_1 , η_2 и χ -фаз, и в 2–3,5 раза увеличивается стойкость от возникающей структуры, обеспечивающей равномерность свойств и некоторое повышение твердости и прочности.

4. Объединение во времени первой и второй закалки недопустимо, так как это ведет к неконтролируемым в процессе термической обработки реакциям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Zhang Li., Wang Yuan-Jie., Yu Xian-wang., Chen Shu., Xiong Xiang-Jin. Crack propagation characteristic and toughness of functionally graded WC–CO cemented carbide. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 26 (4) (2018) 295–300.
- [2] Colovcan V.T. Some analytical consequences of experiment data on properties of WC–Co hard metals. *IntJ. Refract. Met. HardMater.* 26 (4) (2018) 301–305.
- [3] Богодухов С.И. Высокотемпературное ионное азотирование твердосплавных неперетачиваемых пластин марки Т15К6 / С.И. Богодухов, Е.С. Козик, Е.В. Свиденко // *Металловедение и термическая обработка*. 4 (2019) 30–39.
- [4] Patsera E.I., Levashov E.A., Kurbatkina V.V., Kovalev D.Yu. Production of ultra-high temperature carbide (Ta,Zr)C by self-propagating high-temperature synthesis of mechanically activated mixtures. *Ceram. Int.* 41(7) (2015) 8885–8893.
- [5] Chebykin E.P., Stepanova O.G., Goldberg E.L., Gorbarenko S.A., Panov V.S. Geochemical multielement signatures of glacial and interglacial facies of the okhotsk sea deepwater sediments during the past 350 kyr: A response to global climate changes at the orbital and millennial scales. *Paleoceanography*. 30 (3) (2015) 303–316.
- [6] Свиденко Е.В. Повышение эксплуатационных свойств титановольфрамовых твердых сплавов с использованием технологии высокоэнергетической обработки : диссертация ... кандидата технических наук: 05.16.01 / Свиденко Е.В. – Оренбург, (2016) 174.
- [7] Способ упрочнения твердых сплавов / Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В.; патентообладатель Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Оренбургский государственный университет".- № 2018136804 заявл. 18.10.2018 опубл. 01.07.2019, 19 (2019).
- [8] Способ упрочнения ультрадисперсного твердого сплава азотированием / С.И. Богодухов, Е.С. Козик, Е.В. Свиденко; патентообладатель Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Оренбургский гос. ун-т".- № 2019116142 заявл. 27.05.2019 опубл. 12.11.2020, 19 (2020).
- [9] Шеин Е.А. Комбинированная термическая обработка в сплаве ВК8 высокоэнергетическими источниками нагрева: диссертация... кандидата технических наук: 05.16.01 / Шеин Е.А.; [Место защиты: Оренбург. гос. ун-т]. Оренбург, 2009. 136 с.
- [10] Qiu W.Q., Liu Z.W., He L.X., Zeng D.C., Mai Y.-W. Improved interfacial adhesion between diamond film and copper substrate using a Cu(Cr)–diamond composite interlayer. *Mater. Lett.* 81 (2018) 155–157.
- [11] Panov V.S., Zaitsev A.A. Developmental tendencies of technology of ultradispersed and nanosized WC–CO hard alloys alloyed with tantalum carbide. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 56 (4) (2015) 477–485.
- [12] Zhang Z., Chen D.L. Contribution of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites. *Mater. Sci. Eng. A*. 483(2018) 148–152.
- [13] Zaitsev A.A., Kurbatkina V.V., Levashov E.A. Features of the effect of nanodispersed additives on the sintering process and properties of powdered cobalt alloys. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 49 (2) (2018) 120–126.
- [14] Zaitsev A.A., Kurbatkina V.V., Levashov E.A. Features of the influence of nanodispersed additions on the process of and properties of the Fe–Co–Cu–Sn sintered alloy. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 49 (5) (2018) 414–419.

[15] **Ранов V.S.** Nanostructured sintered WC–CO hard metals (review) Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 53 (11) (2018) 64–654.

[16] **Ярьсько С.И.** Физические и технологические основы упрочнения твердых сплавов. — Самара, 2006. 235 с.

[17] **Сальников М.А.** Разработка буровых твёрдых сплавов с повышенными характеристиками пластичности и трещиностойкости на основе высокотемпературных карбидов вольфрама: диссертация... кандидата технических наук: 05.02.01 / Сальников М.А.; [Место защиты: Сам. гос. техн. ун-т]. — Самара, 2009. — 158 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОЗИК Елена Станиславовна — доцент, Оренбургский государственный университет, канд. техн. наук.
E-mail: ele57670823@yandex.ru

БОГОДУХОВ Станислав Иванович — профессор, Оренбургский государственный университет, д-р техн. наук.
E-mail: ogu@mailgate.ru

СВИДЕНКО Екатерина Валерьевна — старший преподаватель, Оренбургский государственный университет, канд. техн. наук.
E-mail: tzvetkova.katia2016@yandex.ru

РУДНЕВ Игорь Владимирович — доцент, Оренбургский государственный университет, канд. техн. наук.
E-mail: skonst@mail.osu.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 31.05.2021

REFERENCES

[1] **Li. Zhang, Yuan-Jie. Wang, Xian- wang. Yu, Shu. Chen, Xiang-Jin. Xiong**, Crack propagation characteristic and toughness of functionally graded WC–CO cemented carbide. Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 26 (4) (2018) 295–300.

[2] **V.T. Colovcan**, Some analytical consequences of experiment data on properties of WC–Co hard metals. IntJ. Refract. Met. HardMater. 26 (4) (2018) 301–305.

[3] **S.I. Bogodukhov**, Vysokotemperaturnoye ionnoye azotirovaniye tverdospлавnykh neperetachivayemykh plastin marki T15K6 / S.I. Bogodukhov, Ye.S. Kozik, Ye.V. Svidenko // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka. 4 (2019) 30–39.

[4] **E.I. Patsera, E.A. Levashov, V.V. Kurbatkina, D.Yu. Kovalev**, Production of ultra-high temperature carbide (Ta,Zr)C by self-propagating high-temperature synthesis of mechanically activated mixtures. Ceram. Int. 41 (7) (2015) 8885–8893.

[5] **E.P. Chebykin, O.G. Stepanova, E.L. Goldberg, S.A. Gorbarenko, V.S. Panov**, Geochemical multielement signatures of glacial and interglacial facies of the okhotsk sea deepwater sediments during the past 350 kyr: A response to global climate changes at the orbital and millennial scales. Paleoceanography. 30 (3) (2015) 303–316.

[6] **Ye.V. Svidenko**, Povysheniye ekspluatatsionnykh svoystv titanovolframovykh tverdykh сплавов s ispolzovaniyem tekhnologii vysokoenergeticheskoy obrabotki : dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk : 05.16.01 / Svidenko Ye.V. — Orenburg, (2016) 174.

[7] Sposob uprochneniya tverdykh splavov / Bogodukhov S.I., Kozik Ye.S., Svidenko Ye.V.; patentoobladatel Feder. gos. byudzh. obrazov. uchrezhdeniye vyssh. obrazovaniya "Orenburgskiy gosudarstvennyy universitet".- № 2018136804 zayavl. 18.10.2018 opubl. 01.07.2019, 19 (2019).

[8] Sposob uprochneniya ultradispersnogo tverdogo splava azotirovaniyem / S.I. Bogodukhov, Ye.S. Kozik, Ye.V. Svidenko; patentoobladatel Feder. gos. byudzh. obrazov. uchrezhdeniye vyssh. obrazovaniya "Orenburgskiy gos. un-t".- № 2019116142 zayavl. 27.05.2019 opubl. 12.11.2020, 19 (2020).

[9] Ye.A. Shein, Kombinirovannaya termicheskaya obrabotka v splave VK8 vysokoenergeticheskimi istochnikami nagreva: dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.16.01 / Shein Ye.A.; [Mesto zashchity: Orenburg. gos. un-t]. Orenburg, 2009. 136 s.

[10] W.Q. Qiu, Z.W. Liu, L.X. He, D.C. Zeng, Y.-W. Mai, Improved interfacial adhesion between diamond film and copper substrate using a Cu(Cr)-diamond composite interlayer. Mater. Lett. 81 (2018) 155–157.

[11] V.S. Panov, A.A. Zaitsev, Developmental tendencies of technology of ultradispersed and nanosized WC–CO hard alloys alloyed with tantalum carbide. Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 56 (4) (2015) 477–485.

[12] Z. Zhang, D.L. Chen, Contribution of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites. Mater. Sci. Eng. A. 483 (2018) 148–152.

[13] A.A. Zaitsev, V.V. Kurbatkina, E.A. Levashov, Features of the effect of nanodispersed additives on the sintering process and properties of powdered cobalt alloys. Russ. J. Non-Ferr. Met. 49 (2) (2018) 120–126.

[14] A.A. Zaitsev, V.V. Kurbatkina, E.A. Levashov, Features of the influence of nanodispersed additions on the process of and properties of the Fe–Co–Cu–Sn sintered alloy. Russ. J. Non-Ferr. Met. 49(5) (2018) 414–419.

[15] V.S. Panov, Nanostructured sintered WC–CO hard metals (review) Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 53 (11) (2018) 643–654.

[16] S.I. Yaresko, Fizicheskiye i tekhnologicheskiye osnovy uprochneniya tverdykh splavov. — Samara, 2006. 235 s.

[17] M.A. Salnikov, Razrabotka burovykh tverdykh splavov s povyshennymi kharakteristikami plastichnosti i treshchinostoykosti na osnove vysokotemperaturnykh karbidov volframa: dissertatsiya...kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.02.01 / Salnikov M.A.; [Mesto zashchity: Sam. gos. tekhn. un-t]. — Samara, 2009. — 158 s.

THE AUTHORS

KOZIK Elena S. — *Orenburg State University.*
E-mail: ele57670823@yandex.ru

BOGODUKHOV Stanislav I. — *Orenburg State University.*
E-mail: ogu@mailgate.ru

SVIDENKO Ekaterina V. — *Orenburg State University.*
E-mail: tzvetkova.katia2016@yandex.ru

RUDNEV Igor' V. — *Orenburg State University.*
E-mail: skonst@mail.osu.ru

Received: 31.05.2021

Научное издание

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЭНЕРГЕТИКА

Том 27, № 2, 2021

Учредитель — Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охраны культурного наследия
(свидетельство о регистрации СМИ ЭЛ № ФС 77-78004 от 27.03.2020 г.)

Ответственный секретарь — *О.А. Матенев*

Компьютерная верстка *А.А. Кононовой*

Телефон редакции (812) 294-22-86

E-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

Подписано в печать 29.06.2021.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ "МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЭНЕРГЕТИКА"

(ранее «Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки»)

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Материаловедение. Энергетика» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием: зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (Свидетельство о регистрации СМИ от 27.03.2020 г. ЭЛ № ФС 77-78004);

имеет международный стандартный номер сериального периодического издания (ISSN 2687-1300);

внесен Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки РФ в Перечень периодических научных и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора наук и кандидата наук;

с 2005 г. входит в национальную информационно-аналитическую систему «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)»;

сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНТИ РАН и включены в фонд научно-технической литературы (НТЛ) ВИНТИ РАН, в Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка», в международную библиографическую и реферативную базу данных ProQuest, международную наукометрическую базу Index Copernicus, Google Scholar, международную систему по периодическим изданиям «Ulrich's Periodicals Directory», представлены на платформе Web of Science в виде отдельной базы данных Russian Science Citation Index (RSCI), EBSCO, CNKI, ROAD.

Журнал публикует результаты работ в следующих областях науки и техники: энергетика, электротехника, материаловедение, металлургия.

Редакция журнала соблюдает права интеллектуальной собственности и со всеми авторами научных статей заключает издательский лицензионный договор.

Публикация материалов, в том числе соискателей ученых степеней, осуществляется бесплатно.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Представление материалов

В статье должны быть кратко изложены новые и оригинальные результаты исследований, полученные авторами; следует избегать повторений, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

При написании оригинальной научной статьи и оформлении рукописи авторы должны придерживаться следующих правил.

Статья должна представлять собой описание выполненных исследований с указанием их места в соответствующей области наук и обсуждением значения выполненной работы. Рукопись должна содержать достаточное количество информации и ссылок на общедоступные источники для того, чтобы работа могла быть повторена независимо от авторов.

Название статьи должно быть кратким, но информативным. Обращаем внимание на то, что журнал издается как на русском, так и на английском языке. В связи с этим не следует использовать аббревиатуру в названии статьи.

Аннотация должна давать читателю сжатую информацию о содержании статьи, быть информативной и отражать не только основные цели статьи, но и главные результаты и выводы работы. Аннотация не является частью текста и сама по себе должна быть законченным описанием.

Ключевые слова должны отражать основную проблематику статьи; они приводятся на русском языке для русской и на английском для англоязычной версии статьи. Количество ключевых слов — не менее трех и не более семи.

Адрес для корреспонденции должен содержать фамилию автора для корреспонденции (не обязательно первого автора), его полный почтовый адрес, телефон, факс, e-mail.

При необходимости Редакция может потребовать представления Акта экспертизы.

Представление всех материалов осуществляется в электронном виде через личный кабинет ЭЛЕКТРОННОЙ РЕДАКЦИИ по адресу: <http://journals.spbstu.ru>

Статьи подаются в формате .docx (MS Word 2007–2010). Файл статьи, подаваемый через электронную редакцию, должен содержать только сам текст, без названия, списка литературы, фамилий и данных авторов. Список литературы, название статьи, вся информация об авторах задаются при подаче через электронную редакцию в отдельных полях. В тексте статьи должны быть ссылки на все источники из списка литературы. Порядковый номер источника в тексте статьи указывается в квадратных скобках.

2.2. Оформление материалов

2.2.1. Объем статей, как правило, 15–20 страниц формата А-4. Количество рисунков и фотографий (в том числе цветных) не должно превышать 4, таблиц — 3.

2.2.2. Число авторов — не более трех от одной организации и не более пяти от разных организаций. Статья должна быть подписана всеми авторами. Авторами являются лица, принимавшие участие во всей работе или ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в сносках.

2.2.3. Статья должна содержать следующие разделы:

номер УДК в соответствии с классификатором;

фамилии авторов на русском и английском языках;

название на русском и английском языках;

аннотации — не менее 100 слов на русском и английском языках;

ключевые слова — не менее 3 и не более 7 на русском и английском языках;

введение (актуальность, краткое обоснование существующей проблемы) — 1,0–1,5 стр.;

цель работы (краткая четкая формулировка поставленной задачи);

методика проведения исследований и расчетов, включая краткую информацию об использованных приборах, методах и точности экспериментальных измерений и теоретических расчетов и т. д.