

Том 26, №4, 2020



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

Вайсберг Л.А., академик РАН

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

Клименко А.В., д-р техн. наук, академик РАН

Костюк В.В., академик РАН

Лагарьков А.Н., академик РАН

Окрепиллов В.В., академик РАН

Патон Б.Е., академик НАН Украины и РАН

Рудской А.И., академик РАН

Федоров М.П., академик РАН

Фортвов В.Е., 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

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

Забонин 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

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»

Цеменко 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

Vaisberg L.A. — full 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

Paton B.E. — full member of the Russian Academy of Sciences and the National
Academy of Sciences of Ukraine

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

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

Fertov V.E. — 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, Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Aksenov L.B. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Bashkarev A.Ya. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Gordeev S.K. — Dr.Sc. (tech.), prof. ЦНИИМ

Zaboin B.N. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

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

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

Kirillov A.I. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Korovkin N.V. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Mityakov A.V. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Michailov V.G. — Dr.Sc. (tech.), prof. BTU (Germania)

Petritchenko M.R. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Raychik Ya. — Dr.Sc. (tech.), 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. — Dr.Sc. (tech.), 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. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Tolochko O.V. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Fokin G.A. — Dr.Sc. (tech.), General Director of LLC «Gazprom Transgaz
St. Petersburg»

Tsamenko V.N. — Dr.Sc. (tech.), 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, 2020

Содержание

Энергетика и электротехника

Боровков А.И., Воинов И.Б., Галеркин Ю.Б., Каминский Р.В., Дроздов А.А., Соловьёва О.А., Солдатова К.В. Проектирование, испытание и CFD-расчет турбокомпрессора для наддува среднеоборотного ДВС.....	5
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.....	23
Захаров А.И., Чижма С.Н. Моделирование системы управления ветровой энергетической установкой малой мощности.....	36
Калютик А.А., Трещёв Д.А., Трещёва М.А. Использование показателя относительной экономии топлива для оптимизации параметров теплофикационной ПГУ.....	51
Котлов А.А., Бураков А.В., Кузнецов Л.Г. Снижение вибрации поршневого компрессора за счет обеспечения знакопостоянства диаграммы крутящего момента.....	64
Сологубова Г.С., Богачёв В.Ф., Горенбургов М.А. Барьеры финансирования сектора возобновляемых источников энергии.....	75
Шишигин С.Л., Шишигин Д.С., Смирнов И.Н. Расчет грозовых перенапряжений воздушных линий в цепных схемах с учетом частотных свойств грунта.....	87
Маренина Л.Н., Соловьёва О.А., Галеркин Ю.Б., Попова Е.Ю., Каминский В.Н. Разработка параметризованной модели и расчет осевого компрессора энергетической установки.....	100
Шишов Д.М., Шевцов Д.А., Сухов Д.В. Бездатчиковый регулятор электродвигателя с амплитудно-частотно-фазовым управлением.....	112

Материаловедение и металлургия

Тюрикова И.А., Демидов А.И., Новиков П.А., Тюриков К.С. Применение наноразмерного оксида железа в качестве добавки к аноду литий-ионного аккумулятора.....	123
Козик Е.С., Богодухов С.И., Свиденко Е.В. Поисковые исследования по влиянию безокислительного нагрева на эксплуатационные свойства изделий из твердых сплавов.....	132

Contents

Power engineering and Electrical engineering

- Borovkov A.I., Voinov I.B., Galerkin Yu.B., Kaminskiy R.V., Drozdov A.A., Solovyeva O.A., Soldatova K.V.** Medium-speed engine turbocharger: design, testing and CFD-calculation..... 5
- Gorynin V.I., Kondratyev S.Yu., Rogozhkin V.V., Mischin E.B., Kolenov E.V.** Condensation of atmospheric moisture in the sea area for in-line production of natural fresh water..... 23
- Zakharov A.I., Chizhma S.N.** Modeling a control system for a low-power wind energy plant..... 36
- Kalyutik A.A., Treshchev D.A., Treshcheva M.A.** Use of relative fuel economy indicator for optimization of CHP CCGT parameters..... 51
- Kotlov A.A., Burakov A.V., Kuznetsov L.G.** Reducing vibration of a reciprocating compressor by ensuring the constant sign of the torque diagram..... 64
- Sologubova G.S., Bogachev V.F., Gorenburgov M.A.** Barriers of financing renewable energy..... 75
- Shishigin S.L., Shishigin D.S., Smirnov I.N.** Calculation of lightning surges in transmission lines using electric circuits considering soil frequency characteristics..... 87
- Marenina L.N., Solovyeva O.A., Galerkin Yu.B., Popova E.Yu., Kaminsky V.N.** Development of a parametrized model and calculation of a power unit axial compressor..... 100
- Shishov D.M., Shevtsov D.A., Sukhov D.V.** Sensorless motor controller with amplitude-frequency-phase control..... 112

Materials Science and Metallurgy

- Tyurikova I.A., Demidov A.I., Novikov P.A., Tyurikov K.S.** Nanosized iron oxide application as an additive to a lithium-ion battery anode..... 123
- Kozik E.S., Bogodukhov S.I., Shvidenko E.V.** Exploratory research on the effect of non-oxidative heating on the performance properties of hard alloy products..... 132

DOI: 10.18721/JEST.26401

УДК 621.515

*А.И. Боровков¹, И.Б. Воинов¹, Ю.Б. Галеркин¹,
Р.В. Каминский², А.А. Дроздов¹, О.А. Соловьёва¹, К.В. Солдатова³*

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия;

² АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
"НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ "ТУРБОТЕХНИКА",
г. Протвино Московская область, Россия;

³ Мельбурнский политехнический институт,
Мельбурн, Австралия

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИСПЫТАНИЕ И CFD-РАСЧЕТ ТУРБОКОМПРЕССОРА ДЛЯ НАДДУВА СРЕДНЕОБОРОТНОГО ДВС

Для проектирования центробежных компрессоров применяются различные подходы и методики. Это инженерные одномерные и квазитрехмерные программы, а также CFD-программы. Окончательное суждение об эффективности проекта даёт испытание компрессора или его модели. Совместно НИИ «Газовая динамика турбомашин» СПбПУ и НПО «Турботехника» был спроектирован центробежный компрессор турбоагнетателя ДВС. Для проверки безразмерных характеристик компрессор был испытан с двумя геометрически подобными рабочими колёсами с диаметром 175 (ТКР 175Э) и 140 мм (ТКР 140Э). Математическая модель Метода универсального моделирования рассчитывает КПД на расчетном режиме для всех испытаний обоих компрессоров с погрешностью 0,89%, а КПД по характеристике в целом с погрешностью 1,55%. Характеристики компрессора ТКР 140Э были рассчитаны при помощи коммерческой CFD-программы ANSYS. Для ТКР-140Э получено значительное расхождение по величине КПД, но хорошее совпадение по зоне работы, что не получалось в предыдущих расчетах. Коэффициент внутреннего напора по расчету завышен на 9%, что соответствует результатам предыдущих расчетов авторов.

Ключевые слова: центробежный компрессор, осерадиальное рабочее колесо, турбоагнетатель ДВС, КПД, CFD – моделирование.

Ссылка при цитировании:

Боровков А.И., Воинов И.Б., Галеркин Ю.Б., Каминский Р.В., Дроздов А.А., Соловьёва О.А., Солдатова К.В. Проектирование, испытание и CFD-расчет турбокомпрессора для наддува среднеоборотного ДВС // *Материаловедение. Энергетика*. 2020. Т. 26, № 4. С. 5–22. DOI: 10.18721/JEST.26401

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

*A.I. Borovkov¹, I.B. Voinov¹, Yu.B. Galerkin¹,
R.V. Kaminskiy², A.A. Drozdov¹, O.A. Solovyeva¹, K.V. Soldatova³*

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

² JOINT-STOCK COMPANY "SCIENTIFIC-PRODUCTION ASSOCIATION "TURBOTEHNIKA",
Protvino Moscow region, Russia;

³ Melbourne Polytechnic Institute, Melbourne, Australia

MEDIUM-SPEED ENGINE TURBOCHARGER: DESIGN, TESTING AND CFD-CALCULATION

Various approaches and techniques are used to design centrifugal compressors. These are engineering one-dimensional and quasi-three-dimensional programs, as well as CFD programs. The final judgment about the effectiveness of the project is given by testing the compressor or its model. SPbPU Research Laboratory “Gas Dynamics of Turbomachines” and NPO “Turbotekhnika” jointly designed a centrifugal compressor for an internal combustion engine turbocharger. To check the dimensionless characteristics, the compressor was tested with two geometrically similar impellers with a diameter of 175 (TKR 175E) and 140 mm (TKR 140E). The mathematical model of the Universal Modeling Method calculates the efficiency in the design mode for all tests of both compressors with an error of 0.89%, and the efficiency for whole characteristic with an error of 1.55%. The characteristics of the TKR 140E compressor were calculated using the commercial CFD program ANSYS. For TKR-140E, we obtained a significant discrepancy in the value of the efficiency, but also a good agreement in the area of operation, which was not obtained in the previous calculations. According to the calculation, the work coefficient is overestimated by 9%, which corresponds to the results of the previous calculations by the authors.

Keywords: turbomachinery, centrifugal compressor, impellers, internal combustion engines, efficiency, computational fluid dynamics.

Citation:

A.I. Borovkov, I.B. Voinov, Yu.B. Galerkin, R.V. Kaminskiy, A.A. Drozdov, O.A. Solovyeva, K.V. Soldatova, Medium-speed engine turbocharger: design, testing and CFD-calculation, Materials Science. Power Engineering, 26 (04) (2020) 5–22, DOI: 10.18721/JEST.26401

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

Введение. Для проектирования центробежных компрессоров турбоагнетателей ДВС применяются различные подходы, в том числе инженерные методики и CFD-программы.

В работе [1] рассматриваются моделирование трех центробежных нагнетателей ДВС. Для расчетов использовался программа ANSYS CFX 14, расчетная сетка объектов состоит из 1,6 млн. ячеек (количество ячеек получено в результате исследования на сеточную независимость). Течение в зазоре основного диска не моделируется. Расчёты корректировались на величину потерь дискового трения по модели [2]. Потери в улитке рассчитывались по модели [3].

Для нагнетателей С-1 и С-3 получено хорошее совпадение рассчитанного и измеренного КПД как по величине, так и по зоне работы на расчетных оборотах. Для нагнетателя С-2 наблюдается смещение рассчитанной характеристики в сторону меньших расходов по сравнению с измеренной. Для всех компрессоров наблюдается завышение рассчитанного КПД над измеренным при низких оборотах. Авторы объясняют расхождение расчетных и экспериментальных данных тем, что CFD-расчеты проведены без подвода тепла, в то время как при испытаниях имелся тепловой поток от приводной турбины.

В продолжении исследования [1] была опубликована работа [4]. В ней исследовались ступени двух других турбоагнетателей. Для расчетов с уменьшенным числом оборотов, заметно смещение рассчитанных характеристик в сторону больших расходов, при этом, по мере приближения к номинальной мощности, зоны измеренной и рассчитанной характеристик совпадают лучше. Рассчитанный максимальный КПД ступени также превышает измеренный примерно на 6%. Ошибка моделирования границы помпажа порядка 15%.

Авторы работы [5] также производили расчет турбоагнетателя ДВС. Для численного исследования применялась программа Star-CCM+. Анализ более 15 различных работ, проведенный авторами позволили сделать следующие выводы по выбору модели турбулентности для различ-

ных CFD-программ: для ANSYS CFX лучшие результаты дает модель турбулентности SST, для Numeca FINE/Turbo более предпочтительна модель турбулентности SA, для Star-CCM+ – $k - \epsilon$. Расчет производится в стационарной постановке без учета подвода тепла. Для достижения сеточной независимости авторы рассматривали четыре расчетные сетки с числом ячеек от 27 до 84,4 млн. Сравнение производилось для двух режимов: рабочем с полными оборотами и частично нагруженным с практически половинными оборотами.

Можно отметить хорошее совпадение расчетных и экспериментальных характеристик как по величине, так и по зоне работы. При этом хорошее совпадение достигается и на пониженных оборотах, для которых авторы работ [1] получили значительное расхождение расчетных и экспериментальных данных, объясняемое отсутствием учета подвода тепла при CFD-расчетах.

Подобное расхождение в результатах CFD-расчетов при практически одинаковой их постановке (в обоих случаях расчет считался при адиабатическом процессе) доказывает достоверность и повторяемость CFD-расчетов без их предварительной всесторонней идентификации говорить сложно.

В работе [6] представлено сопоставление алгоритмов сглаживания кривых, описывающих поверхности лопаток осерадиального рабочего колеса (ОРК). Моделировалось течения в двухзвенной ступени ОРК + безлопаточный диффузор (БЛД) турбоагнетателя. Расчетная сетка строилась для одного межлопаточного канала, общее количество ячеек – 2,3 млн. Использовалась модель турбулентности SST и программа ANSYS CFX. Наблюдается значительное превышение рассчитанного отношения давлений и смещение рассчитанных характеристик вправо, что характерно для ряда других сопоставлений CFD-расчётов с экспериментами [7–20]. Необычно большое превышение рассчитанного КПД.

Очевидно, CFD-расчёты турбоагнетателей ДВС (как и других центробежных компрессоров) пока не могут заменить инженерные методы проектирования и расчёта.

Цель работы

Цель работы – спроектировать центробежный компрессора для газового двигателя 8ЧН26/26, измерить его газодинамические характеристики при четырех различных частотах вращения, проверить соответствие рассчитанных CFD – методом газодинамических характеристик центробежного компрессора турбоагнетателя ДВС, характеристикам, полученным на испытательном стенде.

Объект исследования

Одним из крупнейших производителей турбоагнетателей для ДВС различного назначения в России является НПО «Турботехника». Среди текущих актуальных работ является система наддува для газового двигателя 8ЧН26/26, конвертированного из дизеля. Предварительные расчёты показали, что максимальная степень наддува не должна превышать 1,6 – 1,7. При этом нужен максимально большой диапазон производительности нагнетателя.

Лаборатория «Газовая динамика турбомашин» представляет сейчас научную школу компрессоростроения СПбПУ, основанную в 1950-60-х гг. [21]. Лаборатория имеет большой опыт проектирования центробежных компрессоров различного назначения [21–23]. В ее распоряжении имеется пакет специализированных инженерных программ расчета и проектирования центробежных компрессоров, называемый Методом универсального моделирования. Метод развивается и совершенствуется [24–26].

Сотрудники ЛГДТМ произвели оптимальное проектирование рабочего колеса с учётом стандартных размеров диффузора и улитки турбоагнетателя ТКР-140 и произвели расчёт его газодинамических характеристик в диапазоне оборотов. Сотрудники НПО «Турботехника» сконструировали, изготовили и испытали турбокомпрессор на своём экспериментальном стенде.

Проектирование центробежного компрессора ТКР 140Э

Расчётные параметры компрессора: $\bar{m}_{расч} = 0,62$ кг/с, $\pi_{расч}^* = p_k^* / p_n^* = 1,61$. При заданных оборотах турбины первый вопрос вариантного расчёта – выбор диаметра рабочего колеса. Программа вариантного расчёта и предварительного проектирования рассчитывает КПД каждого варианта по упрощённой математической модели, обобщающей результаты оптимального проектирования 2000 ступеней [27, 28]. Система алгебраических уравнений расчёта КПД: $\eta^* = f(\Phi_{расч}, \Psi_{Т расч}, \bar{D}_{вт}, M_u, k, Re_u)$.

На рис. 1 показана зависимость КПД и коэффициента расхода у вариантов компрессора ТКР 140Э при разных коэффициентах напора.

Наивысший КПД у варианта с $\Psi_{Т расч} \approx 0,47$. Для среднеоборотного двигателя с очень большим сроком службы предпочтительнее вариант рабочего колеса с возможно меньшей окружной скоростью. С целью ограничения окружной скорости был выбран вариант с большим коэффициентом напора больше оптимального, а именно $\Psi_{Т расч} = 0,572$. У этого варианта окружная скорость 300 м/с, но по вариантному расчёту КПД ниже на 0,43%, чем у оптимального варианта. Основные параметры рассчитанных и выбранного варианта представлены в табл. 1.

Для выбранного варианта программа ППЦК-Г8Р производит предварительное проектирование проточной части по алгоритму, разработанному на основании специальных исследований [27, 28]. Рассчитываются все размеры, необходимые для расчёта характеристик компрессора Методом универсального моделирования (программа РХЦК-Г9Р). На рис. 2 показаны характеристики компрессора ТК 140Э с проточной частью до оптимизации размеров и формы проточной части.

По первичному проекту КПД компрессора при заданном массовом расходе 0,62 кг/с равен 0,80. Максимальный КПД равен 0,842 при расходе 0,44 кг/с. Очевидно при оптимизации проточной части этот недостаток должен быть устранён.

Качественная оптимизация рабочего колеса производится на основании анализа диаграмм скоростей квазитрёхмерного сжимаемого невязкого течения. Программа ЗДМ.023 рассчитыва-

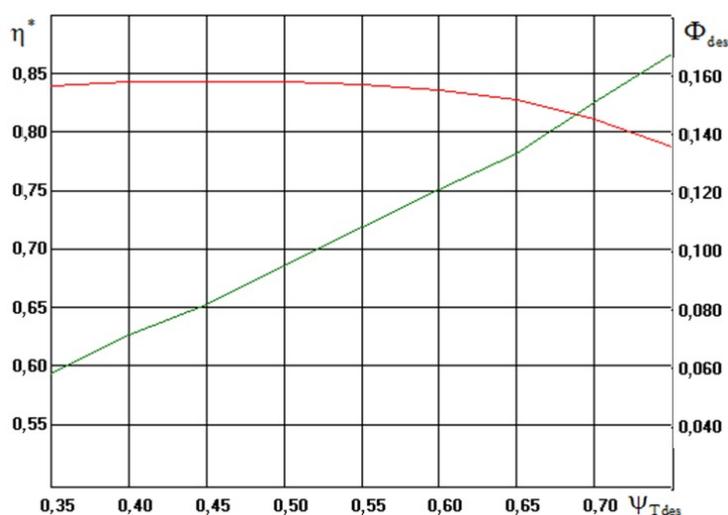


Рис. 1. Программа ППЦК-Г8Р. Вариантный расчёт ТКР 140Э. Зависимость КПД (красный) и коэффициента расхода (зеленый) от коэффициента напора

Fig. 1. PDCC-G8E program. Variant calculation of TKR 140E. Efficiency (red) and flow coefficient (green) versus the design loading factor

Таблица 1

Вариантный расчёт компрессора ТКР 140Э

Table 1

Variant calculation of the TKR 140E compressor

***** Compressor parameters *****

Flow rate, $m = .62 \text{ kg/s}$
 Outlet pressure, $P_{out} = 1.653 \text{ Atm} (1.6200E + 05 \text{ Pa})$
 Inlet pressure, $P_{in} = 1.020 \text{ Atm} (1.0000E + 05 \text{ Pa})$
 Inlet temperature, $T_{in} = 283.00 \text{ K}$

***** Gas parameters *****

Isentropic coefficient, $k = 1.4000$
 Gas constant, $R = 287.00 \text{ J/kg/K}$
 Dynamic viscosity coefficient, $\mu = 1.7000E-05 \text{ n*s/m}^2$

***** Loading factor optimization *****

PSIT	ETAcomp	ETA1st	ETAlast	Nconsumpt	D2	F1st	Flast	Vbody	U2
Number of stages = 1									
0.3500	0.8396	0.8396	0.8396	3.150E+01	0.1735	0.0573	0.0573	1.760E-02	371.9
0.4000	0.8426	0.8426	0.8426	3.130E+01	0.1617	0.0707	0.0707	1.640E-02	346.6
0.4500	0.8436	0.8436	0.8436	3.130E+01	0.1545	0.0812	0.0812	1.560E-02	331.1
0.5000	0.8435	0.8435	0.8435	3.130E+01	0.1469	0.0943	0.0943	1.480E-02	314.9
0.5500	0.8412	0.8412	0.8412	3.150E+01	0.1406	0.1075	0.1075	1.420E-02	301.4
0.6000	0.8362	0.8362	0.8362	3.180E+01	0.1355	0.1203	0.1203	1.370E-02	290.3
0.6500	0.8283	0.8283	0.8283	3.220E+01	0.1312	0.1324	0.1324	1.320E-02	281.2
0.7000	0.8110	0.8110	0.8110	3.310E+01	0.1258	0.1502	0.1502	1.270E-02	269.7
0.7500	0.7871	0.7871	0.7871	3.310E+01	0.1216	0.1666	0.1666	1.230E-02	260.5
0.8000	0.7850	0.7850	0.7850	3.540E+01	0.1217	0.1661	0.1661	1.230E-02	260.8

Maximum of efficiency = 0.8436 (Nuber of stages = 1, PSIt = 0.45)
 Minimum of body volume = 1.226E - 02 (Nuber of stages = 1, PSIt = 0.75)

***** Selected variant *****

#	Stage	F	Mu	D2	Dhb	PSIt	Reu	ETA
1	3D + VLD	0.1132	0.8787	0.1382	0.3200	0.5720	2.970E + 06	0.8393

Compressor efficiency, $\eta_{Tc} = 0.8393$
 RPM, $n = 40933.00 \text{ 1/min}$
 Power consumption, $N = 31.59 \text{ kW}$
 Tip speed, $U2 = 296.29 \text{ m/s}$

ет меридиональное течение методом квазиортогоналей. На осесимметричных поверхностях тока расчёт производится методом интегральных уравнений. Преимущество метода – расчёт обтекания входной и выходной кромки лопаток, что невозможно при расчёте методом сеток.

Диаграммы скоростей на периферийной линии тока в рабочем колесе по предварительному проекту и после оптимизации представлены на рис. 3а и 3б соответственно.

По предварительному проекту размеры входа в рабочее колесо (РК) недостаточные. Поток входит с отрицательным углом атаки, что снижает КПД. После оптимизации этот и другие недостатки устранены. В соответствии с рекомендациями [29, 30], выходной угол лопаток $\beta_{n2} = f(b_2)$

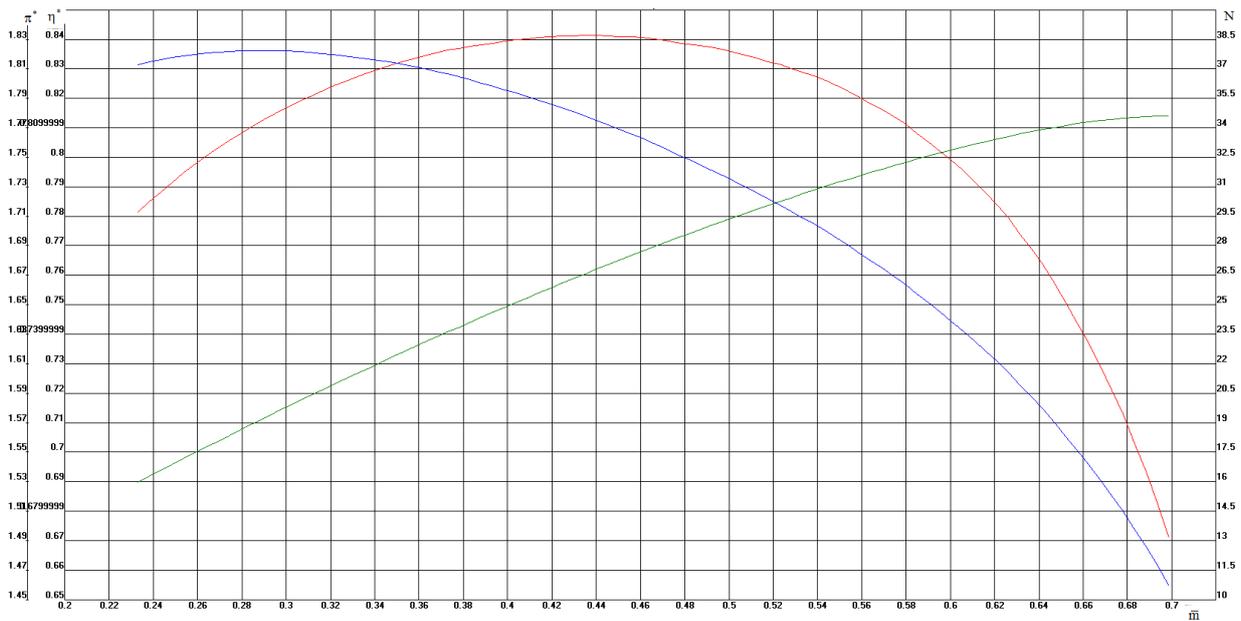


Рис. 2. Программа РХЦК-Г9Р. Характеристики компрессора 140Э с проточной частью по первичному проекту (красный – КПД компрессора, синий – отношение давлений по полным параметрам, зеленый – мощность)

Fig. 2. CCPC-G9E program. Characteristics of the TKR140E compressor with a flow path according to the primary design (red – compressor efficiency, blue – total pressure ratio, green – power)

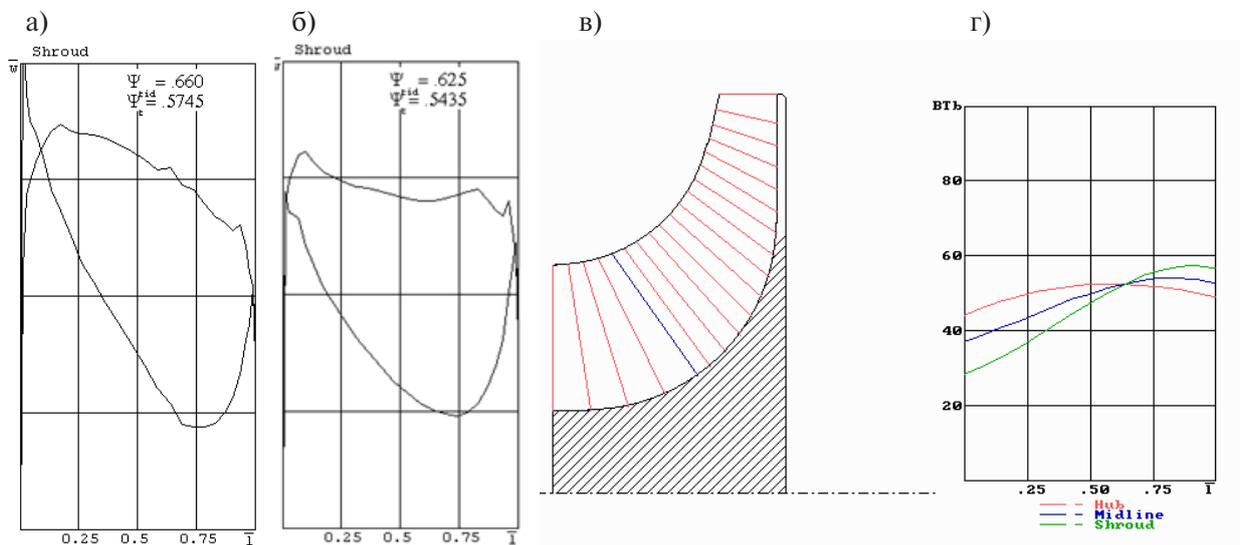


Рис. 3. Программа 3ДМ.023. Диаграммы скоростей на периферийной линии тока в рабочем колесе компрессора ТКР 140Э. а) по предварительному проекту, б) после оптимизации размеров рабочего колеса и формы лопаток. Программа 3ДМ.023 в) меридиональный контур рабочего колеса, г) лопаточные углы на трёх ОПТ

Fig. 3. Program 3DM.023. Velocity diagrams on the shroud streamline in the impeller of the TKR 140E compressor. а) according to the primary design, б) after optimizing the impeller sizes and blade shape. Program 3DM.023 в) the meridional contour of the impeller, г) blade angles on three blade-to-blade surfaces

увеличивается от основного к покрывающему диску. По рекомендациям [31] выходная кромка наклонена в сторону вращения. Отрицательный угол навала $\chi_2 = -15^\circ$. Форма средней линии лопаток ОРК $\beta_{ns} = f(\bar{l}_m)$ принята с двойкой кривизной, это необходимо для устранения «седловины» на диаграмме скоростей на периферийной поверхности тока. Схема окончательного варианта ОРК компрессора 140Э в меридиональной плоскости и лопаточные углы на трёх ОПТ представлены на рисунке 3в и 3г соответственно.

Окончательный вариант рабочего колеса компрессора ТКР 140Э согласован с размерами стандартного компрессора ТКР 140 НПО «Турботехника».

Сопоставление действительных и проектных характеристик ТКР 140Э

НПО «Турботехника» изготовило и испытало два варианта ТКР 140Э. В корпусе стандартного ТКР 140 было установлено рабочее колесо по проекту лаборатории «Газовая динамика турбомашин», представленному выше, с диаметром 175 мм (ТКР 175Э). Испытания ТКР 175Э носили предварительный характер с целью проверки напорной характеристики.

Основной вариант ТКР 140Э имел рабочее колесо по проекту лаборатории «Газовая динамика турбомашин» с диаметром 140 мм с неподвижными элементами надлежащего размера. Продольный разрез турбокомпрессора ТКР 140Э представлен на рис. 4.

Испытания компрессоров производились на стенде НПО «Турботехника», представленном на рис. 5 (сверху).

Компрессор ТКР-175Э был испытан с неподвижными элементами стандартного ТКР-140 с БЛД и улиткой, имеющими недостаточные размеры. Внешний вид компрессора ТКР-175Э представлен на рис. 5 (снизу).

Испытание ТКР 175Э подтвердило проектную характеристику коэффициента внутреннего напора. Но характеристики КПД и коэффициента политропного напора не были удовлетворительными при средних и больших расходах из-за несоответствия проходных сечений рабочего колеса и неподвижных элементов.

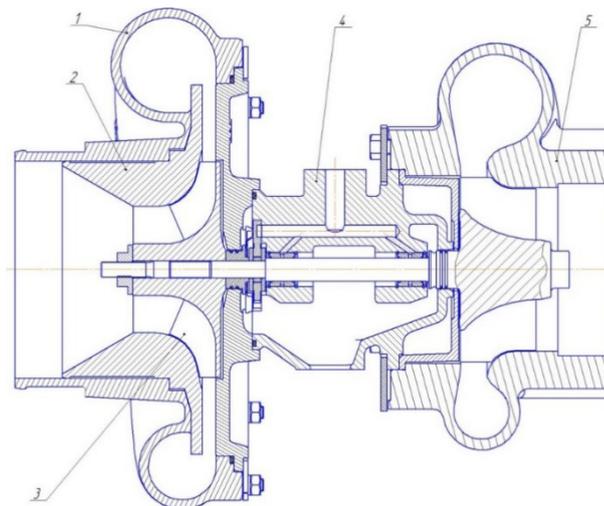


Рис. 4. Продольный разрез турбокомпрессора ТКР 140Э.

1 – корпус компрессора; 2 – вставка; 3 – рабочее колесо компрессора; 4 – корпус подшипников; 5 – турбина

Fig. 4. Sectional drawing of the turbocharger TKR 140E.

1 – compressor housing; 2 – insert; 3 – compressor impeller; 4 – bearing housing; 5 – turbine



Рис. 5. Сверху – стенд испытаний турбокомпрессоров НПО «Турботехника».
Снизу – внешний вид компрессора ТКР-175Э

Fig. 5. Top – Test rig for turbocompressors in NPO "Turbotekhnika".
Below – Compressor TKR-175E view

У компрессора ТКР-140Э размеры рабочего колеса и неподвижных элементов соответствуют друг другу. Рассчитанные и измеренные газодинамические характеристики компрессора ТКР-140Э представлены на рис. 6. Испытания проведены при $M_u = 0,437, 0,5836, 0,7280, 0,8739$.

В расчётной точке с $\bar{m}_{расч} = 0,62$ кг/с при проектной окружной скорости $u_2 = 300$ м/с заданное отношение давлений обеспечено практически точно. Подтвержден ожидаемый КПД. Математическая модель несколько завышает КПД и отношение давлений на нерасчетных режимах. Математическая модель рассчитывает КПД на расчетном режиме для всех испытаний со среднеквадратическим отклонением 0,89%, а КПД по характеристике в целом со среднеквадратическим отклонением 1,55%.

Проведение CFD-расчетов

Совокупный опыт авторов [32, 33, 34] показывает, что CFD- расчёты центробежных компрессорных ступеней и промышленных центробежных компрессоров, одноступенчатых и многоступенчатых, показывает приблизительно схожие результаты: коэффициент теоретического напора завышается на 7-10%, характеристики КПД смещаются в сторону больших расходов приблизительно на 15%. При расчетах анализировалось влияние типа интерфейса, модели турбулентности, густоты расчетной сетки и т.д.

В результате были выработаны рекомендации о том, какая постановка расчета дает наилучший результат, однако даже он не удовлетворял требованиям практической инженерной применимости. Авторы работы применили весь накопленный ранее опыт проведения CFD-расчетов с целью определить, покажет ли расчёт центробежного компрессора турбоагрегата ДВС лучшие результаты по сравнению с теми, что были получены ранее.

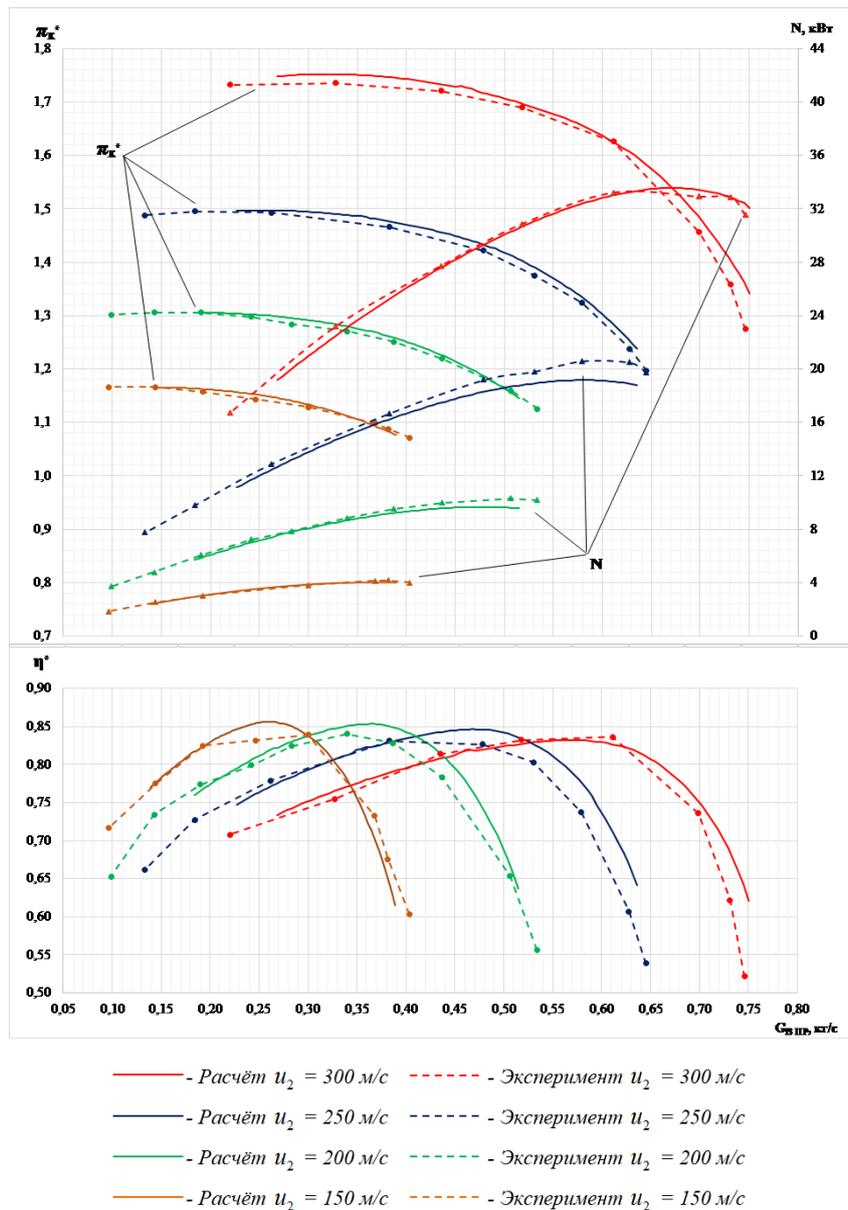


Рис. 6. Сравнение проектных и действительных характеристик компрессора ТКР 140Э при окружной скорости $u_2 = 150, 200, 250$ и 300 м/с
 Fig. 6. Comparison of design and actual characteristics of the TKR 140E compressor at blade velocity $u_2 = 150, 200, 250$ and 300 m/s

Так как испытания ТКР-175Э носили предварительный характер, его газодинамические характеристики не моделировались. Объектом исследования стал компрессор ТКР 140Э, рассчитанный вместе с входным патрубком и частью трубопровода за улиткой.

Для расчёта газодинамических характеристик компрессора использовалась система численного моделирования ANSYS CFX. Расчётная модель строится в виде конечного числа расчётных ячеек, описывающих геометрически проточную область с заданной степенью дискретизации. Сеточная модель проточной части модельной ступени приведена на рис. 7 (сверху).

При построении сеточной модели использовались структурированная схема с гексагональными элементами для входного устройства, рабочего колеса и диффузора, и неструктурированная

гибридная сетка для улитки. Для учета пограничного слоя к границам, определяющим стенки проточной части задавалось сгущение, необходимое для удовлетворения требованиям моделей турбулентности и пристеночным функциям. Размер первой пристеночной ячейки варьируется в диапазоне 10-50 мкм. Коэффициент увеличения размера 1,2-1,5. Общее количество расчётных ячеек составило ~14 886 000.

Для выполнения численного моделирования расчётная область разделялась на три домена: входной патрубок, рабочее колесо и диффузор с улиткой. При этом для входного патрубка и диффузора с улиткой уравнения решаются в неподвижной системе координат, тогда как для рабочего колеса уравнения записываются во вращающейся системе координат.

Для сопряжения газодинамических параметров на границе рабочего колеса и диффузора используются специальные условия интерфейса типа «Stage», которое предполагает осреднение параметров потока по окружному направлению на границе с областью, располагающейся выше по потоку.

В качестве граничных условий для всех расчётных случаев на входном патрубке задаётся полное давление и температура. На границе выхода устанавливается массовый расход. Стенки считаются адиабатическими.

Расчёт выполняется в предположении установившегося режима течения. CFD – расчёты выполнены для трех частот вращения: $n = 20760$ об/мин, 27900 об/мин и 41400 об/мин. На рис. 7 (снизу) показаны скорости и давления в рабочем колесе на режиме максимального КПД при $n = 20760$ об/мин. на средней линии тока.

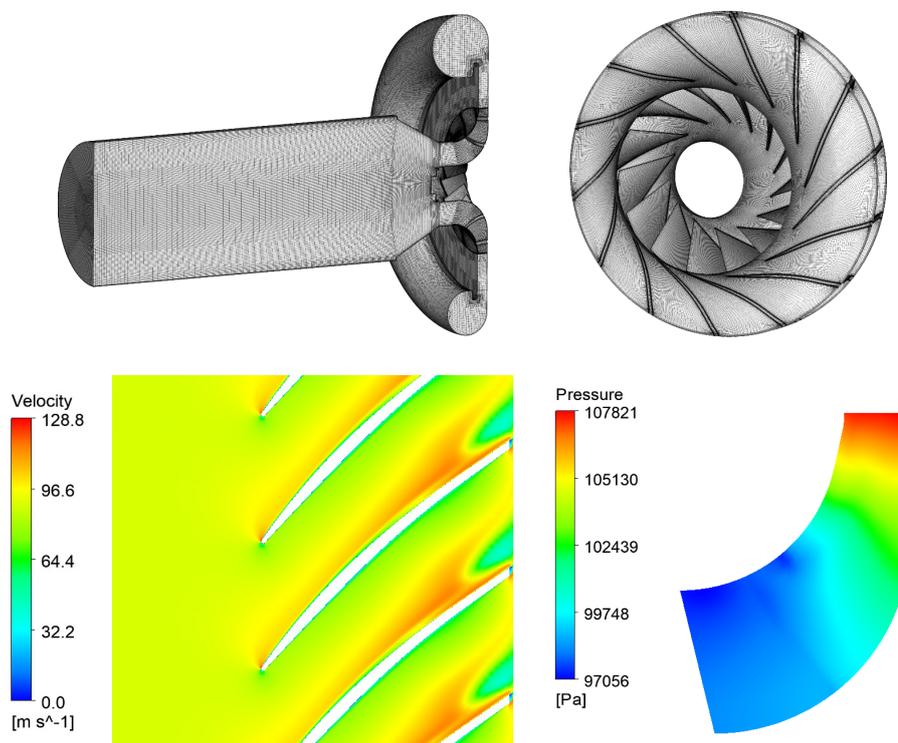


Рис. 7. Сверху - сеточная модель проточной части компрессора;
Снизу – распределение скорости и давления в рабочем колесе ТКР 140Э.
 $n = 20760$ об/мин, средняя линия тока, массовый расход – 0,3 кг/с

Fig. 7. Top- Grid model of the compressor flow path;
Below – Distribution of velocity and pressure in the TKR 140E impeller.
 $n = 20760$ rpm, middle streamline, mass flow rate – 0.3 kg/s

Рассчитанная картина соответствует представлениям о движении газа в рабочих колёсах подобного типа. Судя по маленькой зоне повышенной скорости на задней поверхности у входной кромки, на оптимальном режиме имеет место небольшой положительный угол атаки. Несмотря на развитую зону срыва на выходе из колеса, измеренный КПД довольно высок для малоразмерного компрессора.

Обсуждение результатов.

Сопоставление измеренных и рассчитанных характеристик

Сопоставление рассчитанных и измеренных газодинамических характеристик показали следующее: как и в других подобных случаях, CFD – расчёт зависил внутренний напор на 10 – 12%. Характеристики КПД показаны на рис. 8 (сверху). Среднеквадратическое отклонение между экспериментальными КПД и результатами CFD-расчетов – 18,8%, для коэффициента внутреннего напора среднеквадратическое отклонение – 12,2%.

В отличие от рассчитанных характеристик других компрессоров [32, 33, 34], в данном случае измеренные и рассчитанные характеристики лежат примерно в одном диапазоне расходов. Необычно то, что рассчитанный КПД намного ниже измеренного, особенно при $n = 20760$ об/мин.

В случаях, когда измеренный КПД ниже, чем по расчёту, сомнение вызывает измеренный КПД. Это связано с тем, что определение внутреннего напора по повышению температуры газа в компрессоре может быть сопряжено с ошибками. Более надёжно измерение отношения давлений, по которому рассчитан коэффициент политропного напора – рис. 8 (снизу).

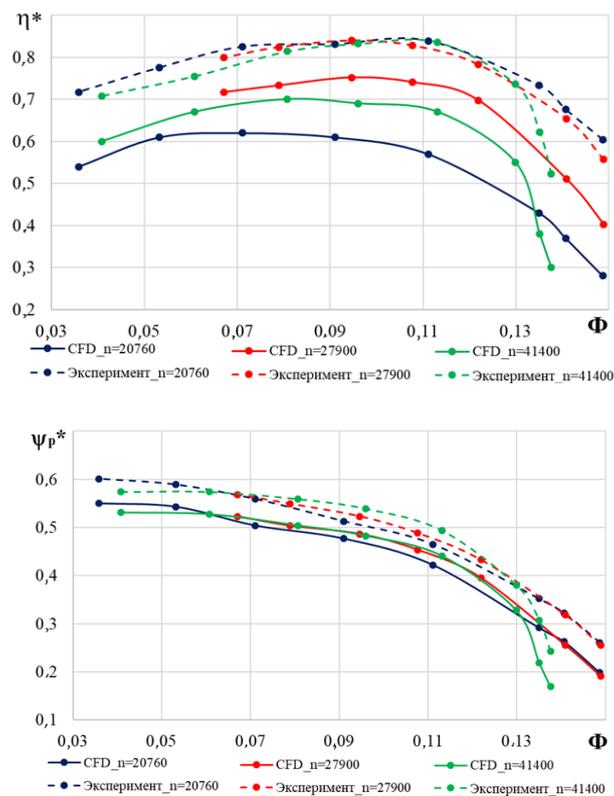


Рис. 8. Сверху – зависимость политропного КПД ТКР 140Э от условного коэффициента расхода
Снизу – характеристики коэффициента политропного напора ТКР 140Э

Fig. 8. Top – Characteristics of the polytropic efficiency of TKR 140E versus the flow rate coefficient;
Below – Characteristics of the polytropic work coefficient TKR 140E

В данном случае рассчитанные характеристики более логичны. Чем больше обороты, тем выше коэффициент напора. Это известное проявление сжимаемости газа. Несмотря на то, что по расчёту коэффициент внутреннего напора (коэффициент, характеризующий механическую работу, подведённую к газу) больше измеренного, рассчитанный коэффициент полезной работы меньше наверняка корректно измеренной величины Ψ_n^* . Величине измеренного КПД можно доверять.

Заключение

Проведённая работа ещё раз показала, что CFD-расчёты пока не являются надёжным средством расчёта характеристик компрессоров. Инженерные методы, Метод универсального моделирования и подобные, всё ещё незаменимы и заслуживают внимания и совершенствования. В данном случае, Метод универсального моделирования подтвердил свою эффективность и позволил создать эффективный компрессор турбонаддува и достаточно точно рассчитать его характеристики в требуемом диапазоне оборотов ротора.

Расчеты проводились с использованием суперкомпьютерного центра «Политехнический» СПбПУ. Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых кандидатов наук МК-1893.2020.8.

Условные обозначения

\bar{b} – относительная высота лопаток; \bar{D} – относительный диаметр; k – показатель изоэнтропы; M_u – условное число Маха; m – массовый расход; p – давление; Re_u – условное число Рейнольдса; n – частота вращения ротора; u – окружная скорость; β_d – угол лопатки; Φ – условный коэффициент расхода; η – коэффициент полезного действия; Ψ_T – коэффициент теоретического напора; χ_2 – угол навала лопатки на выходе; Ψ_n^* – коэффициент политропного напора; π – отношение давлений.

Подстрочные индексы

2 – индексы контрольных сечений; вт – втулка; к – конечное; н – начальное; расч – расчетный.

Надстрочные индексы

* – относится к полным параметрам (параметры торможения).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Harley P.** Meanline modeling of inlet recirculation in automotive turbocharger centrifugal compressors / P. Harley, S. Spence, D. Filsinger, M. Dietrich, J. Early / Journal of Turbomachinery JANUARY 2015, Vol. 137 / 011007-1, DOI: 10.1115/1.4028247
- [2] **Aungier R.H.** 2000, “Centrifugal Compressors: A Strategy for Aerodynamic Design and Analysis”, ASME Press, ISBN 0-7918-0093-8, New York, USA.
- [3] **Weber C.R., Koronowski M.E.** 1986, “Meanline Performance Prediction of Volute in Centrifugal Compressors”, ASME Conference Proceedings, New York, USA, 86-GT-216.
- [4] **Harley P.** Experimental and numerical benchmarking of an improved meanline modelling method for automotive turbocharger centrifugal compressors. / P. Harley, S. Spence, D. Filsinger, M. Dietrich, J. Early / Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition GT2015, June 15 – 19, 2015, Montréal, Canada.
- [5] **Abel M.** 3D computational analysis of a compressor for heavy duty truck engine turbochargers. / M. Abel, P. Newton, R.F. Martinez-Botas, M. Wöhr, M. Müller, J. Leweux / Proceedings of ASME Turbo Expo 2018. Turbomachinery Technical Conference and Exposition. June 11 – 15, 2018, Oslo.

- [6] **Bi Q.** Design method and performance effects of curvature smooth centrifugal compressor blades /Qingzhen Bi, Hua Chen, Ding Tong ,Yaoan Lu and Xueqi Zou/ Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition GT2015 June 15 – 19, 2015, Montréal, Canada GT2015-43145.
- [7] **Kabalyk K., Kryłłowicz W.** “Numerical modeling of the performance of a centrifugal compressor impeller with low inlet flow coefficient”, Transactions of the institute of fluid-flow machinery, 131, 2016, pp. 41–53.
- [8] **Kryłłowicz W.** Technical and Aerodynamical Aspects of a High Pressure Synthesis Gas Turbocompressor Modernization. / Kryłłowicz W., Świder P., Kozanecki Z., Kabalyk K., Kozanecki Jr Z. / 12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, April 3 – 7, 2017, Stockholm, Sweden.
- [9] **Marechale R.** Experimental and numerical investigation of labyrinth seal clearance impact on centrifugal impeller performance. /Russell Marechale, Min Ji, Michael Cave/ Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition GT2015 June 15 – 19, 2015, Montréal, Canada GT2015-43778.
- [10] **Matas R.** Numerical and experimental modelling of the centrifugal compressor stage – setting the model of impellers with 2D blades. / R. Matas, T. Syka, O. Lunacek / EPJ Web of Conferences 11th International Conference on Experimental Fluid Mechanics Volume 143, 02073 (2017). DOI: 10.1051/epjconf/201714302073 Czech Republic; 15 – 18 November 2016.
- [11] **Hazby H.** The design of a family of process compressor stages. / H. Hazby, M. Casey, C. Robinson, R. Spataro / Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics ETC12, April 3 – 7, 2017; Stockholm, Sweden Paper ID: ETC2017-134.
- [12] **Matas R.** Experimental investigation and numerical modelling of 3D radial compressor stage and influence of the technological holes on the working characteristics. / R. Matas, T. Syka, L. Hurda / EPJ Web of Conferences 180, 02060 (2018) <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818002060> EFM 2017.
- [13] **Syka T.** Numerical and experimental modelling of the radial compressor stage / T. Syka, R. Matas, O. Luňáček / AIP Conference Proceedings 1745, 020059 (2016); DOI: 10.1063/1.4953753
- [14] **Le P.** Sausse CFD comparison with centrifugal compressor measurements on a wide operating range. / P. Le Sausse, P. Fabrie, D. Arnou, and F. Clunet/ EPJ Web of Conferences, Volume 45 (2013) DOI: 10.1051/epjconf/20134501059
- [15] **Xinqian Z.** Criteria for the Matching of Inlet and Outlet Distortions in Centrifugal Compressors. / Z. Xinqian, Z. Meijie / Applied Thermal Engineering Volume 131, 25 February 2018, P. 933–946.
- [16] **Elfert M.** Experimental and numerical verification of an optimization of a fast rotating high performance radial compressor impeller. / M. Elfert, A. Weber, D. Wittrock, A. Peters, C. Voss, E. Nicke/ Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2016 June 13 – 17, 2016, Seoul, South Korea GT2016-56546.
- [17] **Kowalski S.C.** Centrifugal stage performance prediction and validation for high mach number applications. / S.C. Kowalski, J.E. Pacheco, S. Fakhri, J.M. Sorokes / Proceedings of the Forty-First Turbomachinery Symposium September 24 – 27, 2012, Houston, Texas.
- [18] **Shahin I.** Unsteady CFD simulation for high speed centrifugal compressor operating near surge / I. Shahin, M. Gadala, M. Alqaradawi, O. Badr/ Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition GT2014 June 16 – 20, 2014, Düsseldorf, Germany GT2014-27336.
- [19] **Bourgeois J.A.** Single passage detached eddy simulation of a centrifugal compressor stage using the time transformation method. / J.A. Bourgeois, J.C. Nichols, G.H. Watson, R.J. Martinuzzi / Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition GT2015 June 15 – 19, 2015, Montréal, Canada GT2015-44131.
- [20] **Dombard J.** Large eddy simulations in a transonic centrifugal compressor. /J. Dombard, F. Duchaine, L. Gicquel, G. Staffelbach, N. Buffaz, I. Trebinjac/ Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2018 June 11 – 15, 2018, Oslo, Norway.
- [21] Труды научной школы компрессоростроения СПбГПУ. [текст] / Под редакцией Галеркина Ю.Б. //– М.: Изд. «КХТ» – 2010.

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

[23] **Галеркин Ю.Б.** Турбокомпрессоры. Рабочий процесс, расчёт и проектирование проточной части. [текст] / Ю.Б. Галеркин // М.: ООО «Информационно-издательский центр «КХТ». – 2010. 596 с.

[24] **Галеркин Ю.Б.** Моделирование рабочего процесса промышленных центробежных компрессоров. Научные основы, этапы развития, современное состояние. Монография. [текст] / Ю.Б. Галеркин, К.В. Солдатова // Издательство Политехнического университета, 2011. – С. 327.

[25] **Seleznev K.P., Galerkin Y.B.** Mathematical Modelling of Performance Characteristics and Optimization of Turbomachine Stades. Труды международноу конгресса по газовым турбинам. Токио. Япония. – 1983.

[26] **Rekstin A.F., Drozdov A.A., Solovyeva O.A., Galerkin Y.B.** Two mathematical models centrifugal compressor stage vaneless diffuser comparison. – Oil and Gas Engineering (OGE-2018). – AIP Conf. Proc. 2007. – Omsk. – Russia. – 2018. – 030035-1–030035-12; <https://doi.org/10.1063/1.5051896>

[27] **Rekstin A.F., Soldatova K.V., Galerkin Yu.B.** Experience of application the computer program based on a simplified mathematical model for industrial centrifugal compressors candidates. International Conference on Compressors and their Systems 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 604 (2019) 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012045

[28] **Rekstin A., Popova E., Ucehovscy A.** Centrifugal compressor stages efficiency analysis by means of the approximate algebraic equations. – Oil and Gas Engineering (OGE-2018). – AIP Conf. Proc. 2007. – Omsk. – Russia. – 2018. – 030036-1–030036-11; <https://doi.org/10.1063/1.5051897>

[29] **Galerkin Y.** Centrifugal compressor stage design principles checking. [Electronic] / Y. Galerkin, A. Drozdov // ASME 2015 Gas Turbine India Conference. – Hyderabad – 2015.

[30] **Галеркин Ю.Б.** Конструирование и оптимизация центробежной компрессорной ступени с осерадiallyм рабочим колесом при помощи инженерного метода проектирования [текст] / Ю.Б. Галеркин, А.А. Дроздов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб., 2015. – № 4(231): Наука и образование. – С. 179–188 : ил. – (Машиностроение). – ISSN 1994-2354.

[31] **Дроздов А.А.** Метод проектирования центробежных компрессоров с осерадiallyми рабочими колесами // Дис... канд. техн. наук. – СПбПУ. – 2016. – С. 236.

[32] **Боровков А.И., Воинов 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

[33] **Боровков А.И., Воинов 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

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

E-mail: vicerektor.ap@spbstu.ru

ВОИНОВ Игорь Борисович – начальник отдела, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: voinov@compmechlab.com

ГАЛЕРКИН Юрий Борисович – Заведующий лабораторией, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: yuri_galerkin@mail.ru

КАМИНСКИЙ Роман Валерьевич – Руководитель организации, АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ "ТУРБОТЕХНИКА", без степени.

E-mail: design@kamturbo.ru

ДРОЗДОВ Александр Александрович – ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: a_drozdi@mail.ru

СОЛОВЬЁВА Ольга Александровна – Старший преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: Solovyeva.OA@yandex.ru

СОЛДАТОВА Кристина Валерьевна – студент, Мельбурнский политехнический институт, д-р техн. наук.

E-mail: buck02@list.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 03.11.2020

REFERENCES

[1] **P. Harley**, Meanline modeling of inlet recirculation in automotive turbocharger centrifugal compressors / P. Harley, S. Spence, D. Filsinger, M. Dietrich, J. Early / Journal of Turbomachinery JANUARY 2015, Vol. 137 / 011007-1, DOI: 10.1115/1.4028247

[2] **R.H. Aungier**, 2000, "Centrifugal Compressors: A Strategy for Aerodynamic Design and Analysis", ASME Press, ISBN 0-7918-0093-8, New York, USA.

[3] **C.R. Weber, M.E. Koronowski**, "Meanline Performance Prediction of Volute in Centrifugal Compressors", ASME Conference Proceedings, New York, USA, 86-GT-216. 1986.

[4] **P. Harley**, Experimental and numerical benchmarking of an improved meanline modelling method for automotive turbocharger centrifugal compressors / P. Harley, S. Spence, D. Filsinger, M. Dietrich, J. Early / Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition GT2015, June 15 – 19, 2015, Montréal, Canada.

[5] **M. Abel**, 3D computational analysis of a compressor for heavy duty truck engine turbochargers / M. Abel, P. Newton, R. F Martinez-Botas, M. Wöhr, M. Müller, J. Leweux / Proceedings of ASME Turbo Expo 2018. Turbomachinery Technical Conference and Exposition. June 11 – 15, 2018, Oslo.

[6] **Q. Bi**, Design method and performance effects of curvature smooth centrifugal compressor blades / Qingzhen Bi, Hua Chen, Ding Tong, Yaoan Lu and Xueqi Zou / Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition GT2015 June 15 – 19, 2015, Montréal, Canada GT2015-43145.

[7] **K. Kabalyk, W. Krylowicz**, "Numerical modeling of the performance of a centrifugal compressor impeller with low inlet flow coefficient", Transactions of the institute of fluid-flow machinery, 131, 2016, pp. 41–53.

[8] **W. Krylowicz**, Technical and Aerodynamical Aspects of a High Pressure Synthesis Gas Turbocompressor Modernization. / Krylowicz W., Świder P., Kozanecki Z., Kabalyk K., Kozanecki Jr Z. / 12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, April 3 – 7, 2017, Stockholm, Sweden.

[9] **R. Marechale**, Experimental and numerical investigation of labyrinth seal clearance impact on centrifugal impeller performance / Russell Marechale, Min Ji, Michael Cave / Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition GT2015 June 15 – 19, 2015, Montréal, Canada GT2015-43778.

[10] **R. Matas**, Numerical and experimental modelling of the centrifugal compressor stage – setting the model of impellers with 2D blades / R. Matas, T. Syka, O. Lunacek / EPJ Web of Conferences 11th International Conference on Experimental Fluid Mechanics Volume 143, 02073 (2017) DOI: 10.1051/epjconf/201714302073 Czech Republic; 15 – 18 November 2016.

[11] **H. Hazby**, The design of a family of process compressor stages. / H. Hazby, M. Casey, C. Robinson, R. Spataro / Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics ETC12, April 3 – 7, 2017; Stockholm, Sweden Paper ID: ETC2017-134.

[12] **R. Matas**, Experimental investigation and numerical modelling of 3D radial compressor stage and influence of the technological holes on the working characteristics / R. Matas, T. Syka, L. Hurda / EPJ Web of Conferences 180, 02060 (2018) <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818002060> EFM 2017.

[13] **T. Syka**, Numerical and experimental modelling of the radial compressor stage / T. Syka, R. Matas, O. Luňáček / AIP Conference Proceedings 1745, 020059 (2016); DOI: 10.1063/1.4953753

[14] **P. Le**, Sausse CFD comparison with centrifugal compressor measurements on a wide operating range. / P. Le Sausse, P. Fabrie, D. Arnou, and F. Clunet / EPJ Web of Conferences, Volume 45 (2013) DOI: 10.1051/epjconf/20134501059

[15] **Z. Xinqian**, Criteria for the Matching of Inlet and Outlet Distortions in Centrifugal Compressors. / Z. Xinqian, Z. Meijie / Applied Thermal Engineering Volume 131, 25 February 2018, P. 933–946.

[16] **M. Elfert**, Experimental and numerical verification of an optimization of a fast rotating high performance radial compressor impeller / M. Elfert, A. Weber, D. Wittrock, A. Peters, C. Voss, E. Nicke / Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2016 June 13 – 17, 2016, Seoul, South Korea GT2016-56546.

[17] **S.C. Kowalski**, Centrifugal stage performance prediction and validation for high mach number applications / S. C. Kowalski, J. E. Pacheco, S. Fakhri, J. M. Sorokes / Proceedings of the Forty-First Turbomachinery Symposium September 24 – 27, 2012, Houston, Texas.

[18] **I. Shahin**, Unsteady CFD simulation for high speed centrifugal compressor operating near surge / I. Shahin, M. Gadala, M. Alqaradawi, O. Badr / Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition GT2014 June 16 – 20, 2014, Düsseldorf, Germany GT2014-27336.

[19] **J.A. Bourgeois**, Single passage detached eddy simulation of a centrifugal compressor stage using the time transformation method / J.A. Bourgeois, J.C. Nichols, G.H. Watson, R.J. Martinuzzi / Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition GT2015 June 15 – 19, 2015, Montréal, Canada GT2015-44131.

[20] **J. Dombard**, Large eddy simulations in a transonic centrifugal compressor. / J. Dombard, F. Duchaine, L. Gicquel, G. Staffelbach, N. Buffaz, I. Trebinjac / Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2018 June 11 – 15, 2018, Oslo, Norway.

[21] Trudy nauchnoy shkoly kompressorostroyeniya SPbGPU (Proceedings of the scientific school of compressor engineering SPbGPU). [tekst] / Pod redaktsiyey Galerkina Yu.B. //– M.: Izd. «KKhT» – 2010.

[22] **Yu.S. Vasilyev**, Vysokoeffektivnyye tsentrobezhnyye kompressory novogo pokoleniya. Nauchnyye osnovy rascheta, razrabotka metodov optimalnogo proyektirovaniya i osvoyeniye proizvodstva (High-performance centrifugal compressors of the new generation. Scientific basis of calculation, development of optimal design methods and production development) / Yu.S. Vasilyev, P.I. Rodionov P.I., M.I. Sokolovskiy // Nauka i promyshlennost Rossii. – № 10-11. – 2000. – M. – S. 78–85.

[23] **Yu.B. Galerkin**, Turbokompressory. Rabochiy protsess, raschet i proyektirovaniye protochnoy chasti (Turbocompressors. Workflow, calculation and design of the flow section). [tekst] / Yu.B. Galerkin // M.: OOO «Informatsionno-izdatelskiy tsentr «KKhT». – 2010. 596 s.

[24] **Yu.B. Galerkin**, Modelirovaniye rabocheho protsessa promyshlennykh tsentrobezhnykh kompressorov. Nauchnyye osnovy, etapy razvitiya, sovremennoye sostoyaniye (Simulation of the working process of industrial centrifugal compressors. Scientific basis, stages of development, current state). Monografiya. [tekst] / Yu.B. Galerkin, K.V. Soldatova // Izdatelstvo Politekhnicheskogo universiteta, 2011. — S. 327.

[25] **K.R. Seleznev, Yu.B. Galerkin**, Mathematical Modelling of Performance Characteristics and Optimization of Turbomachine Stades. Trudy mezhdunarodnoyu kongressa po gazovym turbinam. Tokio. Yaponiya. — 1983.

[26] **A.F. Rekstin, A.A. Drozdov, O.A. Solovyeva, Yu.B. Galerkin**, Two mathematical models centrifugal compressor stage vaneless diffuser comparison. — Oil and Gas Engineering (OGE-2018). — AIP Conf. Proc. 2007. — Omsk. — Russia. — 2018. — 030035-1–030035-12; <https://doi.org/10.1063/1.5051896>

[27] **A.F. Rekstin, K.V. Soldatova, Yu.B. Galerkin**, Experience of application the computer program based on a simplified mathematical model for industrial centrifugal compressors candidates. International Conference on Compressors and their Systems 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 604 (2019) 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012045

[28] **A. Rekstin, E. Popova, A. Ucehovscy**, Centrifugal compressor stages efficiency analysis by means of the approximate algebraic equations. — Oil and Gas Engineering (OGE-2018). — AIP Conf. Proc. 2007. — Omsk. — Russia. — 2018. — 030036-1–030036-11; <https://doi.org/10.1063/1.5051897>

[29] **Yu.B. Galerkin**, Centrifugal compressor stage design principles checking. [Electronic] / Y. Galerkin, A. Drozdov, // ASME 2015 Gas Turbine India Conference. — Hyderabad — 2015.

[30] **Yu.B. Galerkin**, Konstruirovaniye i optimizatsiya tsentrobezhnoy kompressornoy stupeni s oseradialnym rabochim kolesom pri pomoshchi inzhenernogo metoda proyektirovaniya (Design and optimization of a centrifugal compressor stage with 3D impeller using the engineering design method) [tekst] / Yu.B. Galerkin, A.A. Drozdov // Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. — SPb., 2015. — № 4(231): Nauka i obrazovaniye. — S. 179–188: il. — (Mashinostroyeniye). — ISSN 1994-2354.

[31] **A.A. Drozdov**, Metod proyektirovaniya tsentrobezhnykh kompressorov s oseradialnymi rabochimi kolesami (Design method for centrifugal compressors with 3D impellers) // Dis... kand. tekhn. nauk. — SPbPU. — 2016. — S. 236.

[32] **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 (Questions of gas dynamic characteristics modeling on the example of a model stage of a centrifugal compressor) // Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2018. T. 24, № 2. S. 44–57. DOI: 10.18721/JEST.24.2018.4

[33] **A.I. Borovkov, I.B. Voinov, A.F. Rekstin, B.V. Bakayev**, Modelirovaniye kharakteristik dvukhstupenchatogo tsentrobezhnogo kompressora gazoperekachivayushchego agregata (Simulation of characteristics of a two-stage centrifugal compressor of a gas-pumping unit) // Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2019. T. 25, № 2. S. 87–104. DOI: 10.18721/JEST.25207

[34] **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. (Modeling of characteristics of a single-stage centrifugal compressor of a gas-pumping unit) // Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2018. T. 24, № 3. S. 153–175. DOI: 10.18721/JEST.240313

THE AUTHORS

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

VOINOV Igor' B. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: voinov@compmechlab.com

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

KAMINSKIY Roman V. – *JOINT-STOCK COMPANY "SCIENTIFIC-PRODUCTION ASSOCIATION "TURBOTEHNIKA".*
E-mail: design@kamturbo.ru

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

SOLOVYEVA Olga A. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: Solovyeva.OA@yandex.ru

SOLDATOVA Kristina V. – *Melbourne Polytechnic Institute.*
E-mail: buck02@list.ru

Received: 03.11.2020

DOI: 10.18721/JEST.26402

УДК 621.762: 551.501.774

*В.И. Горынин¹, С.Ю. Кондратьев²,
В.В. Рогожкин³, Е.Б. Мишин⁴, Е.В. Коленов⁵*

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

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

³ АО «Атомпроект», Санкт-Петербург, Россия;

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

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

КОНДЕНСАЦИЯ АТМОСФЕРНОЙ ВЛАГИ АКВАТОРИИ МОРЯ ДЛЯ ПОТОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИРОДНОЙ ПРЕСНОЙ ВОДЫ

Рассмотрена новая перспективная экопромышленная безотходная W-CONDENSER-технология конденсации атмосферной влаги акватории морей (океанов) на основе использования крупногабаритных блоков с целью снижения мирового дефицита чистой пресной воды. Блоки W-CONDENSER могут производить 4000 т/сутки и более пресной воды. Блоки W-CONDENSER пригодны как экопромышленная система для водообеспечения населения, промышленности и сельского хозяйства с сухим климатом территорий, а также для стабилизации естественных источников водоснабжения (реки, озера, подземные запасы и др.) при условии необходимого энергообеспечения (АЭС, ТЭЦ и др.), влажности атмосферы и благоприятной морской Розы ветров региона. Сделана расчетная оценка основных технических параметров проектирования и строительства блоков мощных крупногабаритных W-CONDENSER. Эксплуатация W-CONDENSER предусматривает получение больших объемов пресной воды, в первую очередь, для питьевых целей, а также для аграрных, промышленных и других потребностей.

Ключевые слова: экопромышленная технология, теплообменное оборудование, проектирование и строительство, получение пресной воды, опреснительная установка.

Ссылка при цитировании:

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. DOI: 10.18721/JEST.26402

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

*V.I. Gorynin¹, S.Yu. Kondratyev²,
V.V. Rogozhkin³, E.B. Mischin⁴, E.V. Kolenov⁵*

¹ Central Research Institute of Structural Materials “Prometey”, St. Petersburg, Russia;

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

³ JSC “Atomproekt”, St. Petersburg, Russia;

⁴ JSC “Atomenergoproekt”, Moscow, Russia;

CONDENSATION OF ATMOSPHERIC MOISTURE IN THE SEA AREA FOR IN-LINE PRODUCTION OF NATURAL FRESH WATER

The paper considers a promising eco-industrial waste-free W-CONDENSER-technology for the condensation of atmospheric moisture in the waters of the seas (oceans) based on the use of large-sized blocks to reduce the global shortage of fresh water. W-CONDENSER units can produce 4000 tons of fresh water per day and more. W-CONDENSER units are suitable as an eco-industrial system for water supply of the population, industry and agriculture with a dry climate of the territories, as well as for stabilization of natural sources of water supply (rivers, lakes, underground reserves, etc.) subject to the necessary energy supply (NPP, TPP, etc.), atmospheric humidity and favorable sea wind rose of the region. The authors presented a calculated assessment of the main technical parameters of the design and construction of high-power large-sized W-CONDENSER units. Operation of W-CONDENSER provides for obtaining large volumes of fresh water, primarily for drinking purposes, as well as for agricultural, industrial and other needs.

Keywords: fresh water production, environmental technology, heat exchangers, desalination, design and construction.

Citation:

V.I. Gorynin, S.Yu. Kondratyev, V.V. Rogozhkin, E.B. Mischin, E.V. Kolenov, Condensation of atmospheric moisture in the sea area for in-line production of natural fresh water, Materials Science. Power Engineering, 26 (04) (2020) 23–35, DOI: 10.18721/JEST.26402

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

Введение. Дефицит пресной воды на планете является одной из глобальных проблем современности, причем актуальность ее возрастает с каждым годом. Известно много способов опреснения, но даже новые современные промышленные технологии не полностью обессоливают большие массы морской воды из-за разнообразия солей, проблем утилизации солевых отходов и высокой стоимости процессов опреснения.

Главным недостатком этих методов является получение «пресной воды» не природного происхождения с пониженными вкусовыми и визуальными качествами, повышенного содержания D₂O или H₂O – (оксид дейтерия) опасной для здоровья (см. «Открытое письмо-13» всем властям и всему населению страны от 16.07.2007 г., написанное 13 учеными-химиками, медиками, геологами и специалистами по водообеспечению Израиля»).

Необходима принципиально новая экоинженерная концепция обеспечения планеты пресной водой. Такая концепция может быть основана на создании промышленной безотходной технологии обеспечения чистой пресной водой конденсационного (природного) происхождения водodefицитных континентальных и островных территорий, омываемых морской водой.

Новая технология и экопромышленные системы W-CONDENSER для получения больших объемов пресной воды природного происхождения за счет конденсации атмосферной влаги акватории морей (океанов) позволит обеспечить пресной водой аридные регионы Земли взамен энергоемких и токсичных для человека и окружающей среды методов «опреснения» морской или гиперсоленой воды. Атмосферная влага практически неисчерпаема, ее конденсат близок по химическому составу и биологическим свойствам к дождевой воде – основе жизни на Земле.

Проблема дефицита пресной воды

Вода и воздух – ценнейший жизнеобеспечивающий ресурс планеты. Из всей воды (~1,4 млрд. км³) на земле пригодны для питья и другого использования всего лишь 3% (35 млн. км³). Считается, что

0,77% мировых запасов воды – это доступные подземные и поверхностные источники (озера, реки, болота и т.д.). Как и ископаемые виды топлива, водные ресурсы накапливаются медленно и являются мало возобновляемыми. Источником возобновляемых ресурсов пресной воды считаются атмосферные осадки, годовой объем которых $\sim 110300 \text{ км}^3/\text{год}$. Из них $69600 \text{ км}^3/\text{год}$ возвращаются в атмосферу в результате испарения и транспирации. Суммарный глобальный сток воды достигает $40700 \text{ км}^3/\text{год}$ [1]. С учетом географического положения и периодически возникающих природных катаклизмов доступный объем стока сокращается до $12500 \text{ км}^3/\text{год}$. Крупнейшие мировые водохранилища опустошаются темпами, все более превышающими скорость их естественного возобновления [2].

Лидер потребления пресной воды – сельское хозяйство, где используется до 70% всего объема. Прогнозируется, что к 2040 г. водных ресурсов не будет хватать на сельское хозяйство, энергетику и промышленность.

Засуха охватила заметную часть Земли. При этом даже те земли, которые омываются морской водой, становятся пустынями. На рис. 1 видно, что для трех континентов – Африка, Америка и Азия – уже сформирован протяженный и расширяющийся пояс пустынь. В Африке и Азии они составляют около 1/3 всей площади, расширяясь, несмотря на имеющиеся сведения о наличии под ними больших, но практически недоступных подземных водных ресурсов, например на западе Китая под пустыней Такла-Макан в Таримской впадине площадью около 300000 км^2 , оцениваемых до триллиона тонн воды.

Австралия – один из самых засушливых континентов на Земле. Вода здесь в основном берётся из подземных источников. Наиболее крупный из них – большой Артезианский бассейн, которого, в лучшем случае хватит до середины 21 века. Большая часть территории Австралии занята пустынями. На западе континента пустыни не только дошли до берегов, но и распространяются вдоль побережья. Для решения этой проблемы с 2007 г. введен зонный контроль использования воды, чтобы не допустить полной аридизации территории. Также растет дефицит пресной воды в Китае. Имея один уровень водной инфраструктуры с Канадой, Китай опережает ее по населению (более чем в 40 раз) и по развитию промышленности. Поэтому обострение проблемы водоснабжения тормозит развитие промышленности, обходясь экономике Китая в миллиарды долларов США ежегодно. После КНР (объем воды на душу населения $1912 \text{ м}^3/\text{год}$) значительные проблемы с водой испытывают Индия (1411), Иран (1293), Египет (723), Израиль (330) и Сау-



Рис. 1. Пояс пустынь на планете Земля

Fig. 1. The zone of deserts on planet Earth

довская Аравия (59) [1]. Возможность использования атмосферной влаги ближайших морей для обеспечения пресной водой прибрежных городов очевидна, исходя из влажности воздуха и Розы ветров (рис. 2).

Тенденция роста дефицита доступной пресной воды на Земле, а во многих регионах её отсутствие, способствует катастрофическим, политическим и гуманитарным последствиям.

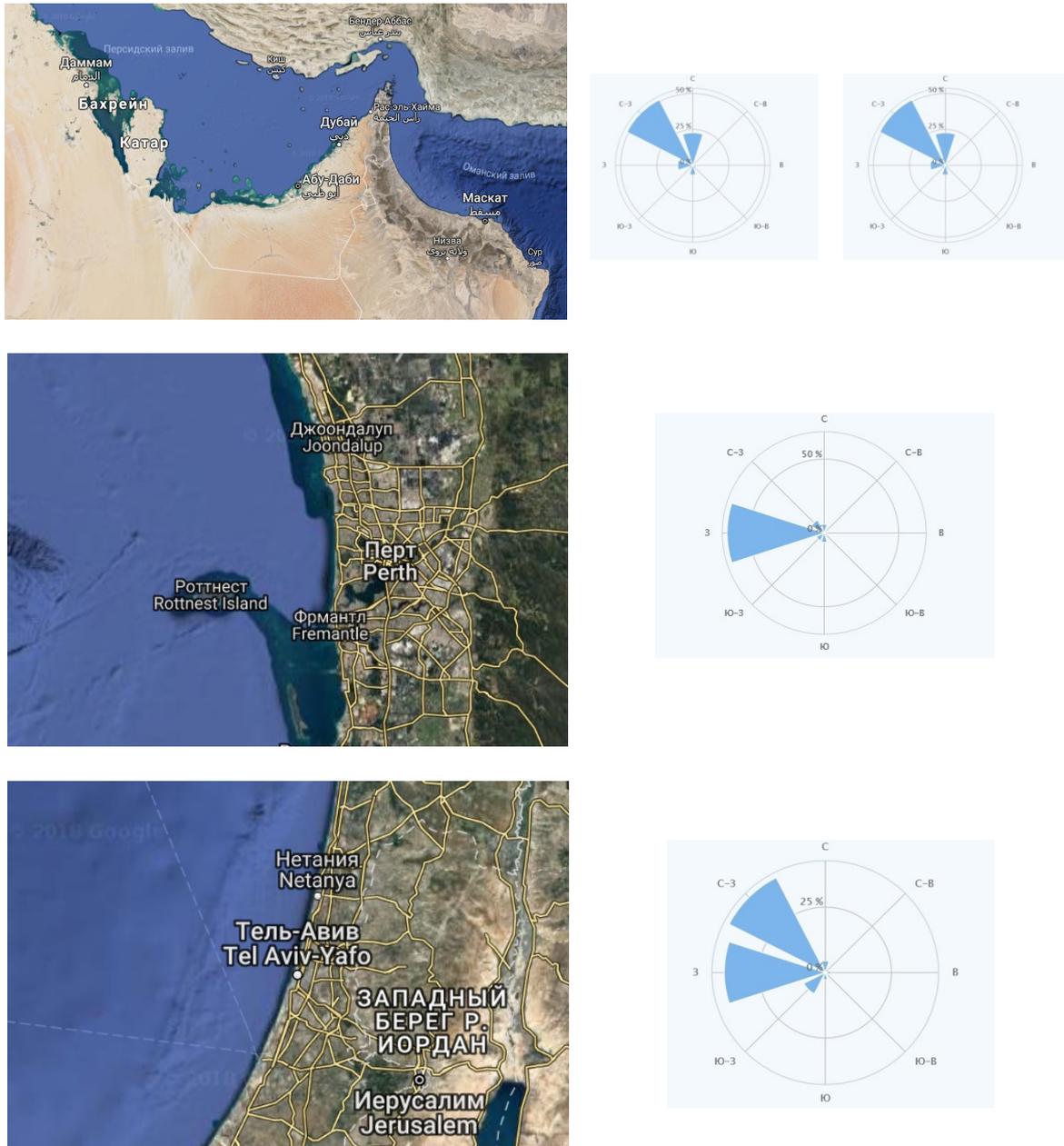


Рис. 2. Роза ветров территорий, перспективных для применения W-CONDENSER технологии конденсации атмосферной влаги акватории морей
 Fig. 2. Wind roses of territories are promising for the use of W-CONDENSER technology for condensation of atmospheric moisture in the sea area

Техническое решение проблемы обеспечения засушливых регионов пресной водой

Очевидно, что определяющим преимуществом использования блоков W-CONDENSER для производства пресной воды в промышленных объемах (от 4000 м³/сутки и более) является выполнение двух условий:

- а) отсутствие токсично-технологических отходов, загрязняющих акваторию прибрежной территории;
- б) обеспечение безопасного употребления человеком продукта (питьевой воды дождевого качества) с концентрацией солей менее 1 г/л.

При опреснении морской (соленой) воды этим условиям сложно удовлетворять по следующим естественным причинам:

во-первых, не полностью обеспечивается обессоливание больших масс морской воды из-за разнообразия солей (из 160 известных химических элементов ~70 содержатся в морях и океанах); в их состав входят хлориды натрия, сульфаты, карбонаты кальция, магния, алюминия, меди, бора, токсичные окислы дейтерия, трития, стронция и др. [3–5];

во-вторых, образование в больших количествах (десятки, сотни и тысячи тонн в сутки) солевых отходов ухудшает качество жизни людей, создает проблемы сбора, безопасного хранения и дорогостоящей утилизации.

Образующийся при «опресняющей» дистилляции жидкий солевой осадок с накипью в виде хлоридов и карбонатов кальция и магния, требующих применения антинакипных добавок, является экологически неприемлемым веществом. Аналогичная ситуация характерна и для таких способов опреснения морской воды как обратный осмос, электродиализ, замораживание, газо-гидратирование и т.д.

Кроме того, «пресная» вода, полученная из морской, практически не пригодна для постоянного употребления человеком, животными и даже для полива пищевых растений. Отметим, что научное сообщество пришло к выводу о недопустимости даже подмешивания, так называемой, «мертвой» воды с D2O и др., полученной обессоливанием морской, в водопроводную систему городов (см. «Открытое письмо-13» от 16.07.2007 г.) [3–5].

Масштабное решение проблемы обеспечения пресной водой природного качества континентальных и островных территорий возможно на основе экоинженерной концепции с учетом имеющихся природных форм, путей циркуляций и стока не используемых водных ресурсов приповерхностного слоя морского (океанского) воздуха. В первую очередь, это практически не используемые большие запасы пресной воды в виде водяного пара в атмосфере над акваториями морей (океанов) континентальных и островных территорий. На рис. 2 приведены примеры территорий, перспективных для применения W-CONDENSER-технологии конденсации атмосферной влаги акватории морей. Атмосферный водный конденсат практически экологически безопасен, поскольку процесс его охлаждения не образует токсичный солевой остаток и не требует расходных деталей типа фильтров с их регулярной заменой и утилизацией.

Конденсация атмосферной влаги

Конденсат атмосферной влаги является природной основой существующих длительное время наземных и подземных источников пресной воды. Обновление последних возможно только при условии систематических природных осадков (дожди, туманы) конденсата атмосферной влаги.

Атмосферная влага может употребляться после естественной минерализации в реках и водохранилищах. Кроме того, она позволяет увеличить объем межпластовых вод, к которым относятся артезианские, залегающие на глубине 100 м и более. Артезианские воды имеют много положительных свойств, являясь одними из самых чистых, так как проходят через слои грунта, выполняющие функции фильтра (известняк и др.). Они также богаты минералами и имеют при-



Рис. 3. Общий вид блока W-CONDENSER с конденсатной станцией
 Fig. 3. General view of the W-CONDENSER unit with a condensate station

емлемый для потребления в пищу химический состав [6–7]. Артезианский источник воды считается полезным ископаемым, хотя вначале был атмосферной влагой.

Природные возможности континентальных и островных территорий для решения проблемы обеспечения пресной питьевой водой характеризуются следующим:

I. концентрация пресной воды в воздухе (в виде пара) над акваторией морей (океанов) находится в диапазоне $10\text{--}35 \text{ г/м}^3$ воздуха при температуре морской воды у поверхности $18\text{--}30 \text{ }^\circ\text{C}$.

II. наличие глубинных морских вод с пониженной температурой ($7\text{--}13 \text{ }^\circ\text{C}$) практически независимо от времени года; часто этому соответствует круто спадающий рельеф дна у берега.

Источник холода позволяет использовать блоки W-CONDENSER на основе конденсации атмосферной влаги в теплообменном устройстве либо в турбодетандере. Последние охлаждают влажный воздух морей (океанов) до температуры ниже точки росы. Создание такого W-CONDENSER возможно на базе комплекса технических средств конденсации атмосферной влаги и транспортировки природной пресной воды потребителю.

По предварительной оценке для получения блоком W-CONDENSER пресноводного конденсата в промышленных объемах ($>1000 \text{ т}$ в сутки) поток воздуха составляет не менее $800 \text{ м}^3/\text{с}$ и расхода, например, морской воды в качестве охладителя – не менее $0,3 \text{ т/с}$, что не является сложной технической задачей. Ввод W-CONDENSER позволит, например, снизить расход подземных водных запасов, накопленных, возможно, еще давно и обеспечить их возобновление за счет атмосферных осадков. Очевидно, что промышленный и безотходный W-CONDENSER представляет интерес не только для деятельности правительств стран вододефицитных территорий и их национальных водных комитетов, но и для стратегии главного органа ООН по водным проблемам – UN-Water.

Вид блока W-CONDENSER с конденсатной станцией производительностью $\geq 4000 \text{ т/сутки}$ питьевой воды представлен на рис. 3.

Описание технического предложения

Объектом проектирования и строительства, с учетом географического положения, параметров климата и ветра побережья, является W-CONDENSER для производства и транспортировки природной пресной воды в водохранилища. Основой W-CONDENSER является крупногабаритная конденсатная установка (рис. 4) на плитном или свайном основании. Она состоит из модульных

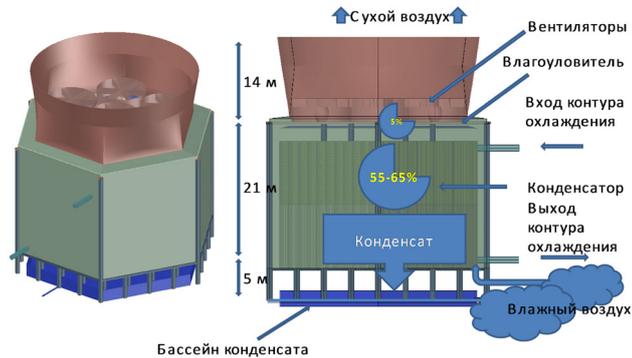


Рис. 4. Схематическое изображение конструкции крупногабаритной конденсатной установки в составе опреснительной системы W-CONDENSER

Fig. 4. Schematic representation of the design of a large-sized condensate plant as part of the W-CONDENSER desalination system

пластинчатых или трубных теплообменных элементов (ТЭ) из морских титановых сплавов или коррозионностойких сталей типа 316L аустенитного структурного класса, собранных в пучки с шагом, определенным из расчета энергетического баланса водо-воздушного конденсатора.

*Основные технические параметры крупнотоннажного блока
W-CONDENSER:*

1. высота установки (с диффузором) – до 40 м;
2. металлоёмкость трубчатки – ~250 т;
3. расчётная мощность водяных насосов – ~0,15 МВт;
4. расчётная мощность вентиляторных установок – ~1,25 МВт;
5. температура охлаждающей среды – 7-13 °С;
6. производительность – ~4000 т/сутки (пресная вода);
7. удельные энергозатраты – < 60 кВт·ч/т.

Металлические стенки камеры должны иметь тепловую изоляцию и наружное светоотражающее покрытие для минимизации их нагрева солнечными лучами. Для обеспечения сейсмостойкости W-CONDENSER могут применяться демпфирующие устройства. Локация W-CONDENSER проводится с учетом высоты над уровнем моря и удалённости от побережья – 20 м и 200 м соответственно.

Атмосферный воздух акватории моря с учетом Розы ветров в регионе локации блока подается в модульную камеру W-CONDENSER за счет разрежения, создаваемого системой вентиляторов, где охлаждается до температуры ниже точки росы при теплообмене с циркулирующей внутри ТЭ охлаждающей средой. В качестве промежуточного теплоносителя могут использоваться также хладагенты, например, типа R22, R401 и др.

После прохождения горизонтальных или вертикальных теплообменных трубчатых стен W-CONDENSER атмосферная влага превращается (до 70%) в пресную воду, которая, попадая в каплеуловительную систему, накапливается в бассейне конденсата для дальнейшей его транспортировки потребителям.

Охлаждающая среда и трубопроводы W-CONDENSER

Для охлаждения теплообменных элементов в W-CONDENSER может подаваться охлаждающая среда, например, морская вода. Береговая насосная станция располагается вблизи береговой линии, например, для подачи морской (океанской) воды в качестве источника холода в конденсаторы в сифонном режиме при обеспечении расхода охлаждающей воды 0,15-1,3 м³/с. Этот расход зависит от требуемой производительности пресноводного конденсата.

Забор морской (океанской) воды целесообразен с глубин, где температура воды составляет 7-13 °С (холодный промежуточный слой «термоклин» возможен на глубине 30-100 м).

Основные особенности конструкции W-CONDENSER

Важной особенностью W-CONDENSER может являться прямое использование различных источников холода, например, глубинной морской воды без применения холодильных агрегатов для получения нужных низких температур влагосодержащего воздуха. Измерения температуры воды вблизи города Сэндридж (Австралия), выполненные 22.07.1878 г., показали величину 11 °С, в Порт-Филиппе – 13 °С. Это связано с холодным Западно-Австралийским течением у западных берегов континента.

Отсутствие в регионе источников холода с температурой ниже точки росы для прямой конденсации атмосферной влаги может быть компенсировано переводом воздуха в сжатое состояние (2-4 атм, +120 °С) с охлаждением сжатого воздуха любой природной морской водой, с последующим снижением температуры воздуха от –10 °С до +10 °С при адиабатическом расширении в турбодетандерах (Патент № 2504417) [8].

Крупнотоннажный W-CONDENSER целесообразен по принципу компоновки в виде корпусной испарительной вентиляторной градирни высотой > 40 м с ТЭ, расположенными как в вертикальной, так и в наклонной и горизонтальной плоскостях. Это позволяет получать максимально эффективную форму и площадь теплообмена, сохраняя простые классические формы пространственного металлического каркаса, что в совокупности способствует высокой энергоэффективности и простоте монтажа. Воздухозабор с учётом морской Розы ветров региона может осуществляться с различной высоты относительно фундамента градирни. Выбор материалов для изготовления элементов конструкции необходимо осуществлять с учетом особенностей ее эксплуатации, в том числе коррозионно-активной среды, перепада температур и напряжений [9–11].

Преимущество промышленной технологии конденсационного получения пресной воды

1) Экологическая безопасность продукта

Вся полученная пресная вода (>4000 т/сутки) деминерализована и практически не содержит вредных примесей, так как является продуктом конденсации водяного пара, образовавшегося в процессе природного низкотемпературного испарения молекул воды с поверхности моря (океана) под действием солнечной радиации. Поэтому продукт W-CONDENSER имеет изотопный и химический состав на уровне качества дождевой воды для использования в питьевых целях.

2) Модульное исполнение блока W-CONDENSER

Теплообменные элементы-модули имеют размеры 2 м × 10 м × 1 м (производительность по конденсату не менее 20 т/сутки), что позволяет их изготавливать в условиях мини-заводов и транспортировать железнодорожным и автомобильным способом для строительства блока W-CONDENSER. Блок может быть собран из десятков и сотен ТЭ для обеспечения необходимого дебита воды. Количество конденсаторных камер W-CONDENSER также можно увеличить с учётом норматива потребления и ресурса энергоснабжения.

3) Быстрый монтаж крупногабаритного блока W-CONDENSER

Проект, за исключением фундаментов, предусматривает использование строительных конструкций типовых вентиляторных градирен и другое оборудование заводского изготовления с

доставкой к месту монтажа автомобильным транспортом. При монтаже также возможно использование автокранов по пневмоходу.

4) Новые рынки

Известно, что весьма малое количество водных ресурсов Земли (0,77%) является питьевым и доступным для использования. За последние 50 лет население планеты выросло вдвое и по прогнозам на 2050 год составит 10 млрд. человек. В то же время запасы питьевой воды остались на прежнем уровне. Всемирный фонд дикой природы (WWF) считает, что к 2025 году около 60% населения Земли будет не хватать пресной воды.

Транспорт пресной воды на расстояние тысячи и более километров с целью перепродажи экономически не эффективен и не способствует увеличению объёма продаж воды даже при повышенном спросе. Поэтому интерес представляют инвестиции в готовые пищевые продукты, производство которых расположено в местах, где возможно увеличение водоснабжения, например, за счёт размещения блоков W-CONDENSER требуемой производительности пресной воды. Инвестиции в конкретный товар напрямую предполагают под собой его транспортировку для перепродажи в вододефицитных районах [12–15].

В качестве примера косвенных инвестиций в пресную воду можно привести вино, одна бутылка которого требует в 400 раз больше воды. Другим продуктом, требующим большое количество пресной воды, является мясо. Для производства 1 кг свинины требуется 4500 литров пресной воды, а для 1 кг курятины – 3900 литров. Растущий глобальный дефицит воды способствует ускорению роста стоимости продуктов, производство которых напрямую зависит от доступа к этому ресурсу.

В настоящее время также заметна тенденция роста больших морских поставок пресной воды по типу танкерных перевозок из стран богатых водными ресурсами в регионы их дефицита. Например, импорт пресной воды из Новой Зеландии в Саудовскую Аравию. Снабжение пресной водой островов Мальты и Кипра из Италии и Греции соответственно. Исключением является богатый нефтью Кувейт, получающий воду сухопутным путём по водопроводу из Ирака и Ирана, которые сами не находятся в лидерах по запасам пресной воды.

Появление экопромышленных блоков W-CONDENSER производства больших объёмов пресной воды конденсационным способом, по-видимому, не только изменит структуру мирового рынка пресной воды, но и экономику водных ресурсов на базе традиционных, энергозатратных и не достаточно эффективных технологий «опреснения» морской или другой соленой воды. Предлагаемая технология позволит лиувидировать остроту кризиса водных ресурсов и, тем самым, конфликтность стран вододефицитных регионов.

Удельные энергозатраты (<60 кВт·ч/т) для W-CONDENSER позволяют оценить стоимость 1 т атмосферного конденсата (вода дождевого качества) в странах южного и восточного средиземноморья менее 1,8\$ США.

Приведенные технико-экономические показатели подлежат уточнению по результатам опытно-конструкторских работ и ввода W-CONDENSER с учетом отработки унифицированного цикла производства пресной воды для теплообменного оборудования, лимитирующего производительность, ресурс и маневренность элементов W-CONDENSER.

Целесообразность строительства блоков обеспечения населения аридного региона пресной водой определяется, в первую очередь, правительством страны или организацией стран засушливых территорий, например, проект Африканского союза – «Великая зеленая стена» (борьба с опустыниванием земель к югу от Сахары).

Об экономической приемлемости использования блоков W-CONDENSER для водообеспечения промышленности и сельского хозяйства региона целесообразно исходить из именно РЫНОЧНОЙ стоимости пресной питьевой воды в АРИДНОМ регионе (а не по АБСОЛЮТНОЙ энергетической/денежной цены пресной воды в мире!).

Мировой опыт изготовления и эксплуатации установок для производства пресной воды

В настоящее время проблема получения воды из атмосферного воздуха имеет много технических решений – на уровне патентов и малогабаритных и автономных установок индивидуального пользования. Их использование предполагается в районах безводного климата (пустыни, степи и т.д.). Это накладывает ограничения на масштабное решение проблемы. Вместе с тем, за рубежом это направление развивается и имеет примеры серийного производства таких устройств.

В США и Израиле разработаны и производятся мобильные установки производства пресной воды. Самой производительной в линейке производства подобных систем является автономная установка EA-5000, использующая хладагенты R22 и R401 и ориентированная на применение в удаленных от моря засушливых регионах. Однако объём производства воды для EA-5000 составляет всего 5 т/сутки.

Сооружение опытно-промышленного блока W-CONDENSER

Разработка рабочего проекта и изготовление блока W-CONDENSER, отработка режимов эксплуатации применительно к геоспецифике климата морского (океанского) побережья, выбранного для локации, должны предшествовать строительству объектов экопромышленной системы. При этом также целесообразно учитывать ряд следующих факторов развития территории локации W-CONDENSER:

1. энергообеспечение региона (наличие электрической станции типа АЭС, ТЭЦ),
2. рост населения,
3. индустриализация,
4. рост потребления воды для сельского хозяйства и другого применения,
5. социальный уровень общества и его стабильность.

Примерные сроки строительства блока W-CONDENSER для обеспечения пресной водой 60 тыс. чел. составляют не более 18 месяцев, а отработка режимов эксплуатации – 6 месяцев. Стоимость W-CONDENSER зависит от требуемого объёма водообеспечения. Отметим, что цена питьевой воды, в зависимости от стратегии её получения может изменяться разнонаправленно.

Вода для противостояния зоне пустынь сегодня лишь вопрос цены, а в будущем может стать ключевым фактором жизни Земли, что наглядно видно на примере таких аридных регионов, как Сахара (Северная Африка), Западная Австралия, Южно-Африканская Республика, Аравийский полуостров (Большая Сирийская пустыня, пустыни Большой и Малый Нефуд и др.) и т.д.

Выводы

1. На основе принципиально новой концепции использования крупногабаритного блока W-CONDENSER, включающего теплообменное оборудование, предложена экопромышленная технология конденсации атмосферной влаги акваторий морей континентальных и островных территорий для получения природной пресной воды. Эксплуатация W-CONDENSER предусматривает получение больших объемов пресной воды, в первую очередь, для питьевых целей, а также для аграрных, промышленных и других потребностей.

2. Обоснованы основные технические параметры проектирования и строительства блоков мощных крупногабаритных W-CONDENSER, обеспечивающих производство до 4000 т/сутки пресной (питьевой) воды природного происхождения для вододефицитных приморских регионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Кофман В.Я. Родники и атмосферные осадки как источник питьевой воды // Энергия: экономика, техника, экология. 2014. № 7. С. 48–53.

- [2] **Данилов-Данильян В.И.** Глобальная проблема дефицита пресной воды. Век глобализации. Том 1, 2008, с. 45–56.
- [3] **Ветштейн В.Е.** К вопросу опреснения морской воды как источника водоснабжения Израиля. 2007 // [Электронный ресурс] Режим доступа: www.ecoimper.net/stat/1013_vetshtein.
- [4] **Ветштейн В.Е.** Питьевой дейтерий – медико-биологические и экологические проблемы опреснения морской воды // Вести. 01.11.2000. С. 6.
- [5] **Ветштейн В.Е.** Изотопы водорода и кислорода природных вод СССР. – Л.: Недра, 1982. 262 с.
- [6] **Корнилов И.** Докопаться до воды // Машины и механизмы. 2015. № 10 (121). С. 97–102.
- [7] **Рябчук Е.Ф.** Пресная вода на земле и под землей // Энергия: Экономика, техника, экология. 2010. № 6. С. 54–57.
- [8] Атомно-энергетический комплекс. Патент РФ № 2504417 от 20.01.2014 (RU 2504417 C1). Рогожкин В.В., Мошков К.В., Вализер Н.А., Потапов К.А.
- [9] **Фукс М.Д., Зеленин Ю.В., Кондратьев С.Ю.** Исследование качества металла толстостенных труб из коррозионно-стойких сталей // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 2. С. 36–38.
- [10] **Горынин В.И., Кондратьев С.Ю., Оленин М.И.** Повышение сопротивляемости разрушению сталей перлитного класса за счет микро- и наноструктурной трансформации карбидной фазы при дополнительном отпуске // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 2. С. 42–48.
- [11] **Горынин В.И., Кондратьев С.Ю., Оленин М.И., Рогожкин В.В.** Концепция карбидного конструирования сталей повышенной хладостойкости // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 10 (712). С. 32–38.
- [12] **Доникян М.** Как заработать на жажде. 04.09.2016 // [Электронный ресурс] Режим доступа: mark.donikyan@qbfin.ru.
- [13] **Лихачева А.Б.** Проблема пресной воды как структурный фактор мировой экономики // Экономический журнал Высшей школы экономики. 2013. № 3. С. 497–522.
- [14] **Андреев И.Л.** Пресная вода как глобальная социальная проблема. Вопросы философии. 17.01.2011 // [Электронный ресурс] Режим доступа: vphil.ru.
- [15] **Консулт В.** Мировой рынок пресной воды. 2009 // [Электронный ресурс] Режим доступа: v@vigorconsult.ru.

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

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

E-mail: petroprom2013@yandex.ru

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

E-mail: rogzhkin010@gmail.com

МИШИН Евгений Борисович – директор, Московский проектный институт АО «Атом-энергопроект», канд. физ.-мат. наук.

E-mail: mishin@aep.ru

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

E-mail: kolenov@p.mach.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 24.11.2020

REFERENCES

- [1] **V.Ya. Kofman**, Rodniki i atmosferynye osadki kak istochnik pityevoy vody // Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya. 2014. № 7. S. 48–53.
- [2] **V.I. Danilov-Danilyan**, Globalnaya problema defitsita presnoy vody. Vek globalizatsii. Tom 1, 2008, s. 45–56.
- [3] **V.Ye. Vetshteyn**, K voprosu opresneniya morskoy vody kak istochnika vodosnabzheniya Izrailya. 2007 // [Elektronnyy resurs] Rezhim dostupa: www.ecoimper.net/stat/1013_vetshteyn.
- [4] **V.Ye. Vetshteyn**, Pityevoy deyteriy – mediko-biologicheskiye i ekologicheskiye problemy opresneniya morskoy vody // Vesti. 01.11.2000. S. 6.
- [5] **V.Ye. Vetshteyn**, Izotopy vodoroda i kisloroda prirodnykh vod SSSR. – L.: Nedra, 1982. 262 s.
- [6] **I. Kornilov**, Dokopatsya do vody // Mashiny i mekhanizmy. 2015. № 10 (121). S. 97–102.
- [7] **Ye.F. Ryabchuk**, Presnaya voda na zemle i pod zemley // Energiya: Ekonomika, tekhnika, ekologiya. 2010. № 6. S. 54–57.
- [8] **V.V. Rogozhkin, K.V. Moshkov, N.A. Valizer, K.A. Potapov**, Atomno-energeticheskiy kompleks. Patent RF № 2504417 ot 20.01.2014 (RU 2504417 C1).
- [9] **M.D. Fuks, Yu.V. Zelenin, S.Yu. Kondratyev**, Issledovaniye kachestva metalla tolstostennykh trub iz korrozionno-stoykikh staley // Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii. 2012. № 2. S. 36–38.
- [10] **V.I. Gorynin, S.Yu. Kondratyev, M.I. Olenin**, Povysheniye soprotivlyayemosti razrusheniyu staley perlitnogo klassa za schet mikro- i nanostrukturnoy transformatsii karbidnoy fazy pri dopolnitelnom otpuske // Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii. 2013. № 2. S. 42–48.
- [11] **V.I. Gorynin, S.Yu. Kondratyev, M.I. Olenin, V.V. Rogozhkin**, Kontseptsiya karbidnogo konstruirovaniya staley povyshennoy khladostoykosti // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 2014. № 10 (712). S. 32–38.
- [12] **M. Donikyan**, Kak zarabotat na zhazhde. 04.09.2016 // [Elektronnyy resurs] Rezhim dostupa: mark.donikyan@qbfin.ru.
- [13] **A.B. Likhacheva**, Problema presnoy vody kak strukturnyy faktor mirovoy ekonomiki // Ekonomicheskiy zhurnal Vysshey shkoly ekonomiki. 2013. № 3. C. 497–522.
- [14] **I.L. Andreyev**, Presnaya voda kak globalnaya sotsialnaya problema. Voprosy filosofii. 17.01.2011 // [Elektronnyy resurs] Rezhim dostupa: vphil.ru.
- [15] **V. Konsult**, Mirovoy ryok presnoy vody. 2009 // [Elektronnyy resurs] Rezhim dostupa: v@vigorconsult.ru.

THE AUTHORS

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

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

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

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

KOLENOV Evgeniy V. – PJSC “*Power machines*”.
E-mail: kolenov@p.mach.ru

Received: 24.11.2020

DOI: 10.18721/JEST.26403

УДК 620.92

А.И. Захаров, С.Н. Чижма

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта,
Калининград, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Статья посвящена оценке эффективности применения алгоритмов поиска экстремума целевой функции в системе управления ветровой энергетической установкой (ВЭУ). Рассмотрены различные существующие подходы к управлению ВЭУ и их недостатки. Предложена методика нахождения оптимального состояния ВЭУ. Критерием оптимальности в предлагаемом методе предлагается считать минимум представленной в статье целевой функции, определяющей расстояние режимных параметров установки до их номинальных значений. Рассмотрены алгоритмы поиска экстремума, основанные на методе градиентного поиска, наискорейшего спуска, методе смежных градиентов. Проведено моделирование, описывающее применение данных алгоритмов для решения задачи управления ВЭУ. На основании проведенного моделирования произведена оценка работы рассмотренных алгоритмов. Представлены результаты моделирования ВЭУ в течение суток при стохастическом изменении ветра и заданным профилем нагрузки. Показано изменение следующих параметров энергетической установки от времени: генерируемой электрической мощности, скорости вращения генератора, потребляемой электрической мощности, уровня заряда аккумуляторной батареи (АКБ), напряжения и тока АКБ.

Ключевые слова: ветровая энергетическая установка, целевая функция, экстремальное управление, возобновляемая энергетика, поиск максимальной мощности.

Ссылка при цитировании:

Захаров А.И., Чижма С.Н. Моделирование системы управления ветровой энергетической установкой малой мощности // *Материаловедение. Энергетика.* 2020. Т. 26, № 4. С. 36–50. DOI: 10.18721/JEST.26403

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

A.I. Zakharov, S.N. Chizhma

Baltic Federal University of Immanuel Kant, Kaliningrad, Russia

MODELING A CONTROL SYSTEM FOR A LOW-POWER WIND ENERGY PLANT

The article is devoted to efficiency assessment of search algorithms for objective function extremum in wind energy plants (WEP) control systems. Various existing WEP control strategies and their disadvantages have been reviewed. The authors suggest deploying an optimal WEP state search method and using the minimum of the objective function presented in the article, which determines a distance between actual parameters of the plant and their nominal values, as a criterion of optimality for the given method. A number of extremum search algorithms based on gradient search method, steepest descent search method and conjugate gradients method are reviewed. The authors simulated WEP control using the described methods. Based on the conducted simulation, the authors assessed the methods in operation. The paper presented the results of a full day WEP simulation in the conditions of stochastic wind and with the use of load

profiles. The progressions of actual plant's parameters, such as generated electrical power, wind turbine rotation speed, consumed electrical power, state of battery charge, battery current and voltage are demonstrated.

Keywords: offshore wind turbines, wind power, power control, renewable energy resources, maximum power point trackers.

Citation:

A.I. Zakharov, S.N. Chizhma, Modeling a control system for a low-power wind energy plant, Materials Science. Power Engineering, 26 (04) (2020) 36–50, DOI: 10.18721/JEST.26403

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

Введение. Задача полного или частичного электроснабжения частных домов или удаленных промышленных объектов с помощью ветровых энергетических установок (ВЭУ) малой мощности на сегодняшний день демонстрирует широкое разнообразие конструкций и растущую востребованность во всем мире [1]. Решение данной задачи неизбежно сопряжено с известными сложностями, связанными с стохастическим характером ряда факторов, определяющих функционирования ВИЭ, таких как скорость ветра и электрическая мощность, потребляемая нагрузкой. Решение данной задачи лежит в плоскости оптимального управления ветровой энергетической установкой. Существует несколько основных подходов к оптимизации, а именно: стратегия максимизации вырабатываемой электрической мощности, стратегия оптимизации механической мощности вращения ветровой турбины, стратегия управления исходя из необходимой электрической мощности и т.д. Несмотря на то, что подавляющее большинство ныне существующих концепций управления ВЭУ способны решить задачу максимизации мощности, они не лишены своих недостатков: необходимости составления эмпирической модели механических частей системы, которые могут отличаться друг от друга для разных ВЭУ, отсутствие возможности предусмотреть изменение параметров системы со временем, необходимость применения дополнительных средств измерения, таких как измеритель скорости ветра. В данной статье продемонстрирована методика нахождения оптимального состояния ветроэнергетической системы, которое делает возможным генерацию максимальной мощности, соблюдая при этом требуемые условия эксплуатации всех узлов ВЭУ, таких как номинальная генерируемая мощность и номинальная скорость вращения генератора.

Описание объекта исследования

Построение ветровых энергетических установок малой мощности основано на ряде известных технических решений. На рис. 1 представлена структурная схема ВЭУ на базе ветровой турбины с горизонтальной осью вращения и синхронного генератора на постоянных магнитах (СГПМ). Выбор параметров электромеханической части ВЭУ [2] учитывает следующие параметры: необходимую потребителю мощность, тип ветровой турбины, тип и характеристики электрического генератора, передаточное число механизма передачи, а также может учитывать среднюю для данной местности скорость ветра. Электрогенератор ВЭУ подключен к трехфазному неуправляемому выпрямителю, который в свою очередь подключается к конвертеру. Далее к шине постоянного напряжения подключена аккумуляторная батарея (АКБ) и инвертор, обеспечивающий генерацию переменного напряжения для подключения нагрузки. Профиль изменения нагрузки за сутки условно носит случайный характер, однако может быть детерминирован и определен зависимостью, характерной для частных жилых домов [3].

Эксплуатационные параметры ВЭУ, такие, как генерируемая электрическая мощность и скорость вращения электрогенератора, могут выходить за пределы допустимых значений, опреде-

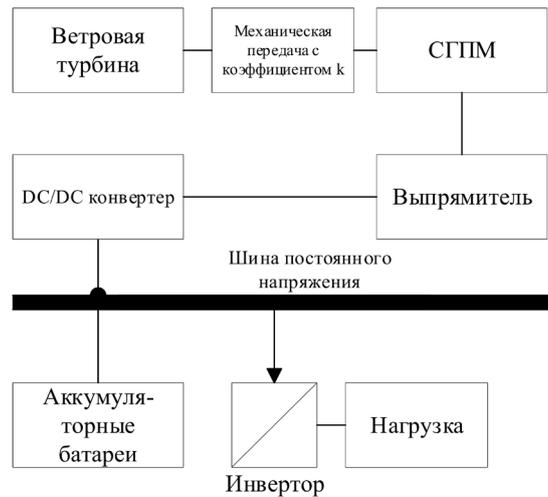


Рис. 1. Структурная схема ВЭУ

Fig. 1. Wind energy plant structure

ленных номинальными и кратковременными пиковыми значениями [4]. Решение по устранению подобных ситуации лежит в плоскости оптимального управления ВЭУ и включает в себя ряд подходов.

Ветровые турбины принято описывать известной [5] зависимостью вырабатываемой механической мощности вращения турбины от её конструктивных параметров и скорости ветра:

$$P_m = c_p(\lambda, \beta) \frac{\rho A}{2} v_{\text{ветра}}^3, \quad (1)$$

в которой P_m – механическая мощность турбины, Вт; c_p – коэффициент использования энергии ветра; ρ – плотность воздуха ($\text{кг}/\text{м}^3$); A – ометаемая площадь ветровой турбины, м^2 ; $v_{\text{ветра}}$ – скорость ветра, м/с; λ – коэффициент крутящего момента, β – угол поворота лопастей ветровой турбины.

Отношение линейной скорости вращения края лопасти турбины к скорости ветра образует коэффициент крутящего момента:

$$\lambda = \frac{\omega_t \cdot R}{v_{\text{ветра}}}. \quad (2)$$

Эмпирическая зависимость коэффициента использования энергии ветра c_p от λ и β широко известна. Её аналитическая запись приведена в [6, 7, 8].

Наиболее распространенный подход к решению задачи оптимизации работы ВЭУ заключается в поиске экстремума функции $P_m(\omega_m)$ (Hill climb searching) [9, 10]. Данный подход по сути представляет собой итерационный метод поиска экстремума, заключающийся в определении градиента функции $P_m(\omega_m)$ в k -й точке и приращению частоты вращения генератора с учетом этого градиента. Данный метод, не смотря на кажущуюся простоту, обладает рядом недостатков, связанных с невозможностью явно подстраивать скорость вращения генератора, а также с необходимостью косвенных измерений для определения механической мощности вращения турбины P_m .

Метод управления по быстроходности λ (Tip Speed Ratio Method) [9] основан на поддержании оптимального значения $\lambda_{\text{опт}}$, который соответствует максимальному значению коэффициента производительности c_p [11].

Недостаток данного метода заключается в сложности определения оптимального значения $\lambda_{\text{опт}}$, который зависит от разновидности ветрового колеса и его механических характеристик, формы лопастей и т.д.

Метод обратной связи по мощности (Power Signal Feedback Method) [12] генерирует опорный управляющий сигнал с оптимальным значением мощности для подстройки мгновенной скорости вращения генератора. Управление генерируемой мощностью производится в соответствии с опорным значением. Недостаток данного метода заключается в необходимости сбора эмпирических данных о соответствии каждой скорости вращения генератора максимальной для этой скорости генерируемой мощности [11].

Метод поиска оптимального состояния ВИЭ с помощью целевой функции

Эксплуатация ветровых энергетических установок неизбежно сопряжена с необходимостью решения задачи поиска оптимальности. Моделирование ветровых генераторов [4] показывает, что при скорости ветра больше номинальной вероятным сценарием является превышение генерируемой мощности или скорости вращения электрического генератора номинальных значений.

При этом ни одна из приведенных выше стратегий управления не решает задачу оптимизации обоих параметров явно. Каждый из методов направлен на максимизацию генерируемой или механической мощности, при этом необходимость удержания параметров в пределах номинальных значений должна задаваться дополнительными условиями и не является частью приведенных методов.

Предлагаемая стратегия управления базируется на определении целевой функции f , имеющей экстремум в точке, максимально приближенной к номинальным эксплуатационным характеристикам электрического генератора, на базе которого спроектирована ВЭУ.

Для ВЭУ, структурная схема которой представлена на рис. 1, управляемыми являются два параметра: угол поворота лопасти ветрового генератора β и сигнал управления конвертером d , определяющий его выходное напряжение, как долю входного напряжения (коэффициент заполнения управляющего ШИМ-сигнала – duty cycle). Данные параметры являются управляемыми, а значит могут быть приняты, как переменные для целевой функции $f(d, \beta)$.

Контролируемыми параметрами ВЭУ являются скорость вращения электрического генератора n_{Γ} и генерируемая им электрическая мощность P_{Γ} . Максимальное приближение данных параметров к номинальным значениям $P_{\Gamma, \text{НОМ}}$ и $n_{\Gamma, \text{НОМ}}$ расценивается как достижение оптимального состояния системы. В связи с этим целесообразно определить целевую функцию, как комбинацию относительных расстояний генерируемой мощности $\Delta P_{\Gamma, \text{ОТН}}$ и скорости вращения $\Delta n_{\Gamma, \text{ОТН}}$ от соответствующих номинальных значений:

$$\begin{cases} \Delta P_{\Gamma, \text{ОТН}} = \frac{|P_{\Gamma, \text{НОМ}} - P_{\Gamma}|}{P_{\Gamma, \text{НОМ}}} \\ \Delta n_{\Gamma, \text{ОТН}} = \frac{|n_{\Gamma, \text{НОМ}} - n_{\Gamma}|}{n_{\Gamma, \text{НОМ}}} \end{cases} \quad (3)$$

Очевидно, что сумма $\Delta P_{\Gamma, \text{ОТН}} + \Delta n_{\Gamma, \text{ОТН}}$ стремится к нулю, в случае достижения обоих параметров номинальных значений. Однако в случае, когда скорость ветра ниже средней, на которую рассчитаны параметра ветрового генератора, генерируемая мощность не достигает номинальной,

а значит $\Delta P_{\text{ГОТН}} \neq 0$. При этом сумма $\Delta P_{\text{ГОТН}} + \Delta n_{\text{ГОТН}}$ может достигать экстремума в окрестности наименьших значений $\Delta n_{\text{ГОТН}}$, которые не обеспечивают минимального значения $\Delta P_{\text{ГОТН}}$, а значит максимального приближения P_{Γ} к номинальному значению. Относительное расстояние по оборотам $\Delta n_{\text{ГОТН}}$ нуждается в весовом коэффициенте, определяющем его приоритет по отношению к $\Delta P_{\text{ГОТН}}$. Таким коэффициентом может служить отношение $P_{\Gamma}/P_{\text{ГОТН}}$, который тем больше, чем выше генерируемая электрическая мощность. Таким образом, полученная целевая функция принимает вид:

$$f(d, \beta) = \Delta P_{\text{ГОТН}} + \frac{P_{\Gamma}}{P_{\text{ГОТН}}} \cdot \Delta n_{\text{ГОТН}}. \quad (4)$$

Данную функцию удобнее анализировать, если она нормирована. Переопределим её в следующем виде:

$$f(d, \beta) = \frac{1}{1 + \frac{P_{\Gamma}}{P_{\text{ГОТН}}}} \left(\Delta P_{\text{ГОТН}} + \frac{P_{\Gamma}}{P_{\text{ГОТН}}} \cdot \Delta n_{\text{ГОТН}} \right). \quad (5)$$

При различных постоянных внешних факторах (скорость ветра и потребляемая нагрузкой мощность) данная функция имеет ярко выраженный глобальный минимум (рис. 2).

Задача поиска оптимального состояния ВЭУ исследуемого типа для широкого диапазона скоростей ветра V и мощности нагрузки $P_{\text{н}}$ может быть решена с помощью применения различных способов поиска минимума целевой функции вида (5). Другими словами, применение данного подхода избавляет от необходимости явно выявлять зависимости режимных параметров ВЭУ, т.е. P_{Γ} и n_{Γ} от скорости ветра и нагрузки и использовать датчики скорости ветра.

Для поиска экстремумов многомерных функций применяют ряд известных алгоритмов: алгоритм градиентного поиска (gradient search method), алгоритм наискорейшего спуска (steepest descent method), метод смежных градиентов (conjugate gradient method). Суть всех этих методов сводится к следующему.

Пусть в некоторый момент времени имеем некоторый вектор x_k из пространства векторов $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. В нашем случае вектор x_k является двухмерным:

$$\bar{x}_k = \begin{bmatrix} d_k \\ \beta_k \end{bmatrix}. \quad (7) \quad (6?)$$

Функция (5) в данном случае имеет значение $f(x_k)$. Каждое следующее значение x_{k+1} должно вести к уменьшению значения функции f :

$$f(\bar{x}_{k+1}) < f(\bar{x}_k). \quad (8)$$

Таким образом, расстояние $\Delta x_k = x_{k+1} - x_k$, должно вести к уменьшению функции f , то есть когда

$$\Delta \bar{x}_k = -\alpha_k \bar{g}_k, \quad (9)$$

где g_k – градиент, показывающий направление наибольшего возрастания функции f в точке x_k , а α_k – коэффициент, определяющий скорость движения по функции $f(x)$. Ключевое различие методов поиска экстремума заключается в методике определения коэффициента α_k .

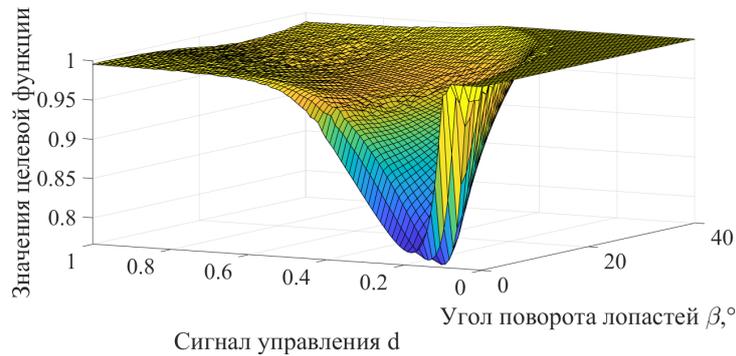


Рис. 2. Значения целевой функции для скорости ветра 5 м/с и мощности нагрузки 3000 Вт
 Fig. 2. Objective function values for 5 m/s wind speed and 3000 W load power

Метод градиентного поиска

Для метода градиентного поиска характерно определение единичного вектора направления $S(x_k)$.

$$\bar{S}(x_k) = \cos \varphi_k = \frac{\bar{g}_k}{\|\bar{g}_k\|}, \quad (10)$$

где φ_k – угол наклона вектора градиента. Тогда

$$\bar{x}_{k+1} = \bar{x}_k + \Delta \bar{x}_k = \bar{x}_k - \alpha_k \bar{S}_k. \quad (11)$$

В данном методе используется дробный коэффициент α_k , определяемый следующим образом:

$$\alpha_{k+1} = \begin{cases} \alpha_k / 2, & \text{при } \varphi_k > 60^\circ \\ \alpha_k, & \text{при } 60^\circ < \varphi_k < 90^\circ \\ 2\alpha_k, & \text{при } \varphi_k < 30^\circ \end{cases} \quad (12)$$

Метод наискорейшего спуска

Данный метод отличается от предыдущего способом определения коэффициента α_k . Здесь этот коэффициент определяется следующим образом:

$$\alpha_k = -\frac{\bar{g}_k^T \bar{p}_k}{\bar{p}_k^T A_k \bar{p}_k}, \quad (13)$$

где $A_k = \nabla^2 f(x_k)$ – матрица Гессе, $\bar{p}_k = -\bar{g}_k$ – вектор направления, обратного направлению градиента. Формула (13) получается при исследовании разложения функции $f(x_k)$ в ряд Тейлора до второй производной [13]. Формула (13) приобретает следующий вид:

$$\bar{x}_{k+1} = \bar{x}_k - \alpha_k \bar{g}_k. \quad (14)$$

Метод смежных градиентов

Преимущество метода смежных градиентов перед методом наискорейшего спуска заключается в том, что он позволяет построить более гладкую траекторию до экстремума на поверхности, близкой к квадратичной. Алгоритм метода смежных градиентов начинается с направления $\bar{p}_0 = -\bar{g}_0$.

$$\bar{x}_1 = \bar{x}_0 + \alpha_0 \bar{p}_0, \quad (15)$$

где α_k может определяться по формуле (15). Для следующих итераций вектор \bar{p}_k определяется следующим образом:

$$\bar{p}_k = -\bar{g}_k + \beta_k \bar{p}_{k-1}. \quad (16)$$

В формуле (16) скалярный коэффициент β_k может быть определен по ряду методов [14]. Например, с помощью метода Хестенса и Штифеля (Hestenes and Stiefel):

$$\beta_k = -\frac{\Delta \bar{g}_{k-1}^T \bar{g}_k}{\Delta \bar{g}_{k-1}^T \bar{p}_k}. \quad (17)$$

Также возможно применение методики Флетчера и Ривза (Fletcher and Reeves)

$$\beta_k = -\frac{\bar{g}_k^T \bar{g}_k}{\bar{g}_{k-1}^T \bar{g}_{k-1}}, \quad (18)$$

или Полака и Рибье (Polak and Ribère):

$$\beta_k = -\frac{\Delta \bar{g}_{k-1}^T \bar{g}_k}{\bar{g}_{k-1}^T \bar{g}_{k-1}}. \quad (19)$$

Следующие итерации описываются формулой (20):

$$\bar{x}_{k+1} = \bar{x}_k + \alpha_k \bar{p}_k = \bar{x}_k - \alpha_k \beta_k \bar{g}_k. \quad (20)$$

Алгоритм управления ВЭУ

Сравнение методов поиска экстремума производилось на базе модели ветровой энергетической установки в программе Matlab/Simulink. Структурная схема модели представлена на рис. 3. Контроллер реализует алгоритм управления, основанный на одном из указанных методов поиска экстремума. Структурная схема алгоритма показана на рис. 4.

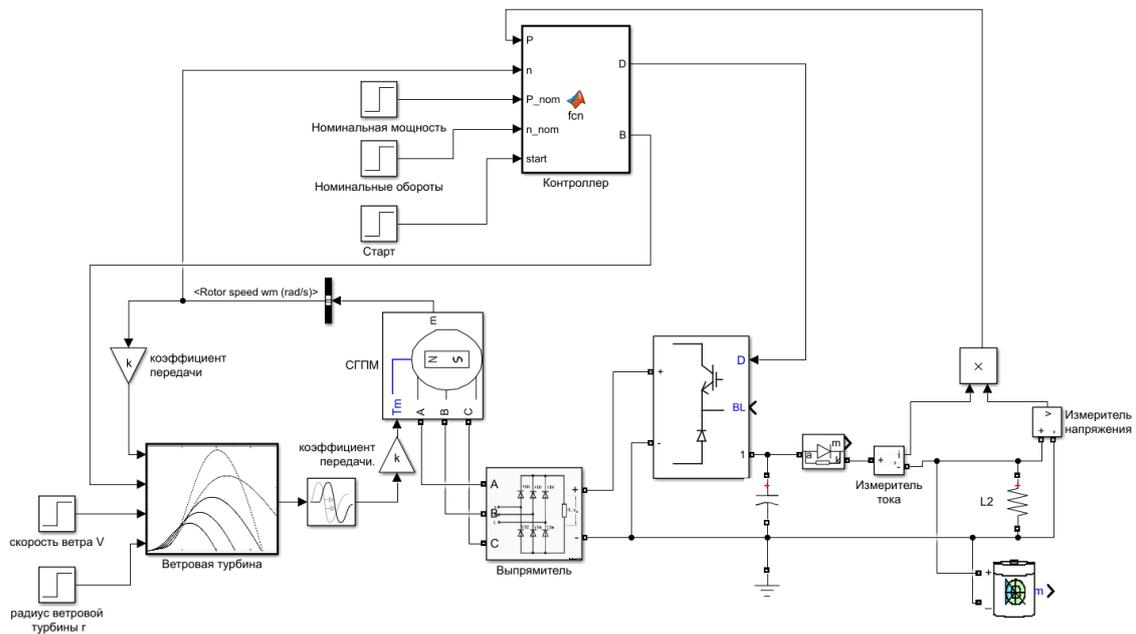


Рис. 3. Модель автономной энергетической установки с контроллером управления
 Fig. 3. Autonomous energy plant model with control module

При построении данной компьютерной модели ВЭУ скорость ветра V и нагрузка P_H были постоянными значениями. Результатом моделирования стали зависимости генерируемой мощности P_G и скорости вращения генератора n_G от управляемых параметров, на основе которых рассчитана целевая функция. Генератор, имеющий следующие параметры, был выбран в качестве основы модели синхронного генератора на постоянных магнитах:

Генератор	$\omega'_{Г.ном}$, об/мин	$P_{Г.ном}$, кВт	$R_{обм}$, Ом	$U_{м.хх.л}$ (1000)	$L_{обм}$, мГн	$2p$	J , кг·м ²
P21R100L6	1000	3	2,7	305	14	6	0.00625

Параметры АКБ: напряжение 24 В, ёмкость 400 Ач, внутреннее сопротивление 0,6 мОм.

Контроллер осуществляет управление конвертером и углом поворота лопастей по значениям мощности на выходе конвертера и скорости вращения генератора. Изменение состояния системы происходит в соответствии с изменением скорости ветра и мощности, потребляемой нагрузкой. На рис. 6 представлен алгоритм управления ВЭУ, реализуемый контроллером. Алгоритм начинается с инициализации начальных параметров d_0 и β_0 . Далее происходит проверка уровня заряда АКБ. Если он низкий (менее 10%), принимается решение об отключении нагрузки и вся вырабатываемая мощность расходуется на заряд АКБ до значения 30%. Затем нагрузка подключается к системе. За оптимальное значение мощности $P_{опт}$ в данном случае берется номинальная мощность генератора $P_{ном}$. При уровне заряда АКБ более 90% в качестве оптимальной мощности генератора используется мощность, потребляемая нагрузкой в данный момент ($P_{опт} = P_H$). Оптимальная скорость вращения генератора $n_{опт}$ всегда равна номинальному значению $n_{ном}$. После определения оптимальных значений $P_{опт}$ и $n_{опт}$ запускается работа одного из описанных выше методов поиска экстремума. Генерируются значения d_{k+1} и β_{k+1} , затем алгоритм повторяется.

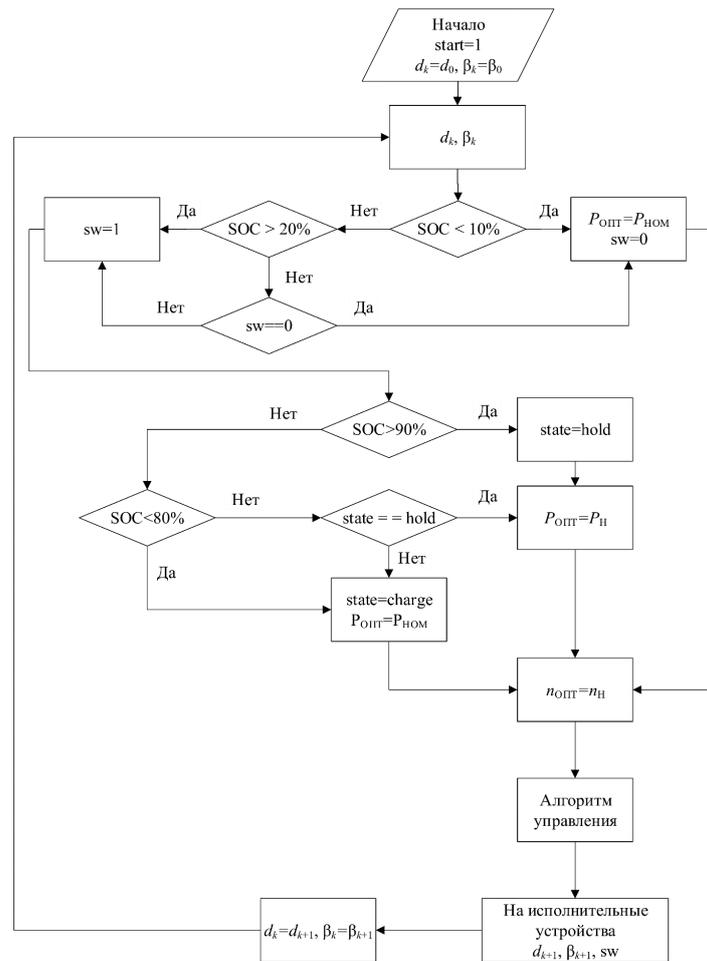


Рис. 4. Структурная схема алгоритма управления ВЭУ

Fig. 4. Structure of wind energy plant control algorithm

Результаты моделирования

Применение каждого из методов характеризуется своими особенностями, связанными с вероятностью нахождения глобального минимума, возможностью удержания системы в оптимальном состоянии, определяющей стабильность системы и, как следствие, её эффективность. На рис. 6 изображены контурные графики, соответствующие поверхности, изображенной на рис. 5. Синяя линия показывает траекторию нахождения глобального минимума разными алгоритмами.

Определим, каким образом на результат работы алгоритма могут влиять начальные условия: начальные значения d_0 и β_0 . Для оценки всех этих параметров была проведена серия симуляций с разными значениями d_0 и β_0 . Для каждого случая было рассчитано среднее значения модуля вектора ошибки $|\Delta d_k, \Delta \beta_k|$, показывающего расстояние от фактического состояния системы $[d_k, \beta_k]$ до точки, соответствующей оптимуму $[d_{opt}, \beta_{opt}]$. Гистограммы на рис. 6 показывают долю средних значений вектора ошибки, каждое из которых получено по результатам сеанса моделирования для своих начальных условий d_0 и β_0 . Необходимо отметить, что значение β нормировано относительное максимального значения β_{max} и изменяется в диапазоне $[0, 1]$ так же, как и значение d .

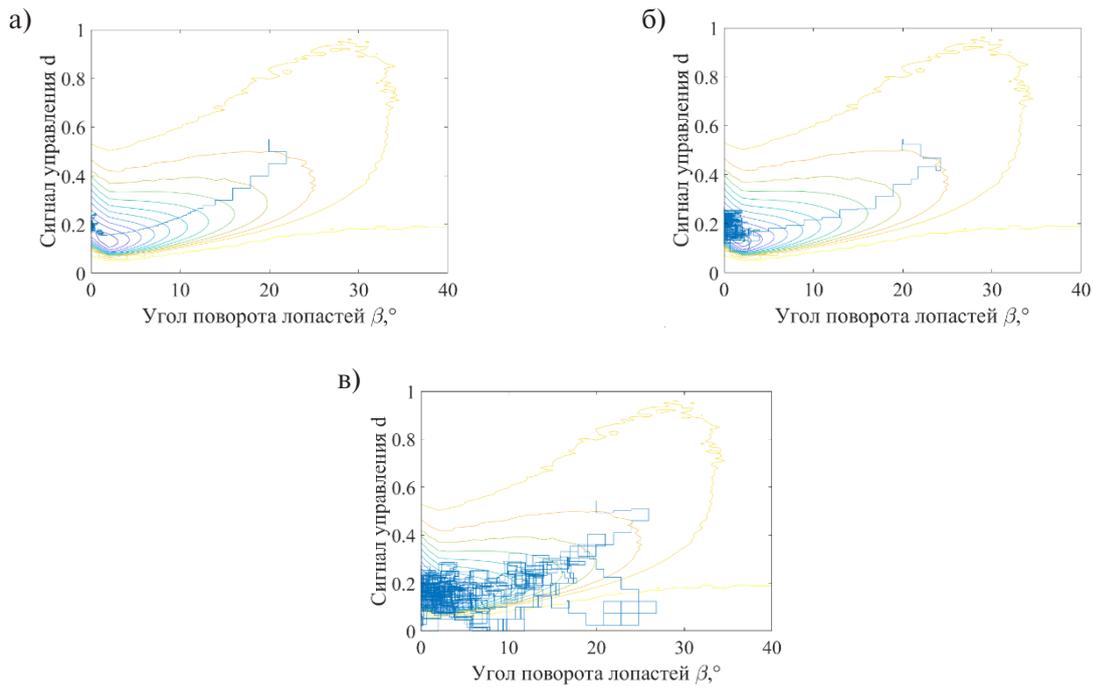


Рис. 5. Примеры поиска минимума целевой функции методами градиентного поиска (а), наискорейшего спуска (б) и смежных градиентов (в)

Fig. 5. Examples of objective function minimum searching with gradient search method (а), steepest descent method (б) and conjugate gradients method (в)

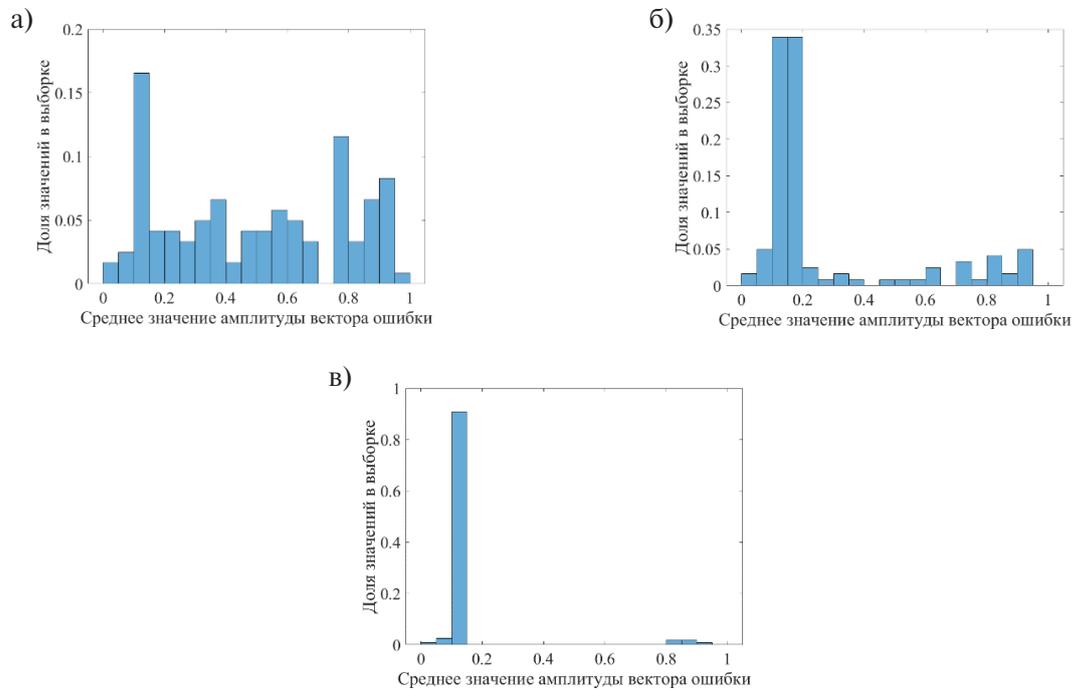


Рис. 6. Гистограммы распределений среднего значения модуля вектора ошибки при системе управления, реализованной методами градиентного поиска (а), наискорейшего спуска (б) и смежных градиентов (в) при скорости ветра 3 м/с

Fig. 6. Distribution histograms of mean value of error vector module, reached by control system with gradient search (а), steepest descent (б) and conjugate gradient (в) methods and wind speed 3 m/s

Из рис. 7 видно, что при малых скоростях ветра (3 м/с) реализованный в данной модели алгоритм, основанный на методе градиентного поиска, дает значительную ошибку поиска минимума. Для алгоритма, основанного на методе смежных градиентов, почти 90% всех результатов поиска минимума завершились с средней ошибкой 0,1–0,15. Для полученных гистограмм для 3, 5, 10, 15 и 20 м/с были определены параметры нормального распределения и сведены в табл. 1. Видно, что наименьшие параметры математического ожидания μ и дисперсии σ имеет модуль вектора ошибки, соответствующий применению метода смежных градиентов. Вторым по эффективности метод наискорейшего спуска. Самым неэффективным можно считать метод градиентного поиска, модуль вектора ошибки которого для скорости ветра 3 м/с составил 0,5, а для 5 м/с – 0,3.

Таблица 1

Параметры нормального распределения, определенные для среднего значения модуля вектора ошибки

Table 1

Normal distribution parameters, determined for mean value of error vector module

V, м/с	Метод градиентного поиска		Метод наискорейшего спуска		Метод смежных градиентов	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
3	0,5006	0,3037	0,2906	0,2782	0,1673	0,1842
5	0,3128	0,3235	0,1628	0,2232	0,1146	0,1343
10	0,0426	0,1127	0,0885	0,2248	0,0401	0,0459
15	0,1249	0,1957	0,1773	0,2441	0,0675	0,1221
20	0,1818	0,3238	0,2022	0,3155	0,0522	0,1236

Наряду с вектором ошибки так же произведена оценка средних значений контролируемых параметров: генерируемой мощности P и скорости вращения n . Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Средние значения контролируемых параметров

Table 2

Mean values of controlled parameters

V, м/с	Метод градиентного поиска		Метод наискорейшего спуска		Метод смежных градиентов	
	P, Вт	n, об/мин	P, Вт	n, об/мин	P, Вт	n, об/мин
3	41	182	76,6	255	83	268
5	335	419	399	525	306	656
10	2895	1067	2751	1029	2950	1111
15	2863	1184	2650	1124	2949	1073
20	2600	1359	2585	1443	2948	1071

Теперь покажем, результат работы имитационной модели ВЭУ. В программной среде Matlab проведено моделирование работы автономной энергетической установки, структурная схема которой изображена на рисунке. Система управления ВЭУ построена на поиске минимума целевой функции (8) с помощью метода наискорейшего спуска. Моделирование изменения скорости ветра производится с различными распределениями вероятности [15]. В данной работе модель скорости ветра представляет собой изменение случайной величины с нормальным распределением.

Начальные параметры d_0 и β_0 были инициализированы значениями 0,5 и 20° соответственно. Также среди начальных параметров производилась инициализация начального значения уровня заряда АКБ (State of charge – SOC), измеряемом в процентах. Входным воздействием на систему является скорость ветра, представляющий собой случайный процесс с нормальным распределением. Моделирование работы ВЭУ проводилось для различных условий: для условного безветренного дня, дня с умеренной скоростью ветра, дня со средним ветром, сильным ветром и штормом. Параметры случайного распределения и начальное значение SOC сведены в табл. 3.

В качестве примера на рис. 7 приведены графики изменения параметров ветровой установки в течение суток для сильного ветра при использовании алгоритма управления, основанного на методе градиентного поиска.

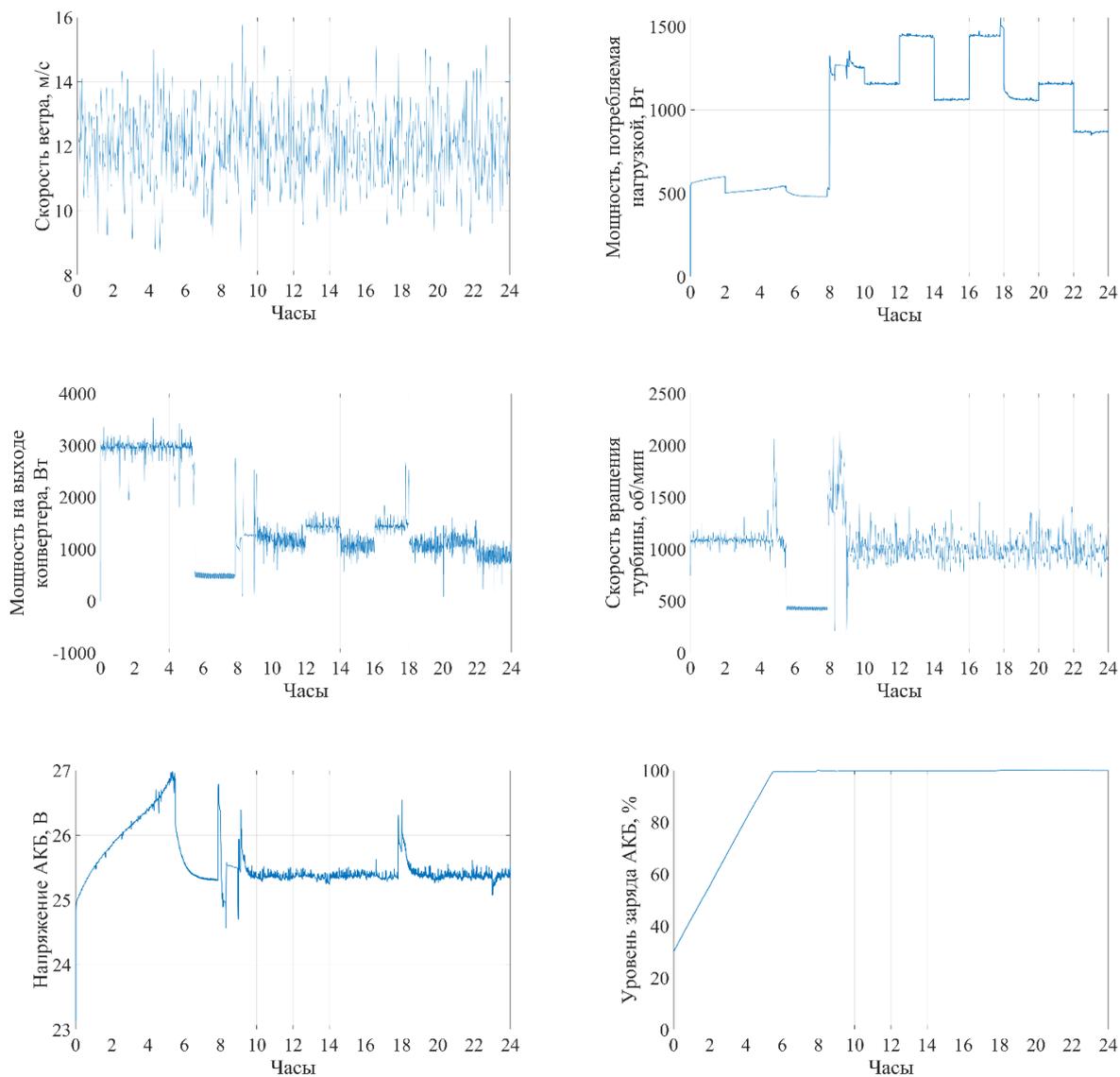


Рис. 7. Динамика параметров ВЭУ за сутки при работе в условиях сильного ветра со средним значением 12 м/с

Fig. 7. Dynamic of wind energy plant's parameters during a day with strong wind conditions (mean value 12 m/s)

Для удобства сравнения алгоритмов управления, основанных на разных методах поиска экстремума, была произведена оценка среднего значения коэффициента C_p , электроэнергии, выработанной ветрогенератором за сутки, E , кВтч. Результаты сведены в табл. 3.

Таблица 3

Условия моделирования ВЭУ и результаты её работы

Table 3

Wind energy plant modeling conditions and results

	Параметры условий работы			Градиентный поиск		Наискорейший спуск		Метод смежных градиентов	
	$\mu_{\text{ветра}},$ м/с	$\sigma_{\text{ветра}},$ м/с	SOC(0), %	C_p	$E,$ кВтч	C_p	$E,$ кВтч	C_p	$E,$ кВтч
Слабый ветер	3	0,75	100	0.45	3.05	0.43	2.83	0.35	2.29
Умеренный ветер	5	1,25	70	0.43	12.61	0.42	11.75	0.30	8.72
Средний ветер	8	1,5	30	0.36	36.37	0.35	35.46	0.31	31.93
Сильный ветер	12	1,5	30	0.14	36.44	0.12	34.83	0.13	–
Штормовой ветер	16	2,75	5	0.1218	39.8836	0.0969	39.8334	0.1134	–

Из приведенных результатов видно, что в условиях динамически изменяющихся входных параметров в виде скорости ветра и мощности, потребляемой нагрузкой, алгоритм управления, основанный на методе градиентного поиска, показывает наилучшие результаты: наиболее высокий коэффициент C_p и максимальную генерируемую электроэнергию E . Метод смежных градиентов показывает самую низкую эффективность работы алгоритма управления.

Выводы

В данной работе на основании результатов компьютерного моделирования автономной ВЭУ обоснована возможность применения алгоритмов, основанных на методе градиентного спуска, методе наискорейшего спуска, методы смежных градиентов для нахождения минимума целевой функции вида (5), определяющей оптимальное состояние ВЭУ. Приведенные результаты имитационного моделирования показывают, что построение системы управления ВЭУ на основе методов поиска экстремума приведенной целевой функции (8) позволяют с хорошей точностью достигать режимных параметров ВЭУ при стохастическом характере ветрового воздействия и наличии псевдослучайной нагрузки. Проведено сравнение алгоритмов управления, основанных на методе градиентного поиска, методе наискорейшего спуска и методе смежных градиентов. Показано, что методы наискорейшего спуска и смежных градиентов показывают наилучшую способность к отысканию минимума при статичном состоянии внешних параметров (скорости ветра и мощности нагрузки) в широком диапазоне начальных параметров d_0 и β_0 . Однако, в случае динамически изменяющихся параметров условий работы ВЭУ метод градиентного поиска показывает наилучшую эффективность, что подтверждается высокими значениями параметров, определяющих эффективность системы (коэффициент использования энергии ветра C_p и генерируемая за сутки электроэнергия E). Таким образом, применение данных алгоритмов для решения задачи управления ВЭУ потенциально позволяет выбрать оптимальный режим автономной энергетической установки и осуществлять подстройку режимных параметров установки в условиях динамически меняющихся эксплуатационных условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Tummala A., Velamati R.K., Sinha D.K., Indraja V., Krishna V.H.** A review on small scale wind turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, April 2016, Vol. 56, P. 1351–1371.
- [2] **Чижма С.Н., Захаров А.И.** Методика расчета оптимальной конфигурации ветрового генератора. // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки*. 2019. № 3. С. 110–119.
- [3] **Cetina K.S., Tabares-Velasco P.C., Novoselac A.** Appliance daily energy use in new residential buildings: Use profiles and variation in time-of-use, *Energy and Buildings*. – December 2014, Vol. 84, P. 716–726.
- [4] **Захаров А.И., Чижма С.Н.** Исследование работы ветрового генератора. // *Материалы VII Международного Балтийского морского форума. В 6-ти томах. 2019* Издательство: Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Калининградский государственный технический университет".
- [5] **Лукутин Б.В.** Возобновляемые источники энергии: Учеб. пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 187 с.
- [6] **Рамадан А., Елистратов В.В.** Моделирование и управление сетевой ветроэнергетической установкой с асинхронным генератором двойного питания // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2018. Т. 24. № 3. С. 22–37.
- [7] **Heier S.** *Grid integration of wind energy*, Third ed., Wiley, 2014.
- [8] **Ningsu L., Yolanda V., Leonardo A.** *Wind Turbine Control and Monitoring*. Springer International Publishing Switzerland, 2014.
- [9] **Koutroulis E., Kalaitzakis K.** Design of a maximum power tracking system for wind energy conversion applications, *IEEE Trans. Industr. Electron.* 53(2) (2006) 486–494.
- [10] **Femia N., Granozio D., Petrone G., Spagnuolo G., Vitelli M.** Predictive & adaptive MPPT perturb and observe method, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 43(3) (2007) 934–950.
- [11] **Rekioua D.** *Wind Power Electric Systems Modeling, Simulation and Control*, Springer, 2014.
- [12] **Martinez-Rojas M., Sumper A., Gomis-Bellmunt O.** Reactive power management in wind farms using PSO technique, 2010, *EPE J*.
- [13] **Hagan M.T., Demuth H.B.** *Neural Network Design*, 2nd Edition.
- [14] **Scales L.E.** *Introduction to Non-Linear Optimization*, New York: Springer-Verlag, 1985.
- [15] **Akgül F.G., Senoglu B., Arslan T.** An alternative distribution to Weibull for modeling the wind speed data: Inverse Weibull distribution, *Energy Conversion and Management*, Vol. 114, 15 April 2016, P. 234–240.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЗАХАРОВ Артём Игоревич – старший преподаватель, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, без степени.
E-mail: AIZakharov@kantiana.ru

ЧИЖМА Сергей Николаевич – профессор, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, д-р техн. наук.
E-mail: chisn@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 10.09.2020

REFERENCES

- [1] **A. Tummala, R.K. Velamati, D.K. Sinha, V. Indraja, V.H. Krishna**, A review on small scale wind turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, April 2016, Vol. 56, P. 1351–1371.

- [2] **S.N. Chizhma, A.I. Zakharov**, Metodika rascheta optimalnoy konfiguratsii vetrovogo generatora. // Vestnik Baltiyskogo federalnogo universiteta im. I. Kanta. Ser.: Fiziko-matematicheskiye i tekhnicheskiye nauki. 2019. № 3. S. 110–119.
- [3] **K.S. Cetina, P.C. Tabares-Velasco, A. Novoselac**, Appliance daily energy use in new residential buildings: Use profiles and variation in time-of-use, Energy and Buildings. – December 2014, Vol. 84, P. 716–726.
- [4] **A.I. Zakharov, S.N. Chizhma**, Issledovaniye raboty vetrovogo generatora // Materialy VII Mezhdunarodnogo Baltiyskogo morskogo foruma. V 6-ti tomakh. 2019 Izdatelstvo: Baltiyskaya gosudarstvennaya akademiya rybopromyslovogo flota federalnogo gosudarstvennogo byudzhethnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Kaliningradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet".
- [5] **B.V. Lukutin**, Vozobnovlyayemye istochniki energii: Ucheb. posobiye. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2008. 187 s.
- [6] **A. Ramadan, V.V. Yelistratov**, Modelirovaniye i upravleniye setevoy vetroenergeticheskoy ustanovkoy s asinkhronnym generatorom dvoynogo pitaniya // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestvennyye i inzhenernyye nauki. 2018. T. 24. № 3. S. 22–37.
- [7] **S. Heier**, Grid integration of wind energy, Third ed., Wiley, 2014.
- [8] **L. Ningsu, V. Yolanda, A. Leonardo**, Wind Turbine Control and Monitoring. Springer International Publishing Switzerland, 2014.
- [9] **E. Koutroulis, K. Kalaitzakis**, Design of a maximum power tracking system for wind energy conversion applications, IEEE Trans. Industr. Electron. 53(2) (2006) 486–494.
- [10] **N. Femia, D. Granozio, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli**, Predictive & adaptive MPPT perturb and observe method, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 43(3) (2007) 934–950.
- [11] **D. Rekioua**, Wind Power Electric Systems Modeling, Simulation and Control, Springer, 2014.
- [12] **M. Martinez-Rojas, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt**, Reactive power management in wind farms using PSO technique, 2010, EPE J.
- [13] **M.T. Hagan, H.B. Demuth**, Neural Network Design, 2nd Edition.
- [14] **L.E. Scales**, Introduction to Non-Linear Optimization, New York: Springer-Verlag, 1985.
- [15] **F.G. Akgül, B. Senoglu, T. Arslan**, An alternative distribution to Weibull for modeling the wind speed data: Inverse Weibull distribution, Energy Conversion and Management, Vol. 114, 15 April 2016, P. 234–240.

THE AUTHORS

ZAKHAROV Artem I. – *Baltic Federal University of Immanuel Kant.*
E-mail: AIZakharov@kantiana.ru

CHIZHMA Sergey N. – *Baltic Federal University of Immanuel Kant.*
E-mail: chisn@yandex.ru

Received: 10.09.2020

DOI: 10.18721/JEST.26404

УДК 621.438

*А.А. Калютик, Д.А. Трещёв, М.А. Трещёва*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЭКОНОМИИ ТОПЛИВА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОФИКАЦИОННОЙ ПГУ

Обоснована возможность использования показателя относительной экономии топлива по сравнению с отдельной выработкой при решении задач, связанных с оптимизацией теплофикационных парогазовых установок (ТПГУ), в современных экономических условиях. Установлена взаимосвязь величины относительной экономии топлива по сравнению с отдельной выработкой для ТПГУ с внешними (системными) условиями, параметрами, структурой и режимом работы энергоустановки, а также интегральным экономическим эффектом. Установлено, что при заданном типе газотурбинной установки КПД цикла, удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении и относительная экономия топлива по сравнению с отдельной выработкой ТПГУ определяется параметрами утилизационного контура. Установлено, что коэффициент использования теплоты топлива ТПГУ, практически не зависит от начальных параметров пара. Установлено, что КПД цикла, удельная выработка на тепловом потреблении и относительная экономия топлива по сравнению с отдельной выработкой ТПГУ имеют ярко выраженный максимум, достигаемый при одном и том же значении начального давления пара. С помощью показателя относительной экономии топлива по сравнению с отдельной выработкой проведена оптимизация начального давления пара для ТПГУ (на базе ГТУ GT13E2) с паровым контуром одного уровня давления. Для данного типа ТПГУ оптимальное начальное давление составляет 5,5-6 МПа, в то время как для ПГУ-КЭС на базе аналогичной ГТУ оптимальное начальное давление пара составляет 3-3,5 МПа. Показано, что существенное влияние на относительную экономию топлива по сравнению с отдельной выработкой в ТПГУ оказывают внешние условия, отражаемые типом (эффективностью) замещающей КЭС. Так относительная экономия топлива для рассматриваемой ТПГУ (на базе ГТУ GT13E2) по сравнению с ПГУ-КЭС на базе аналогичной ГТУ составляет 26-26,5%, а по сравнению с ПТУ-КЭС на базе серийного блока К-300-240 относительная экономия топлива увеличится до 37,9%.

Ключевые слова: теплоэлектростанции, теплофикация, когенерационные установки, парогазовые установки, экономия топлива.

Ссылка при цитировании:

Калютик А.А., Трещёв Д.А., Трещёва М.А. Использование показателя относительной экономии топлива для оптимизации параметров теплофикационной ПГУ // Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26, № 4. С. 51–63. DOI: 10.18721/JEST.26404

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

A.A. Kalyutik, D.A. Treshchev, M.A. Treshcheva

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

USE OF RELATIVE FUEL ECONOMY INDICATOR FOR OPTIMIZATION OF CHP CCGT PARAMETERS

The paper justifies a possibility of using an indicator of relative fuel economy in comparison with separate generation of electric power and heat in solving problems related to optimization of combined heat and power combined-cycle gas plants (CHP CCGT) in modern economic conditions. We established the relationship between the value of relative fuel economy in comparison with the separate generation of electric power and heat for CCGT with external (system) conditions, parameters, structure and mode of operation of the power plant, as well as the integral economic effect. It was found that for a given type of gas turbine (GT), the efficiency of the cycle, the specific generation of electricity at thermal consumption and the relative fuel economy in comparison with the separate generation of electric power and heat for CCGT is determined by the parameters of the utilization circuit. It was found, that the coefficient of heat use of fuel of CCGT, practically does not depend on the initial parameters of steam. It was found, that the cycle efficiency, the specific generation of electricity at thermal consumption and relative fuel economy in comparison with the separate generation of electric power and heat for CCGT have a pronounced maximum, achieved at the same value of the initial steam pressure. The initial steam pressure was optimized for a CCGT (based on GT13E2) with a steam circuit of the same pressure level using the indicator of relative fuel economy compared to separate generation of electric power and heat. For this type of CCGT thermal power station, the optimal initial pressure is 5.5-6 MPa, while for a CCGT electric power station (based on GT13E2), the optimal initial steam pressure is 3-3.5 MPa. It was found that external conditions, reflected by the type (efficiency) of the replaced electric power station, have significant impact on the relative fuel economy in comparison with separate generation of electric power and heat for CCGT. The relative fuel economy in comparison with separate generation of electric power and heat for CCGT thermal power station (based on GT13E2) compared to the CCGT electric power station (based on GT13E2) is 26-26.5%, and compared to the steam power plant (based on the C-300-240 serial unit), the relative fuel economy will increase to 37.9%.

Keywords: thermoelectric power plants, heating, cogeneration plants, combined cycle power plants, fuel economy.

Citation:

A.A. Kalyutik, D.A. Treshchev, M.A. Treshcheva, Use of relative fuel economy indicator for optimization of CHP CCGT parameters, Materials Science. Power Engineering, 26 (04) (2020) 51–63, DOI: 10.18721/JEST.26404

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

Введение. В условиях прогнозируемых изменений в экономике России, необходимо продолжать переход к более эффективной, гибкой и устойчивой энергетике, адекватно реагирующей на внутренние и внешние вызовы и способной преодолеть, как уже имеющиеся, так и потенциальные проблемы¹. Подобный переход должен по-прежнему основываться на повышении эффективности систем тепло- и электроснабжения [1–2].

В настоящее время, доля тепловых электрических станций (ТЭС) в структуре установленной мощности электростанций России составляет 67%. При этом 78% из них функционирует на базе паросиловых установок (ПСУ), 16% на базе парогазовых установок (ПГУ), а 5 % на базе газотурбинных установок².

Тенденции последних 15 лет, связанные с оптимизацией загрузки генерирующего оборудования и увеличением доли когенерации, наряду с последовательным обновлением основных

¹ Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации, утв. Указом Президента Российской Федерации № 216 от 13 мая 2019 г.

² Отчет о функционировании ЕЭС России в 2019 году.

фондов ТЭС с использованием современных, в том числе парогазовых технологий, привели к снижению удельных расходов топлива по энергопредприятиям России³ [3–4]. Так, усредненные по электроэнергетической отрасли России, удельные расходы условного топлива на выработку электрической и тепловой энергии в 2018 г. составили 309,8 г.у.т./кВт·ч и 169,2 кг.у.т./Гкал соответственно. При этом удельный расход условного топлива на выработку теплоэнергии на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) в 2018 г. составил 154,2 кг.у.т./Гкал, что на 19,6 кг.у.т./Гкал ниже соответствующего показателя для котельных (173,8 кг.у.т./Гкал), а доля выработки электроэнергии по теплофикационному циклу – 30%⁴.

Однако, планируемое в соответствии с «Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2035 года», дальнейшее увеличение доли выработки электроэнергии по теплофикационному циклу к 2024 году до 33% и к 2035 г. до 40%, а также снижение средних по энергопредприятиям страны удельных расходов топлива к 2024 году до уровня 285,4 г.у.т./кВт·ч и 164,2 кг.у.т./Гкал и к 2035 г. до уровня 255,6 г.у.т./кВт·ч и 159,3 кг.у.т./Гкал объективно достижимо прежде всего за счет сохранения приоритета комбинированной выработки и увеличения в структуре генерирующих мощностей доли теплофикационных парогазовых установок (ТПГУ).

Одной из важнейших задач при проектировании когенерационных установок является выбор и обоснование параметров и тепловой схемы [5–15].

Цель работы – оценить возможность использования относительной экономии топлива по сравнению с раздельной выработкой при оптимизации ТПГУ в современных экономических условиях.

Методы и материалы

Использование показателя относительной экономии топлива по сравнению с раздельной выработкой при оценке энергетической эффективности когенерационных установок обусловлено тем, что комбинированная выработка на ТЭС дает возможность значительно сократить потребление топлива по сравнению с раздельным производством электроэнергии на конденсационных станциях (КЭС), а тепловой энергии на водогрейных котельных [5–7].

Выражение для определения относительной экономии топлива по сравнению с раздельной выработкой в общем виде выглядит следующим образом:

$$\overline{\Delta Q_{mon}} = \frac{\Delta Q_{mon}}{Q_{mon}^{BK} + Q_{mon}^{KЭС}}, \quad (1)$$

где ΔQ_{mon} – экономия тепла топлива в ТПГУ по сравнению с раздельной выработкой;
 Q_{mon}^{BK} , $Q_{mon}^{KЭС}$ – теплота подведенная с топливом к водогрейной котельной и замещаемой КЭС соответственно, при раздельной выработке.

После ряда преобразований выражение (1) может быть приведено к следующему виду:

$$\overline{\Delta Q_{mon}} = 1 - \frac{\eta_{KЭС} \cdot \left(1 + \frac{1}{y}\right)}{\eta_{umt} \cdot \left(1 + \frac{1}{y} \cdot \frac{\eta_{KЭС}}{\eta_{BK}}\right)}. \quad (2)$$

³ Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года, утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации № 1523-р от 09.06.2020 г.

⁴ Теплоэнергетика и централизованное теплоснабжение России в 2014-2018 годах (информационно-аналитический доклад).

где $\eta_{БК}$ – КПД замещающей водогрейной котельной;

$\eta_{КЭС}$ – КПД замещающей КЭС;

η_{umm} – коэффициент использования теплоты топлива;

y – удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении.

Из выражения (2) видно, что относительная экономия топлива по сравнению с отдельной выработкой зависит, как от характеристик энергосистемы, в которой располагается установка ($\eta_{КЭС}$ и $\eta_{БК}$), так и от режимных параметров самой установки (η_{umm} и y).

Коэффициент использования теплоты топлива для теплофикационной установки не зависит от совершенства цикла, в котором производится электроэнергия. Следовательно, изменение тепловой схемы и параметров утилизационного контура ТПУ не значительно влияет на η_{umm} .

Выражение для удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении имеет вид:

$$y = \frac{N_{\text{э}}}{Q_T} \quad (3)$$

или

$$y = \frac{1}{\frac{\eta_{umm}}{\eta_0} - 1}, \quad (4)$$

где η_0 – КПД цикла, в котором вырабатывается электроэнергия.

Из выражения (4) видно, что основным показателем, зависящим от параметров и структуры установки и влияющим на коэффициент выработки на тепловом потреблении, является КПД цикла, в котором вырабатывается электроэнергия (рост η_0 дает увеличение коэффициента y).

Обычно при проектировании ПГУ изначально задается тип ГТУ, а следовательно, ее электрическая мощность, расход топлива и параметры уходящих из ГТУ газов. Наиболее существенное значение, при такой постановке задачи, оказывают параметры утилизационного контура. Их влияние на эффективность конденсационной ПГУ описано в ряде научных работ [8–9]. В общем случае зависимость имеет вид:

$$\eta_0 = f(p_0; t_0; p_K; \eta_{oi}; \Delta t_{\min}; y_k; X), \quad (5)$$

где p_0, t_0 – давление и температура острого пара;

p_K – давление в конденсаторе;

η_{oi} – относительный внутренний КПД ПТУ;

Δt_{\min} – минимальный температурный напор КУ;

y_k – степень влажности пара в конце процесса расширения;

X – совокупность дискретных параметров, определяющих структуру установки [16].

В ТПУ, в отличие от конденсационных установок, определяющим конечным давлением становится давление в нижнем теплофикационном отборе ($p_{но}$), определяющее тепловую нагрузку подогревателей сетевой воды. Соответственно зависимость (6) будет иметь вид:

$$\eta_0 = f(p_0; t_0; p_{но}; \eta_{oi}; \Delta t_{\min}; y_k; X), \quad (6)$$

где p_{no} – давление в нижнем теплофикационном отборе.

Соответственно могут быть получены аналитические зависимости между коэффициентом выработки электроэнергии на тепловом потреблении, а также относительной экономии топлива в ТПГУ по сравнению с отдельной выработкой и параметрами и структурой ее утилизационного контура в виде:

$$y = f(p_0; t_0; p_{no}; \eta_{oi}; \Delta t_{\min}; y_k; X), \quad (7)$$

$$\overline{\Delta Q_{\text{мон}}} = f(p_0; t_0; p_{no}; \eta_{oi}; \Delta t_{\min}; y_k; X; \eta_{КС}; \eta_{БК}). \quad (8)$$

В условиях рыночной экономики перед российскими энергокомпаниями встает задача максимизации прибыли при работе на конкурентном рынке [1–4]. Поэтому основными критериями выбора оптимального варианта при проектировании энергоустановок являются финансово-экономические показатели.

Основным показателем экономической эффективности проекта является чистый дисконтированный доход (ЧДД), определяемый как [17–18]:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T \frac{ДП_t}{(1 + E_n)^t} = \sum_{t=0}^T \frac{D_t}{(1 + E_n)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{З_t}{(1 + E_n)^t}, \quad (9)$$

где $ДП_t$ – денежный поток соответствующего года t ;

T – срок службы энергоустановки;

E_n – норма дисконта.

D_t – поступление денежных средств от продажи электрической и тепловой энергии в соответствующем году t ;

$З_t$ – затраты денежных средств (капитальные и операционные) в соответствующем году t ;

Показатель (9) можно рассматривать в относительном виде с целью сравнения вариантов реализации технических решений. Если в качестве базы сравнения использовать отдельную выработку, в полученном выражении (10) слагаемое ΔI_t фактически представляет собой относительную экономию топлива по сравнению с отдельной выработкой.

$$\Delta \text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T \frac{\Delta D_t}{(1 + E_n)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{\Delta K_t}{(1 + E_n)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{\Delta I_t}{(1 + E_n)^t}, \quad (10)$$

где $\Delta \text{ЧДД}$ – интегральный экономический эффект от комбинированной выработки за весь период службы установки;

ΔD_t – дополнительное поступление денежных средств от комбинированной выработки в соответствующем году t ;

ΔK_t – изменение капитальных вложений по сравнению с отдельной выработкой;

ΔI_t – экономия ежегодных издержек за счет увеличения эффективности по сравнению с отдельной выработкой.

При расчет показателя (10) в качестве когенерационной установки может рассматриваться любая (ПТУ, ГТУ с подогревателем сетевой воды (ПСВ), ТПГУ и др.), а для варианта отдельного

производства принимается, что электроэнергия вырабатывается на КЭС, а теплота в водогрейной котельной.

Если выполняется условие равенства производства электрической и тепловой энергий при комбинированной и раздельной схемах, совокупное дополнительное поступление денежных средств от комбинированной выработки равно нулю, а выражение (10) приобретает вид:

$$\Delta ЧДД = \sum_{t=0}^T \Delta K_t / (1 + E_n)^t + \sum_{t=0}^T \Delta И_t / (1 + E_n)^t. \quad (11)$$

Таким образом максимальный интегральный эффект от когенерационной установки будет соответствовать условию максимального снижения совокупных приведенных затрат:

$$\sum_{t=0}^T \Delta K_t / (1 + E_n)^t + \sum_{t=0}^T \Delta И_t / (1 + E_n)^t \rightarrow \max. \quad (12)$$

В ряде случаев, модифицирование структуры тепловой схемы ТЭС не приводит к заметному изменению капитальных затрат в строительство (например, варьирование начальных параметров пара, не приводящее к корректированию сортамента применяемых материалов паропроводов), изменение схемы включения деаэратора, сетевых подогревателей и т.п.). В этом случае основное влияние на изменение приведенных затрат при оптимизации тепловой схемы и параметров ТПГУ будет оказывать переменная (топливная) составляющая $\Delta И_t$ и соответствующая ей экономия топлива от комбинированной выработки по сравнению с раздельной $\Delta Q_{мон}$. Минимальным приведенным затратам когенерационной установки будет соответствовать максимальное значение относительной экономии топлива по сравнению с раздельной выработкой.

Величина относительной экономии топлива по сравнению с раздельной выработкой зависит от параметров и тепловой схемы ТПГУ (коэффициент выработки электроэнергии на тепловом потреблении), связана с внешними, для энергоустановки, условиями (КПД замещающей КЭС и водогрейной котельной), а также прямо пропорциональна интегральному экономическому эффекту. Таким образом, именно этот показатель может служить при решении оптимизационных задач связанных с определением оптимальных параметров и схемы утилизационного контура ТПГУ, а также с оценкой эффективности мероприятий, направленных на совершенствование тепловой схемы ТПГУ.

С помощью показателя относительной экономии топлива по сравнению с раздельной выработкой была проведена оптимизация начального давления пара для ТПГУ с паровым контуром одного уровня давления на базе ГТУ GT13E2 (рис. 1 и табл. 1).

Расчетная температура номинального режима принята равной средней температуре отопительного периода в г. Санкт-Петербурге (-1,6 °С).

Величины минимального температурного напора ($\Delta t_{мин}$) и недогрева воды до температуры насыщения в экономайзере приняты равными 10 °С. Начальная температура пара принята равной 480 °С, а начальное давление меняется в диапазоне ограниченном уровнем допустимой влажности в конце процесса расширения (4 – 10 МПа). Относительный внутренний КПД паровой турбины без учета потерь от влажности принят равным 0,9. Давление в камере нижнего и верхнего теплофикационных отборов принято на уровне 0,026 МПа и 0,089 МПа соответственно (температурный график 150/70 °С).

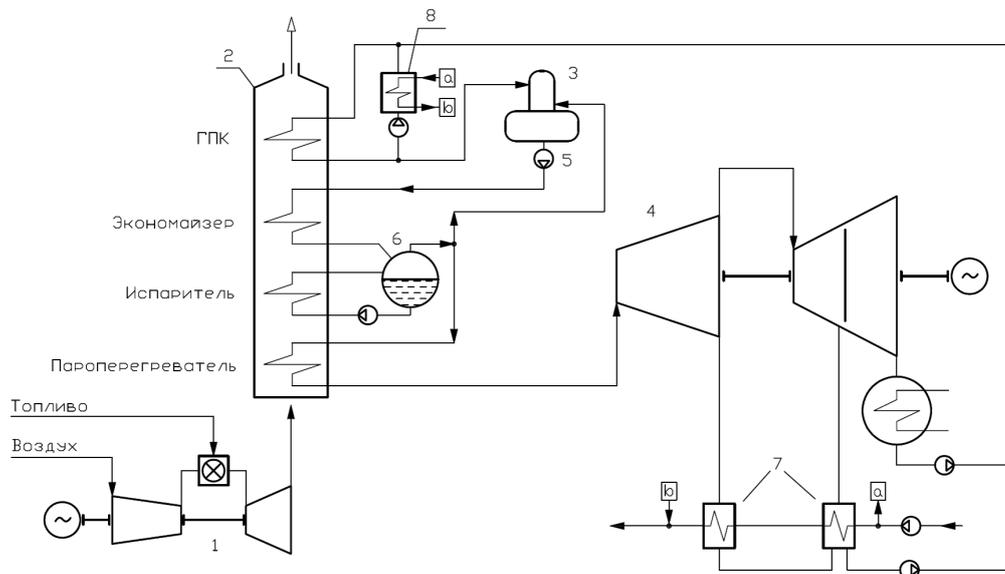


Рис.1. Принципиальная схема одноконтурной теплофикационной парогазовой установки:

1 – газотурбинная установка; 2 – котел-утилизатор; 3 – деаэратор; 4 – паровая турбина; 5 – питательный насос; 6 – барабан; 7 – подогреватели сетевой воды; 8 – водо-водяной теплообменник (a, b – отвод и подвод сетевой воды на водо-водяной теплообменник соответственно)

Fig. 1. Schematic diagram of a single-circuit combined-cycle heating plant: 1 – gas turbine unit; 2 – heat recovery boiler; 3 – deaerator; 4 – steam turbine; 5 – feed pump; 6 – drum; 7 – network water heaters; 8 – water-water heat exchanger (a, b – discharge and supply of network water to the water-water heat exchanger, respectively)

Таблица 1

Показатели установки GT13E2 для температуры наружного воздуха -1,6 °С

Table 1

GT13E2 unit parameters for outdoor air temperature -1.6 °C

Показатель	Значение
Электрическая мощность ГТУ, МВт	196,1
КПД, %	37,3
Температура уходящих из ГТУ газов, °С	504
Расход уходящих газов, кг/с	594

Результаты

Результаты оценки влияния начального давления на показатели одноконтурной теплофикационной ПГУ-260 на базе GT13E2 представлены в табл. 2.

Результаты исследования, проиллюстрированные на рис. 2 и 3, показывают, что коэффициент использования теплоты топлива ТПГУ, практически не зависит от начальных параметров пара. В то же время КПД цикла, удельная выработка на тепловом потреблении и относительная экономия топлива по сравнению с раздельной выработкой имеют ярко выраженный максимум, достигаемый при одном и том же начальном давлении пара на уровне 5,5-6 МПа.

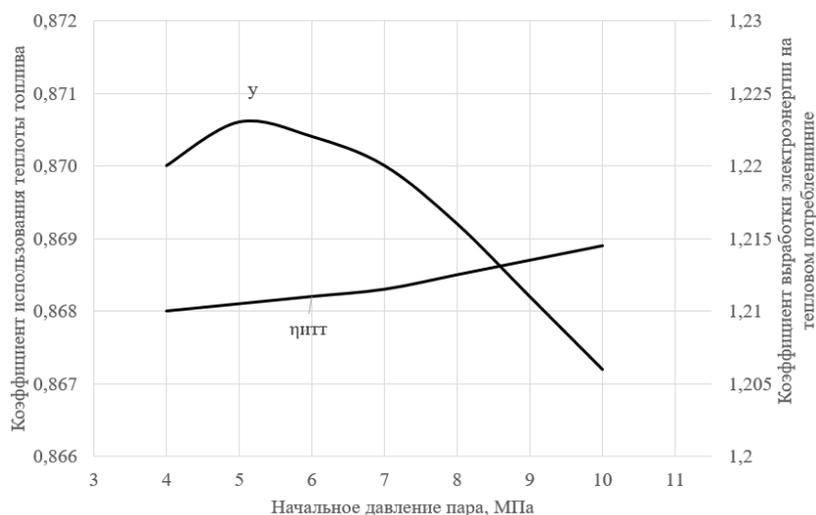


Рис. 2. Зависимость коэффициента использования теплоты топлива и удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении от начального давления пара
 Fig. 2. Dependence of the fuel heat utilization coefficient and specific power generation with heat consumption on the initial steam pressure

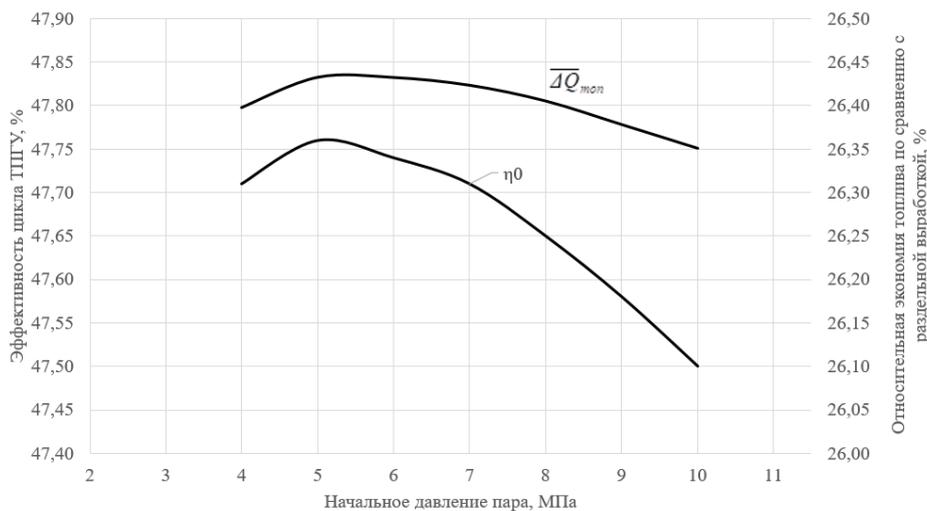


Рис. 3. Зависимость КПД цикла и относительной экономии топлива по сравнению с раздельной выработкой от начального давления пара ($\eta_{КЭС} = 50,6\%$, $\eta_{БК} = 94\%$)
 Fig. 3. Dependence of the cycle efficiency and relative fuel economy in comparison with separate generation on the initial steam pressure ($\eta_{СПП} = 50,6\%$, $\eta_{НWB} = 94\%$)

Таким образом, оптимальные параметры пара в ТПУ выше, чем в конденсационной установке. Так, максимум КПД одноконтурной конденсационной ПГУ на базе той же ГТУ составляет порядка 50-50,5% и достигается при начальном давлении пара 3-3,5 МПа [8]. Рассчитанная по сравнению с такой конденсационной ПГУ относительная экономия топлива в ТПУ составляет 26-26,5% (рис. 3).

Таблица 2

Сводные результаты расчета одноконтурной теплофикационной ПГУ

Table 2

Summary results of calculation of single-circuit heating CCGT

Параметр	Единица измерения	Значение						
Параметры пара перед турбиной:								
Давление	МПа	4	5	6	7	8	9	10
Температура	°С	480						
Относительный расход	кг.пара/ кг.газа	0,1092	0,1065	0,1042	0,1022	0,1004	0,0989	0,0975
Располагаемый теплоперепад	кДж/кг	934,2	957,2	973,5	986,6	995,4	1001,7	1006,2
Электрическая мощность:								
паровой турбины	МВт	54,40	54,64	54,58	54,42	54,09	53,71	53,28
газовой турбины	МВт	196,1	196,1	196,1	196,1	196,1	196,1	196,1
ПГУ	МВт	250,73	250,73	250,67	250,52	250,19	249,80	249,38
Тепловая нагрузка:								
сетевых подогревателей	кДж/кг газа	237,98	228,24	220,23	213,33	207,44	202,26	197,68
ВВТО	кДж/кг газа	107,63	117,02	125,22	132,52	139,10	145,09	150,57
ПГУ	кДж/кг газа	345,61	345,26	345,45	345,84	346,54	347,35	348,24
Показатели эффективности:								
Коэффициент использования теплоты топлива	%	86,80	86,81	86,82	86,83	86,85	86,87	86,89
КПД цикла	%	47,71	47,76	47,74	47,71	47,65	47,58	47,50
Коэффициент выработки электроэнергии на тепловом потреблении	—	1,220	1,223	1,222	1,220	1,216	1,211	1,206
Относительная экономия топлива по сравнению с раздельной выработкой	%	26,398	26,432	26,432	26,423	26,405	26,378	26,351

В условиях другой энергосистемы данное техническое решение будет иметь иной уровень эффективности. С уменьшением КПД замещающей КЭС, относительная экономия топлива в ТПГУ растет. Так, по сравнению с типовым паротурбинным блоком К-300-240 (эффективность которого составляет порядка 40%) при том же КПД водогрейной котельной, относительная экономия топлива в рассматриваемой ТПГУ составит 37,9%.

Обсуждение

Решению задачи выбора и обоснования оптимальных параметров и тепловых схем когенерационных установок были посвящены исследования многих отечественных авторов Мелентьева Л.А., Хрилева Л.С., Андрищенко А.И., Соколова Е.Я. и др., которыми была разработана серьезная база для проведения оптимизационных расчетов установок комбинированной выработки электрической и тепловой энергии для традиционных паросиловых ТЭС различного мощностного ряда [5–7]. В качестве основного критерия предлагалось применять величину относительной экономии топлива по сравнению с раздельной выработкой. Данный критерий широко использовался в усло-

виях плановой экономики. С изменением системы экономических отношений в электроэнергетике нашей страны данный критерий не применялся.

Оптимизацией параметров и тепловых схем ПГУ были посвящены работы Березинца П.А., Цанева С.В., Бурова В.Д., Ольховского Г.Г. и др. Традиционно, оптимизация параметров и тепловых схем ПГУ осуществляется преимущественно на базе решения частных задач, связанных с исследованием влияния отдельных термодинамических параметров на показатели тепловой эффективности конкретного схемного решения [8–15]. Как правило, в качестве критерия в данных задачах используется КПД выработки электроэнергии в конденсационном режиме. При этом не учитывается влияние комбинированной выработки на оптимальные параметры и структуру ТПГУ.

Поскольку относительная экономия топлива при комбинированной выработке по сравнению с отдельным производством электрической и тепловой энергией зависит от параметров и структуры ТПГУ, связана с системными условиями и имеет прямую связь с интегральным экономическим эффектом, данный показатель может быть использована в качестве основного критерия при решении задач, связанных с оптимизацией ТПГУ в условиях рыночной экономики.

Для конкретной энергоустановки величина относительной экономии топлива по сравнению с отдельной выработкой определяется системными условиями (прежде всего КПД замещающей КЭС), а также характеристиками и режимом работы установки (отражаемыми коэффициентом выработки электроэнергии на тепловом потреблении и, в меньшей степени, коэффициентом использования теплоты топлива).

При заданном типе ГТУ КПД цикла, удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении и относительная экономия топлива по сравнению с отдельной выработкой ТПГУ определяется параметрами утилизационного контура. Соответственно, в первом приближении, задача оптимизации ТПГУ может быть сведена к определению оптимального начального давления пара.

Коэффициент использования теплоты топлива ТПГУ, практически не зависит от начальных параметров пара, при этом удельная выработка на тепловом потреблении и относительная экономия топлива по сравнению с отдельной выработкой имеют ярко выраженный максимум, достигаемый при одном и том же начальном давлении пара, превышающем оптимальное давление для ПГУ-КЭС. Таким образом, можно сделать вывод, что ТПГУ должны проектироваться на более высокие параметры, чем КЭС на базе аналогичных ГТУ.

Существенное влияние на относительную экономию топлива по сравнению с отдельной выработкой в ТПГУ оказывают внешние условия, отражаемые типом (эффективностью) замещаемой КЭС. Это позволяет проводить предварительную сравнительную оценку эффективности применения одних и тех же технических решений в условиях разных энергосистем.

Выводы

1. Критерий относительной экономии топлива по сравнению с отдельным производством электрической и тепловой энергией может быть использован для оптимизации начальных параметров ТПГУ в современных экономических условиях.

2. Для одноконтурной ТПГ на базе GT13E2 оптимальное начальное давление, рассчитанное с использованием относительной экономии топлива, составляет 5,5-6 МПа, в то время как для ПГУ-КЭС на базе аналогичной ГТУ оптимальное начальное давление пара, определенное по максимуму электрического КПД, составляет 3-3,5 МПа.

3. Относительная экономия топлива по сравнению с ПГУ-КЭС на базе ГТУ GT13E2 составляет 26-26,5%, а по сравнению с ПТУ-КЭС на базе серийного блока К-300-240 относительная экономия топлива увеличится до 37,9%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Макаров А.А., Веселов Ф.В., Макарова А.С., Новикова Т.В., Панкрушина Т.Г. Стратегические перспективы электроэнергетики России // Теплоэнергетика. 2017. № 11. С. 40–52.
- [2] Макаров А.А., Митрова Т.А., Веселов Ф.В., Галкина А.А., Кулагин В.А. Перспективы электроэнергетики в условиях трансформации мировых энергетических рынков // Теплоэнергетика. 2017. № 10. С. 5–16.
- [3] Калимуллин Л.В. Приоритетные направления развития энергетических компаний // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. 2018. № 2 (71). С. 87–95.
- [4] Чеботарева Г. С. Методические основы оценки конкурентоспособности энергетических компаний // Экономика региона. 2018. № 14 (1). С. 190–201.
- [5] Левенталь Г.Б., Мелентьев Л.А. Техничко-экономические основы развития теплофикации в энергосистемах. М.: Госэнергоиздат, 1961. 319 с.
- [6] Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: 7-е изд. М.: Изд. МЭИ, 2009. 472 с.
- [7] Хрилев Л.С., Смирнов И.А. Оптимизация систем теплофикации и централизованного теплоснабжения. Под редакцией Е.Я. Соколова, М.: Изд. Энергия, 1978. 264 с.
- [8] Цанев С.В., Бузов В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: 3-е изд. М.: Изд. МЭИ, 2009. 584 с.
- [9] Бузов В.Д., Сойко Г.В., Дудолин А.А., Макаревич Е.В., Захаренков Е.А., Ковалев Д.А. Методика оптимизации структуры и параметров мощных парогазовых ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка. 2013. №5 (85). С. 37–42.
- [10] Игнатъев Д.С., Цанев С.В., Дудолин А.А., Бузов В.Д., Макаревич Е.В. Исследование влияния качества сланцевого газа на работу ПГУ // Энергосбережение и водоподготовка. 2015. №5 (97). С. 17–20.
- [11] Ленёв С.Н., Радин Ю.А., Голов П.В., Коновалов В.И., Истомов А.И. Модернизация блока ПГУ-420 ТЭЦ-20 ПАО «Мосэнерго» с повышением эффективности работы блока // Электрические станции. 2020. №5 (1066). С. 20–24.
- [12] Радин Ю.А. Опыт освоения и эксплуатации котлов-утилизаторов ПГУ // Электрические станции. 2018. №9 (1046). С. 15–18.
- [13] Таганов А.В., Залешин М.В., Радин Ю.А., Гришин И.А. Некоторые технические характеристики ПГУ-800 Пермской ГРЭС // Электрические станции. 2019. №2 (1051). С. 7–11.
- [14] Teplov B.D., Bugov V.D. The extension of the operational range of combined-cycle power plant with a triple-pressure heat recovery steam generator. Journal of Physics: Conference Series. (2017) 012208.
- [15] Теплов Б.Д., Радин Ю.А. Повышение маневренности и экономической эффективности эксплуатации ПГУ в условиях оптового рынка электроэнергии и мощности // Теплоэнергетика. 2019. №5. С. 39–47.
- [16] Попырин Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок, М.: Изд. Энергия, 1978. 416 с.
- [17] Бальнин И.В. Оценка результативности инвестиционных проектов: правила, показатели и порядок их расчета // Экономический анализ: теория и практика. 2016. №6 (453). С. 26–41.
- [18] Николенко Т.Ю., Тарасова Е.В. Система сбалансированных показателей и инструментарий оценки эффективности инновационных проектов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2016. № 6. С. 228–235.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

E-mail: AA_Kalyutik@spbstu.ru

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

E-mail: treschew@yandex.ru

ТРЕЩЁВА Милана Алексеевна – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: milana.treshcheva@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 02.11.2020

REFERENCES

- [1] **A.A. Makarov, F.V. Veselov, A.S. Makarova, T.V. Novikova, T.G. Pankrushina**, Strategic prospects of the electric power industry of Russia, *Thermal Engineering*. 64 (11) (2017) 817–828.
- [2] **A.A. Makarov, T.A. Mitrova, F.V. Veselov, A.A. Galkina, V.A. Kulagin**, Perspectives of the electric power industry amid the transforming global power generation markets, *Thermal Engineering*. 64 (10) (2017) 703–714.
- [3] **L.V. Kalimullin**, Priority development of energy-generating companies, *Bulletin of the Saratov state social and economic University*. 2 (71) (2018) 87–95.
- [4] **G.S. Chebotareva**, Methods for the Evaluation of the Competitiveness of Energy Companies, *Economy of Region*. 14 (1) (2018) 190–201.
- [5] **G.B. Leventhal, L.A. Melentyev**, Technical and economic bases of development of district heating in power systems, Gosenergoizdat, Moscow, 1961.
- [6] **E.Y. Sokolov**, District heating and heat networks, MEI Publishing house, Moscow, 2009.
- [7] **L.S. Khrilev, I.A. Smirnov**, Optimization of heating and district heating systems, Energy, Moscow, 1978.
- [8] **S.V. Tsanev, V.D. Burov, A.N. Remezov**, Gas turbine and combined-cycle units of thermal power plants, MEI Publishing house, Moscow, 2009.
- [9] **V.D. Burov, G.V. Soyko, A.A. Dudolin, E.V. Makarevich, E.A. Zakharenkov, D.A. Kovalev**, Methodology of optimization of structure and parameters of powerful steam-gas thermal power plants, Energy saving and water treatment. 5 (85) (2013) 37–42.
- [10] **D.S. Ignatev, S.V. Tsanev, A.A. Dudolin, V.D. Burov, E.V. Makarevich**, Study of the influence of the quality of shale gas at work of combined-cycle plant (CCGT TPP), Energy saving and water treatment. 5 (85) (2013) 37–42.
- [11] **S.N. Lenev, Y.A. Radin, V.I. Konovalov, A.I. Istomov, P.V. Golov**, Modernization and increase of an overall performance efficiency of CCGT-420 at CHP-20 of the PJSC MOSENERGO, Power plant. 5 (1066) (2020) 20–24.
- [12] **Y.A. Radin**, Experience in the Development and Operation of Heat Recovery Steam Generators, Power plant. 9 (1046) (2018) 15–18.
- [13] **A.E. Taganov, M.V. Zaleshin, I.A. Grishin, Y.A. Radin**, Some Specifications of the PGU-800 Combined-Cycle Power Unit of the Perm TPP, Power plant. 2 (1051) (2019) 7–11.
- [14] **B.D. Teplov, V.D. Burov**, The extension of the operational range of combined-cycle power plant with a triple-pressure heat recovery steam generator, *Journal of Physics: Conference Series*. (2017) 012208.
- [15] **B.D. Teplov, Y.A. Radin**, Improving Flexibility and Economic Efficiency of CCGT Units' Operation in the Conditions of the Wholesale Electricity Market, *Thermal Engineering*. 5 (2019) 39–47.
- [16] **L.S. Popyrin**, Mathematical modeling and optimization of heat power plants, Energy, Moscow, 1978.
- [17] **I.V. Balyinin**, Assessing the effectiveness of investment projects: Rules, indicators and their calculation procedure, *Economic analysis: theory and practice*. 6 (453) (2016) 26–41.

[18] **T.Y. Nikolenko, E.V. Tarasova**, The system of balanced indicators evaluation and the tools for evaluating the effectiveness of innovative projects, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*. 6 (2016) 228–235.

THE AUTHORS

KALYUTIK Aleksandr A. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: AA_Kalyutik@spbstu.ru

TRESHCHEV Dmitriy A. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: treschew@yandex.ru

TRESHCHEVA Milana A. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: milana.treshcheva@gmail.com

Received: 02.11.2020

DOI: 10.18721/JEST.26405

УДК 621.512

А.А. Котлов¹, А.В. Бураков², Л.Г. Кузнецов²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия;

² АО "Компрессор",
Санкт-Петербург, Россия

СНИЖЕНИЕ ВИБРАЦИИ ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА ЗА СЧЕТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗНАКОПОСТОЯНСТВА ДИАГРАММЫ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

Одной из важных задач при проектировании поршневых компрессоров является обеспечение низкой вибрации компрессора на всех режимах эксплуатации. Переменное слагаемое реактивного момента роторных механизмов, в частности поршневых компрессоров, является одним из основных источников их низкочастотной вибрации. В работе приведены результаты исследования влияния различных конструктивных параметров на диаграмму крутящего момента. Приводится описание конструктивного решения, направленного на получение наиболее равномерной знакопостоянной диаграммы крутящего момента многоступенчатого поршневого компрессора. Приводится описание компьютерной программы, которая была специально разработана для проведения данного исследования. Разработанная программа позволяет проводить расчет для различного конструктивного исполнения компрессора. Для этого разработан конструктор рядов, который позволяет учесть взаимную компоновку цилиндров и расположение ступеней по рядам.

Ключевые слова: поршневой компрессор, динамика, крутящий момент, вибрация, математическое моделирование.

Ссылка при цитировании:

Котлов А.А., Бураков А.В., Кузнецов Л.Г. Снижение вибрации поршневого компрессора за счет обеспечения знакопостоянства диаграммы крутящего момента // *Материаловедение. Энергетика.* 2020. Т. 26, № 4. С. 64–74. DOI: 10.18721/JEST.26405

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

A.A. Kotlov¹, A.V. Burakov², L.G. Kuznetsov²

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

² JSC "Compressor", St. Petersburg, Russia

REDUCING VIBRATION OF A RECIPROCATING COMPRESSOR BY ENSURING THE CONSTANT SIGN OF THE TORQUE DIAGRAM

One of the important tasks in the design of reciprocating compressors is ensuring low vibration of the compressor in all operating modes. A variable summand of the rotary mechanism reaction torque, in particular that of the reciprocating compressors, is one of the main sources of their low-frequency vibration. The paper presents research results concerning the influence of different structural parameters on the torque diagram. The authors describe the structural solution aimed at obtaining the most uniform constant-sign diagram of the torque of a multistage reciprocating compressor. The description of a computer program that was specifically developed for this study is given. The developed program makes it possible to carry out calculations for various

compressor designs. For this, the authors developed a row designer, which allows taking into account the mutual arrangement of cylinders and the arrangement of steps in rows.

Keywords: reciprocating compressor, dynamics, torque, vibration, mathematical modeling.

Citation:

A.A. Kotlov, A.V. Burakov, L.G. Kuznetsov, Reducing vibration of a reciprocating compressor by ensuring the constant sign of the torque diagram, *Materials Science. Power Engineering*, 26 (04) (2020) 64–74, DOI: 10.18721/JEST.26405

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

Введение. Обще известно [1], что переменное слагаемое реактивного момента роторных механизмов, в частности поршневых компрессоров является одним из основных источников их низкочастотной вибрации. Средством полного подавления этого источника вибрации, независимо от режима работы механизма, является создание компенсирующего момента в опорах передачи, обеспечивающей встречное вращение роторов при определенном соотношении их моментов инерции.

В подавляющем большинстве конструкций встречное вращение обеспечивается зубчатыми передачами. При этом возникает необходимость исключить динамическую перекадку зубьев, которая снижает ресурс передачи и вызывает ее повышенный шум. Применительно к поршневым компрессорам, это требование обеспечивается знакопостоянством передаваемого зацеплением момента. Т.е. противодействующий момент на валу компрессора, а, следовательно, равный ему реактивный момент, приложенный к корпусу, должен в течении всего оборота вала не изменять своего знака и полностью передаваться через передачу с внешним зацеплением [2].

Объект исследования — четырехступенчатый поршневой компрессор, предназначенный для нужд газоперекачивающих и газонаполнительных компрессорных станций. На рис. 1 приведен общий вид и механизм движения рассматриваемого компрессора. Приведенный компрессор разработан на АО «Компрессор» и выполнен с вертикальным расположением коленчатого вала [3]. Компрессор предназначен для сжатия метана или природного газа до конечного давления 24,6 МПа, с кратковременной работой до давления 39,2 МПа.

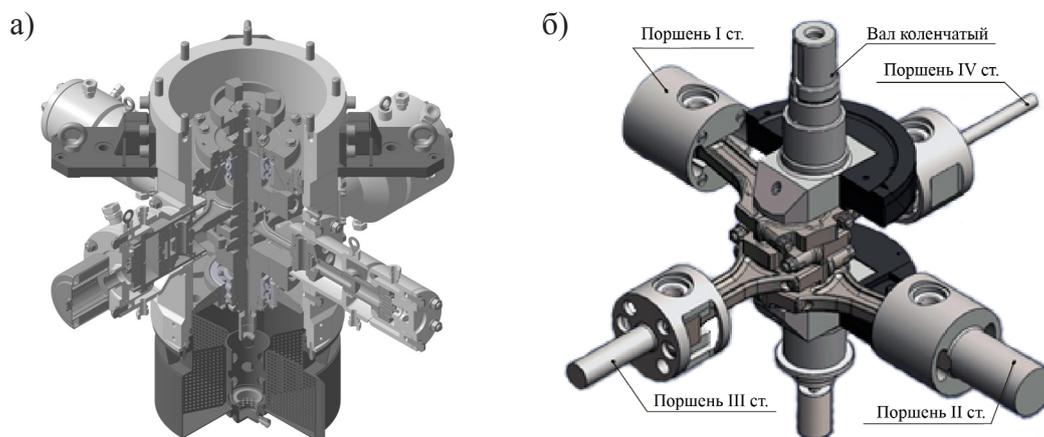


Рис. 1. Схема компрессора с вертикальным валом: а) общий вид; б) механизм движения

Fig. 1. Scheme of compressor with vertical shaft: a) general view; b) motion work

Метод расчета

В кривошипном механизме поршневые силы P_{Σ} раскладываются на две составляющие: на нормальную силу к оси цилиндра N и на силу, действующую по шатуну $P_{ш}$ (см. рис. 2) [1, 5–7].

Нормальная сила прижимает поршень к стенке цилиндра, если компрессор бескрейцкопфный, или крейцкопф к параллелям, если компрессор с крейцкопфом. Сила, которая действует вдоль шатуна, нагружает палец кривошипа или мотылевую шейку вала и разлагается на радиальную составляющую направленную к оси вала P_r и касательную составляющую P_t (см. рис. 2).

Сила P_t , приложенная к пальцу кривошипа на радиусе r , образует противодействующий вращению вала момент. Значение этого момента определяется из выражения [1, 5–8].

$$M_{кр} = P_t r.$$

Для многорядных компрессоров крутящий момент определяется, как сумма моментов каждого ряда

$$M_{кр} = \sum P_{ti} r_i.$$

Кроме этого, на величину крутящего момента оказывает влияние сила трения от вращающихся частей. Сила трения от вращающихся частей считается постоянной, тогда момент, который возникает от этой силы, будет постоянным и равным

$$M_{тр} = (0,3 \div 0,4) \frac{N_{инд}}{2\pi n_0} \left(\frac{1}{\eta_{мех}} - 1 \right),$$

где $N_{инд}$ – индикаторная мощность; n_0 – частота вращения коленчатого вала; $\eta_{мех}$ – механический КПД ($\eta_{мех} = 0,8 \dots 0,95$).

Тангенциальная сила P_t определяется по формуле

$$P_t = P_{\Sigma} \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta}.$$

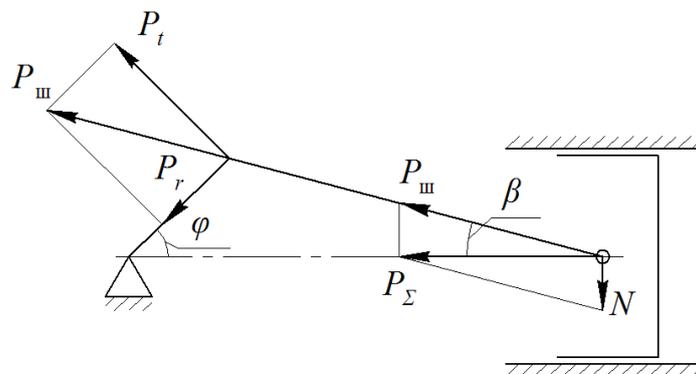


Рис. 2. Схема действия сил
Fig. 2. Diagram of forces action

Суммарная сила определяется по формуле

$$P_{\Sigma} = P_r + I_s + F_{\text{тр}},$$

где P_r – сила с которой газ действует на поршень; I_s – силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс; $F_{\text{тр}}$ – силы трения при возвратно-поступательном движении.

Сила P_r рассчитывается на основе индикаторной диаграммы ступени, которая получается путем математического моделирования рабочего процесса ступени [7]. Математическая модель базируется на известных моделях рабочего процесса поршневых компрессоров [9–15].

Величина I_s определяется по формуле

$$I_s = m_s r \omega^2 (\cos\varphi + \lambda \cos 2\varphi),$$

где m_s – масса возвратно-поступательно движущихся частей, ω – угловая скорость, λ – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна.

Расчетное исследование и исходные данные

При различном расположении кривошипов характер крутящего момента будет меняться. Построив кривые суммарного момента для различных вариантов расположения кривошипов можно достигнуть их наиболее выгодного расположения. Для анализа влияния различных факторов на диаграмму крутящего момента разработана компьютерная программа (см. рис. 3). Результаты расчетов представляются в численном и графическом виде и содержат: силовые диаграммы для каждого ряда компрессора; диаграммы тангенциальных сил; диаграмму суммарного противодействующего момента и пр.

Программа позволяет провести расчет для различного конструктивного исполнения поршневого компрессора. Для этого разработан конструктор рядов, который позволяет учесть взаимную компоновку цилиндров и расположение ступеней по рядам. На рис. 4 приведено окно программы в режиме конструирования ряда компрессора.

На рис. 5 приведена конструктивная схема механизма движения и исходное расположение ступеней по рядам. Компрессор имеет четыре ряда, который расположены под углом 90 градусов друг к другу. Шатуны компрессора соединены с общим коленом. Рассматриваемый компрессор имеет четыре ступени одностороннего действия, каждая из которых расположена в отдельном ряду.

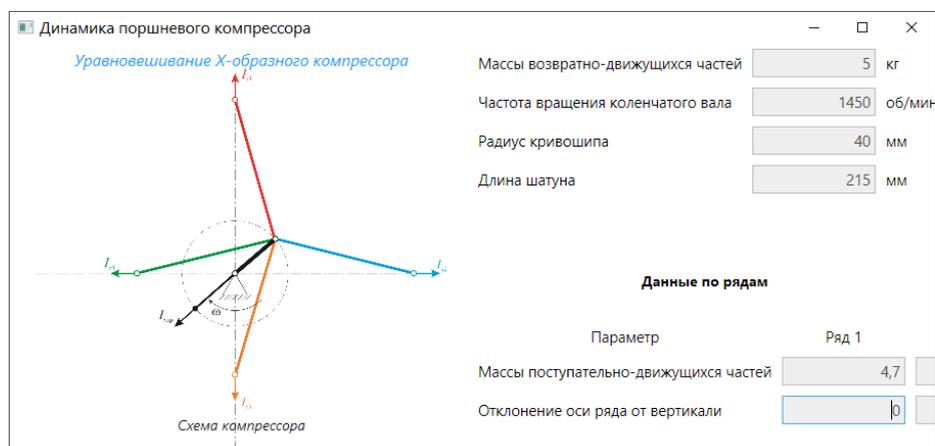


Рис. 3. Окно программы

Fig. 3. Program window

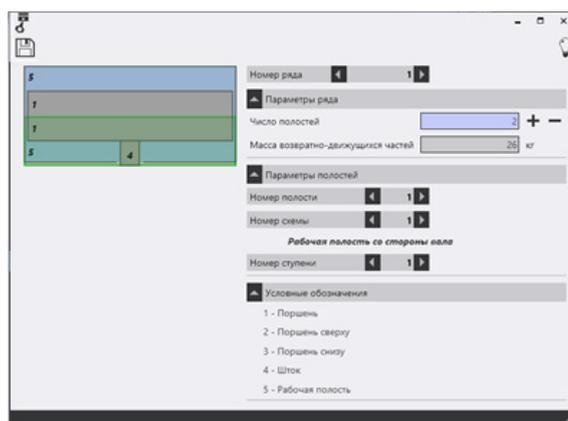


Рис. 4. Конструктор рядов

Fig. 4. Row constructor

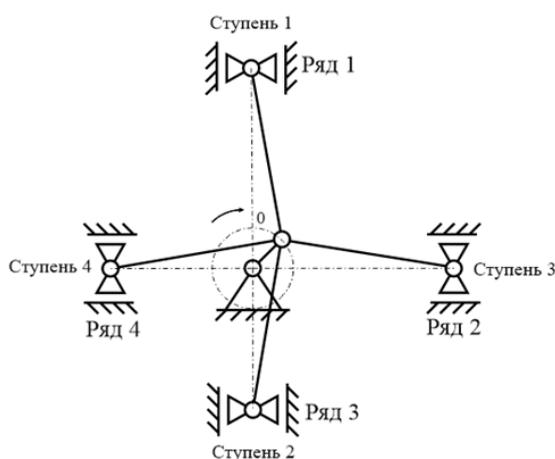


Рис. 5. Схема механизма движения

Fig. 5. Diagram of motion mechanism

В рамках работы необходимо было получить диаграмму крутящего момента компрессора, которая в течении одного оборота коленчатого вала не изменяет своего знака. Расчетное исследование проводилось в два этапа. На первом этапе влияние на диаграмму крутящего момента осуществлялось путем изменения параметров ступеней и их расположение без изменения конструкции; на втором этапе подбиралась наилучшая диаграмма крутящего момента за счет конструктивного изменения компрессора, с сохранением технических характеристик.

Результаты расчетов и их обсуждение

Рассмотрим расчетную диаграмму крутящего момента (см. рис. 6) для исходного варианта исполнения компрессора. Из приведенной диаграммы видно, что при заданных параметрах условие знакопостоянства крутящего момента не обеспечивается. Смена знака диаграммы крутящего момента связан с тем, что газовая нагрузка по рядам не одинаковая. Причина в том, что все ступени одинарного действия, поэтому перепад нагрузки по ступеням будет разным из-за усилия со стороны картера. В данном случае переход в отрицательную область вызван первой ступенью. На диаграмме это можно видеть по кривым крутящего момента, которые приведены для каждого ряда в отдельности (см. рис. 6).

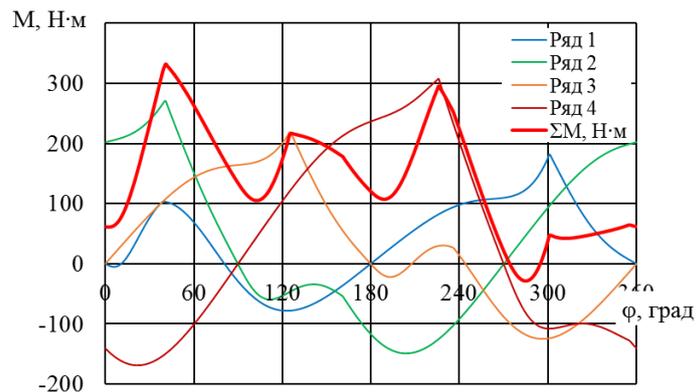


Рис. 6. Диаграмма крутящего момента исходного варианта исполнения компрессора

Fig. 6. Torque diagram of the compressor initial design

Неравномерность изменения крутящего момента (см. рис. 6) связана с особенностями протекания рабочего процесса в компрессоре. Газовые силы, действующие на поршень, а также силы инерции от возвратно-поступательно движущихся масс не постоянны и изменяются в зависимости от угла коленчатого вала. На рис. 7 приведена диаграмма сил, действующих в первом ряду компрессора.

Значения момента, которые меньше среднего, будут указывать на то, что в данный момент двигатель выдает больше энергии, чем это необходимо. И, наоборот, значения, которые больше среднего указывают на то, что в данный момент времени происходит недостаток энергии от двигателя. Средний крутящий момент — это такой условно постоянный момент, который за один оборот коленчатого вала совершает ту же работу, что и действительный компрессор [6]. Для сглаживания неравномерности угловой скорости применяется маховик. Его назначение в том, чтобы, аккумулируя или отдавая энергию, удерживать колебание угловой скорости вала в пределах заданной неравномерности. Более равномерная диаграмма крутящего момента позволяет уменьшить вес маховика.

Таким образом, задача заключается в получении наиболее равномерной диаграммы крутящего момента, которая имеет постоянный знак в течении одного оборота коленчатого вала. Влияние на диаграмму крутящего момента возможно несколькими способами: изменение последователь-

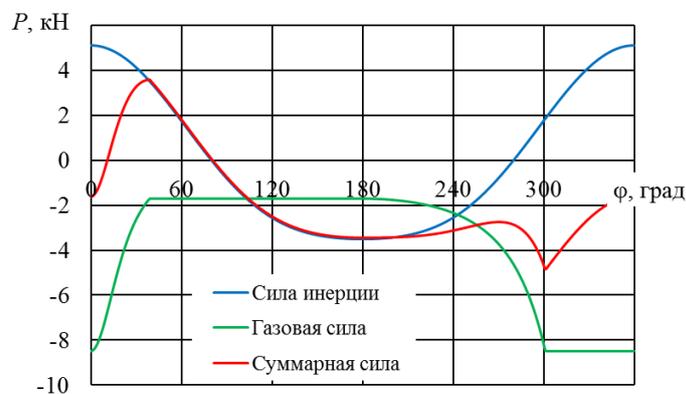


Рис. 7. Диаграмма сил первого ряда

Fig. 7. Diagram of first row forces

ности расположения ступеней по рядам компрессора (вариант 1); изменение мертвого пространства по ступеням компрессора (вариант 2); изменение диаметров поршней компрессора (вариант 3); изменение конструкции компрессора (вариант 4).

Рассмотрим влияние различных вариантов на диаграмму крутящего момента. На рис. 8 приведено сравнение кривых крутящего момента для варианта 1 и варианта 2 с исходным вариантом исполнения.

Изменение последовательности ступеней (вариант 1) с 1-3-2-4 (см. рис. 5) на 1-4-2-3 позволило несколько приблизиться к положительной зоне, однако необходимого запаса по устойчивой работе компрессора нет. Кривая крутящего момента стала более неравномерной и имеет один выраженный пик (влияние четвертой ступени) в начале диаграммы.

Аналогичная картина наблюдается и при изменении мертвого пространства по ступеням (вариант 2). Для выравнивания кривой крутящего момента необходимо увеличивать мертвое пространство на первой ступени, что ведет к уменьшению производительности компрессора. Либо необходимо уменьшить мертвое пространство на четвертой ступени, что невозможно из конструктивных особенностей ступени (малые размеры). К тому же это ведет к росту отношений давлений в четвертой ступени и, как следствие, к росту конечной температуры. На рис. 8 приведена диаграмма для наилучшего варианта по распределению мертвых пространств. Из рисунка видно, что, хотя диаграмма крутящего момента находится в положительной области, запас по устойчивой работе компрессора очень мал. Влияние изменения диаметров поршней (вариант 3) схоже с влиянием изменения мертвого пространства (вариант 2), т.к. и в том и в другом случае влияние на газовую силу осуществляется путем перераспределения давлений между ступеней. Необходимо иметь в виду, что диаметр первой ступени уменьшать нельзя, т.к. это ведет к снижению производительности компрессора. Значительное занижение диаметров ступеней приводит к росту отношения давлений на предыдущих ступенях, что ведет к большему нагреву газа.

Основной проблемой при подборе рациональной знакопостоянной диаграммы крутящего момента является то, что газовые силы по рядам распределены не равномерно. Чтобы уравнять газовые силы по рядам было предложено изменить конструкцию компрессора (вариант 4), которая предполагает применение дифференциального поршня, в котором будут расположены первая и вторая ступени (см. рис. 9б). Кроме того, решено эти ступени разделить на два ряда (см. рис. 9а).

Диаграмма крутящего момента для нового конструктивного исполнения компрессора приведена на рис. 10.

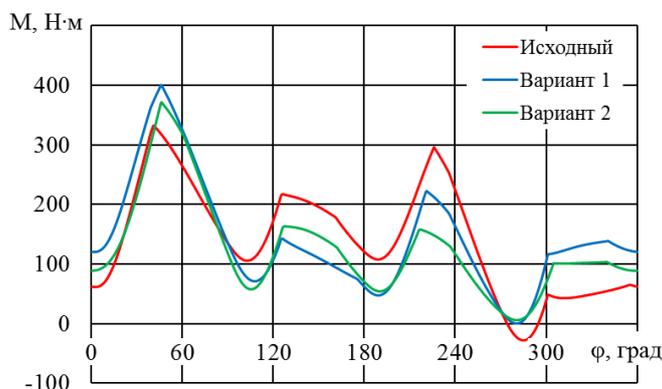


Рис. 8. Кривые крутящего момента для различных вариантов
 Fig. 8. Torque curves for different variants

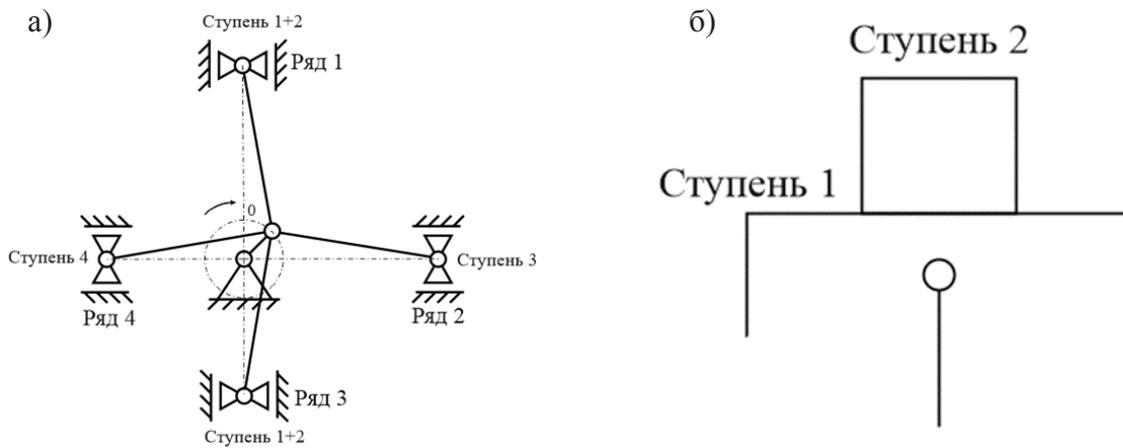


Рис. 9. Расположение ступеней по рядам компрессора (а) и дифференциальный поршень первой и второй ступеней

Fig. 9. Arrangement of stages by the compressor rows (a) and differential piston of the first and second stages

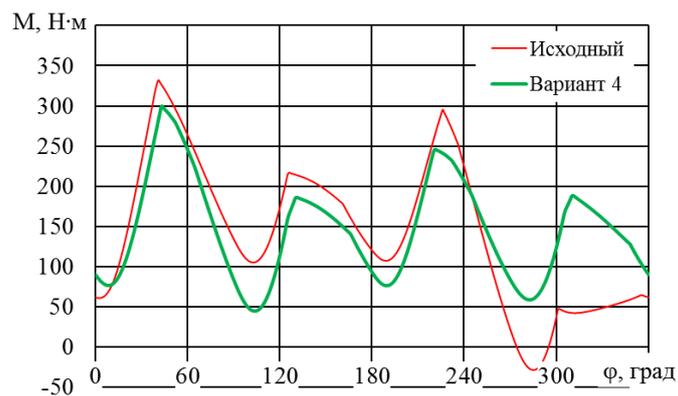


Рис. 10. Диаграмма крутящего момента нового конструктивного исполнения компрессора

Fig. 10. Torque diagram of the compressor new design

Из рисунка видно, что диаграмма крутящего момента стала более равномерной и полностью лежит в положительной области с большим запасом по устойчивой работе компрессора. Разделение первой и второй ступеней на два ряда позволило уменьшить их диаметры. Силовая нагрузка на первый и третий ряды компрессора стала одинаковой. К недостаткам следует отнести некоторое усложнение конструкции, вместо цилиндров с тронковыми поршнями необходимо изготовление цилиндров с дифференциальными поршнями.

Заключение

Проведенное исследование показывает, что конструктивное исполнение компрессора влияет на диаграмму крутящего момента как количественно, так и качественно. Изменение конструкции позволило существенно улучшить диаграмму крутящего момента компрессора, что приведет не только к снижению низкочастотной вибрации, но и уменьшению массы маховика. Разработанная программа расчета позволяет еще на стадии проектирования проанализировать различные варианты конструктивного исполнения компрессора и выбрать наиболее рациональный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Френкель М.И.** Поршневые компрессоры. – Л. : Машиностроение, 1969. – 740 с.
- [2] **Четвертаков В.А.** Об уравнивании переменного опрокидывающего момента поршневых агрегатов. Судостроение, 1984. № 12. Russian.
- [3] **Kotlov A.A., Kuznetsov L.G., Burakov A.V.** Analysis of Reciprocating Booster Compressor Performance by Mathematical Modelling Methods. – AIP Conference Proceedings 2141, 030012 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5122062>.
- [4] **Яманин А.И.** Силовой анализ поршневого двигателя с использованием динамических моделей кривошипно-шатунного механизма / А.И. Яманин, В.А. Жуков, С.О. Барышников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2018. Т. 10. № 1. С. 191–200. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-191-200
- [5] **Фотин Б.С.** Поршневые компрессоры / под общ. ред. Б.С. Фотина. – Л. : Машиностроение, 1987. – 372 с.
- [6] **Пластинин П.И.** Поршневые компрессоры. Том 2. Основы проектирования. Конструкции. – 3-е изд., доп. – М. : КолосС, 2008. – 711 с.
- [7] **Kotlov A.A.** Research of Two-Stage Reciprocating Compressor by Methods of Physical and Mathematical Experiments. – AIP Conference Proceedings 2141, 030021 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5122071>
- [8] **Weifeng Wu, Zhao Zhang, Quanke Feng.** Investigation on the vibration balance approach for four-row star type reciprocating compressors. Wu Weifeng et al 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 604 012021. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012021
- [9] **Юша В.Л., Бусаров С.С., Недовенчаный А.В., Силков М.В.** Анализ влияния закона регулирования линейного гидропривода на энергетические и динамические характеристики одноступенчатого компрессорного агрегата. Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2019, № 11, С. 26–35. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-11-26-35
- [10] **Ignatiev K.M., Chrustalev B.S., Perevozchikov M.M., Zdaslinsky V.B.** “Simulation and parametric analysis of the suction valve and muffler off small reciprocating compressor,” in Proceedings of the 1996 International Compressor Engineering Conference at Purdue, 1 (W. Laafayette, USA, 1996), pp. 201–210.
- [11] **Chrustalev B.S., Krasnikov A.G., Adaev N.V.** “Analysis of nonstationary processes of heat and mass exchange in the piston compressor suction system for natural gas compression,” in Proceedings of the 1998 International Compressor Engineering Conference at Purdue, (W. Laafayette, USA, 1998), pp. 543–549.
- [12] **Isakov V.P.** Automatic valves of piston compressors for various ranges of application. Chemical and petroleum engineering / V.P. Isakov, B.S. Chrustalev. Vol. 31. № 11-12. 1995; July 1996 USA. NewYork.
- [13] **Dutra T., Moratelli S.** A theoretical simulation model for optimization of fins on the shell of a hermetic reciprocating compressor. – IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 604 (2019) 012028. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012028
- [14] **Prilutskii I.K., Prilutskii A.I., Makoveeva A.S., Molodov M.A.** Experience of the comdet-m program application in the analysis of the technical level of gas reciprocating compressors with linear drive unit at the design stage. – AIP Conference Proceedings. Сер. "Oil and Gas Engineering, OGE 2018" 2018. С. 030063.
- [15] **Калекин В.С., Исмаилов М.С., Сенькин П.А.** Математическая модель рабочего процесса детандер-компрессорного агрегата. // Наука и военная безопасность. 2020. № 1 (20). С. 45–52.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОТЛОВ Андрей Аркадьевич – Старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.
E-mail: kotlov_andrej@mail.ru

БУРАКОВ Александр Васильевич – Начальник ЦКБ, АО "Компрессор", без степени.
E-mail: 47otdel@compressor.spb.ru

КУЗНЕЦОВ Леонид Григорьевич – Председатель Совета директоров – Генеральный кон-
структор, АО "Компрессор", д-р техн. наук.
E-mail: Office@compressor-нpo.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 19.10.2020

REFERENCES

- [1] **M.I. Frenkel**, Porshnevyye kompressory. – L. : Mashinostroyeniye, 1969. – 740 s.
- [2] **V.A. Chetvertakov**, Ob uravnoveshivaniy peremennogo oprokidyvayushchego momenta porshnevnykh agregatov. Sudostroyeniye, 1984. №12. Russian.
- [3] **A.A. Kotlov, L.G. Kuznetsov, A.V. Burakov**, Analysis of Reciprocating Booster Compressor Performance by Mathematical Modelling Methods. – AIP Conference Proceedings 2141, 030012 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5122062>.
- [4] **A.I. Yamanin**, Silovoy analiz porshneвого dvigatelya s ispolzovaniyem dinamicheskikh modeley krivo-shipno-shatunnogo mekhanizma / A.I. Yamanin, V.A. Zhukov, S.O. Baryshnikov // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. – 2018. – T. 10. – № 1. – S. 191–200. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-191-200
- [5] **B.S. Fotin**, Porshnevyye kompressory / pod obshch. red. B. S. Fotina. – L. : Mashinostroyeniye, 1987. – 372 s.
- [6] **P.I. Plastinin**, Porshnevyye kompressory. Tom 2. Osnovy proyektirovaniya. Konstruktsii. – 3-ye izd., dop. – M. : KolosS, 2008. – 711 s.
- [7] **A.A. Kotlov**, Research of Two-Stage Reciprocating Compressor by Methods of Physical and Mathematical Experiments. – AIP Conference Proceedings 2141, 030021 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5122071>.
- [8] **Weifeng Wu, Zhao Zhang, Quanke Feng**, Investigation on the vibration balance approach for four-row star type reciprocating compressors. Wu Weifeng et al 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 604 012021. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012021
- [9] **V.L. Yusha, S.S. Busarov, A.V. Nedovenchanyy, M.V. Silkov**, Analiz vliyaniya zakona regulirovaniya lineynogo gidroprivoda na energeticheskiye i dinamicheskkiye kharakteristiki odnostupenchatogo kompressornogo agregata. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye, 2019, № 11, s. 26–35, DOI: 10.18698/0536-1044-2019-11-26-35
- [10] **K.M. Ignatiev, B.S. Chrustalev, M.M. Perevozchikov, V.B. Zdaslinsky**, “Simulation and parametric analysis of the suction valve and muffler off small reciprocating compressor,” in Proceedings of the 1996 International Compresssor Engineering Conference at Purdue, 1 (W. Laafayette, USA, 1996), pp. 201–210.
- [11] **B.S. Chrustalev, A.G. Krasnikov, N.V. Adaev**, “Analysis of nonstationary processes of heat and mass exchange in the piston compressor suction system for natural gas compression,” in Proceedings of the 1998 International Compresssor Engineering Conference at Purdue, (W. Laafayette, USA, 1998), pp. 543–549.
- [12] **V.P. Isakov**, Automatic valves of piston compressors for various ranges of application. Chemical and petroleum engineering / V.P. Isakov, B.S. Chrustalev. Vol. 31. № 11-12. 1995; July 1996 USA. New York.
- [13] **T. Dutra, S. Moratelli**, A theoretical simulation model for optimization of fins on the shell of a hermetic reciprocating compressor. – IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 604 (2019) 012028. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012028
- [14] **I.K. Prilutskii, A.I. Prilutskii, A.S. Makoveeva, M.A. Molodov**, Experience of the comdet-m program application in the analysis of the technical level of gas reciprocating compressors with linear drive unit at the design stage. – AIP Conference Proceedings. Ser. "Oil and Gas Engineering, OGE 2018" 2018. S. 030063.

15. **V.S. Kalekin, M.S. Ismailov, P.A. Senkin**, *Matematicheskaya model rabocheho protsessa detander-kompressornogo agregata. // Nauka i voyennaya bezopasnost. 2020. № 1 (20). S. 45–52.*

THE AUTHORS

KOTLOV Andrey A. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: kotlov_andrej@mail.ru

BURAKOV Aleksandr V. – *JSC "Compressor".*

E-mail: 47otdel@compressor.spb.ru

KUZNETSOV Leonid G. – *JSC "Compressor".*

E-mail: Office@compressor-npo.ru

Received: 19.10.2020

DOI: 10.18721/JEST.26406

УДК 334.7

*Г.С. Сологубова¹, В.Ф. Богачёв², М.А. Горенбургов²*¹ Санкт-Петербургский государственный экономический университет,
Санкт-Петербург, Россия;² Федеральный исследовательский центр Кольский Научный Центр РАН,
г. Апатиты, Мурманская обл., Россия

БАРЬЕРЫ ФИНАНСИРОВАНИЯ СЕКТОРА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Финансирование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) рассматривается как системная задача в развитии российского топливно-энергетического комплекса. ВИЭ снимает проблему дефицита и доступности энергетической инфраструктуры (генерирующих и сетевых мощностей, средств транспортировки электроэнергии к потребителю) для удалённых и островных территорий России, позволяет наращивать экспортный потенциал Минпромторгу, поддерживает наукоёмкий потенциал в электроэнергетике РФ. Процесс привлечения заёмного финансирования в сектор ВИЭ сложен и неоднозначен. Применяемое проектное финансирование актуально только для крупного бизнеса, в то время как глобальная энергетическая парадигма ориентирована на децентрализацию и вовлечение в энергетический сектор агентов малой генерации. Сегмент малого и среднего бизнеса РФ не может подключиться к развитию «зелёной генерации». Глобальный банкинг активно развивает относительно новые инструменты коммерческого финансирования, позволяющие синхронизировать денежные циклы своих клиентов с операционными циклами их бизнесов. Инструменты финансирования цепочек поставок (SCF) актуальны как для малого и среднего предпринимательства, так и для крупных компаний. Транснациональные много-продуктовые корпорации, обладая значительными финансовыми ресурсами, выгодно переливают их в контурах своих портфельных стратегий и на этапах технологических переделов своих цепочек поставок, используя такие инструменты SCF, как обратный факторинг, финансирование поставщиков и финансирование заказов на покупку. Малые и средние предприятия рассматривают SCF как один из дополнительных способов финансирования, который не увеличивает долговую нагрузку и может быть оформлен при предоставлении минимального пакета документов.

Ключевые слова: сектор ВИЭ, региональные стратегии, коммерческое финансирование ВИЭ, управление финансированием цепочки поставок, российский рынок альтернативной энергетики, освоение Арктики.

Ссылка при цитировании:

Сологубова Г.С., Богачёв В.Ф., Горенбургов М.А. Барьеры финансирования сектора возобновляемых источников энергии // Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26, № 4. С. 75–86. DOI: 10.18721/JEST.26406

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

*G.S. Sologubova¹, V.F. Bogachev², M.A. Gorenburgov²*¹ Saint-Petersburg State University of Economics,
St. Petersburg, Russia;² Federal research center Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
Apatity, Murmansk region, Russia

BARRIERS OF FINANCING RENEWABLE ENERGY

Financing of renewable energy sources (RES) is considered a system task in the development of the Russian fuel and energy complex. RES eliminates the problem of shortage and availability of energy infrastructure (generating and grid capacities, means of transporting electricity to the consumer) for remote and island territories of Russia, allows increasing the export potential of the Ministry of Industry and Trade, and supports the high-tech potential in the Russian electric power industry. The process of attracting debt financing to the renewable energy sector is complex and ambiguous. The applied project financing is relevant only for large businesses, while the global energy paradigm is focused on decentralization and involvement of small-scale generation agents in the energy sector. Supply chain Finance (SCF) tools are relevant for both small and medium-sized businesses and large companies. Multinational and multicommodity corporations having significant assets at their disposal profitably transfer them in the contours of their portfolio strategies and at the stages of technological transformation of their supply chains, using such SCF tools as reverse factoring, supplier financing and purchase order financing. Small and medium-sized enterprises consider SCF as one of the additional ways of financing that does not increase the debt burden and can be issued with a minimum of documents.

Keywords: renewable energy sector, regional strategy, commercial financing of renewable energy sources, managing supply chain financing, Russian alternative energy market, Arctic exploration.

Citation:

G.S. Sologubova, V.F. Bogachev, M.A. Gorenburgov, Barriers of financing renewable energy, Materials Science. Power Engineering, 26 (04) (2020) 75–86, DOI: 10.18721/JEST.26406

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

Введение. На государственном уровне признаётся значимость развития альтернативной энергетики для экономики РФ в целом, учитывая инфраструктурный характер электроэнергетики, обеспечивающей деятельность всех институциональных единиц экономики от корпоративного сектора, государственного управления до домашних хозяйств.

Примером запроса на активное использование альтернативных источников энергии с целью автономного обеспечения электроэнергией является компания Газпромнефть, которая разрабатывает месторождения в отдаленных неосвоенных регионах, где отсутствует инженерная инфраструктура. В таких условиях важнейшим становится вопрос обеспечения промыслов электроэнергией [1, 2, 3]. В 2017 г. в Ямало-Ненецком автономном округе корпорация приступила к опытно-промышленным испытаниям комбинированной ветро-солнечной электростанции ЮРТА, мощностью 47,5 кВт для электроснабжения блока линейных потребителей. Гибридная технология электростанции, состоящей из двух ветрогенераторов, 30 солнечных панелей и блока аккумуляторных батарей, позволяет существенно снизить расходы на электроснабжение протяженных и удаленных от сетевой инфраструктуры объектов за счет отказа от строительства линий электропередачи. Но главными преимуществами ЮРТЫ являются экологичность, отсутствие негативного влияния на среду обитания человека, природу Ямала и выработка электричества за счет возобновляемых, неисчерпаемых ресурсов – силы ветра и энергии солнца. Тем не менее, общий уровень ввода альтернативной энергетики в нефтяной сектор и включения ВИЭ энергетики в региональные стратегии России отстает от мировых тенденций [4, 5, 6]. В качестве причин отставания ВИЭ генерации научное сообщество называет отсутствие свободного рынка в энергетике (М.М. Хайкин, Н.Н. Митина) и ограниченность схем финансирования проектов по разворачиванию энергетических объектов (М.Б. Алексеева, В.Ф. Богачёв, М.А. Горенбургов, Р.С. Денисов, В.В. Елистратов, С.В. Ратнер). Представители отрасли отмечают **низкий спрос на возобновляемую электроэнергетику и «отсутствие свободных денежных средств»** (письмо директора «Роснефти» И. Сечина премьеру Д. Медведеву, 2017). И это несмотря на то, что в РФ в рамках Государственной программы «Энергоэффективность и развитие энергетики» предусмотрены механизмы налогового стимулирования и поддержки: договоры поставки мощности (ДПМ ВИЭ), субсидирование процентных ставок по кредитам, предоставляемых

для реализации проектов альтернативной энергетики, и государственное финансирование научно-исследовательских работ в сфере ВИЭ.

Эксперты российского рынка альтернативной энергетики говорят о неконкурентоспособности российского финансового сектора на своём «поле» и относят проблемы финансирования альтернативной энергетики в России к разряду «угроз» [1, 6, 7], наряду с недостатком квалифицированных кадров, отсутствием нормативной базы для распределённой энергетики, живучестью старых стереотипов управления и потребления энергии.

Постановка проблемы

Авторская концепция включает в себе положение о том, что управление цепочкой финансов может стать надёжным инструментом финансирования сложных и долгосрочных проектов, актуальных для современной России. Предлагаемая статья посвящена исследованию вопросов неконкурентоспособности российского финансового сектора в сегменте альтернативной энергетики России.

Методы и материалы

Исследование основано на информации из открытых соответствующих теме источников: правительственных документах Российской Федерации от Минфина, Минпромторга и Минэнерго, отчётах финансовых групп РФ (ВТБ, Сбербанк, Газпромбанк), отчётах промышленных групп РФ (Роснано, Россети, Росатом), пресс-релизах международных аналитических и консалтинговых агентств (Bloomberg NEF; International Finance Corporation; McKinsey; Big Electric Power News; The World Bank Group; KPMG; Forbes; PwC; Vygon Consulting), публикациях профессиональных союзов и альянсов в финансовой сфере (Ассоциации факторных компаний; Национальные Кредитные Рейтинги; Ассоциация кредитных организаций) и в сфере энергетики (Ассоциация развития возобновляемой энергетики; Ассоциация НП Совет рынка), экспертиз в деловых журналах (Финансы и управление; Арктика и Север; Энергетическая политика); научных статей на сайтах cyberleninka.ru, spoisu.ru; elibrary.ru.

В исследовании применены методы статистического, сравнительного и системного анализа. Представленные в исследовании выводы основаны на логике и комплексном подходе.

Основные положения

Для глобального сектора электроэнергетики к 2020 году характерными можно назвать следующие черты, релевантные исследованию авторов. Энергетика на основе возобновляемых источников генерации признаётся в авторитетных международных кругах как безальтернативное решение дальнейшего развития [8, 9].

Инвестиционный поток в мировом обороте уже перенаправлен с централизованного энергоснабжения на распределённое, на переход к ВИЭ. Курс на декарбонизацию, децентрализацию, цифровизацию ускоряет эволюцию энергетического сектора экономики.

В футуристическом анализе рынки сырья утрачивают своё первостепенное значение, снижая риски зависимости от поставок топлива. Темпоральность трансформаций определяет горизонты стратегического планирования краткосрочной перспективой. Перспективные направления развития энергетики сформировались на уровне домохозяйств, самого крупного сегмента частных потребителей и обусловили создание рынка энергетических услуг (терциализация энергетики) [10].

Технологические приложения в формате «домашних хабов», платформенные решения для бизнеса [11], межотраслевой перелив капитала и глобализация конкуренции создали условия для экосистем бизнеса в энергетике, в том числе, и в энергетике ВИЭ.

Отраслевой ландшафт меняется в сторону децентрализованной, распределённой и транзакционной электрической сети. Кросс-продуктовые предложения наборов энергетических услуг

с пакетной стоимостью позволяют потребителям электроэнергии ассоциировать их с промышленными и потребительскими товарами. А у поставщиков энергетических услуг появилась возможность реализации персонализированного подхода к конечному потребителю. Вариативность бизнес-моделей в секторе базируется на цепочке создания стоимости в энергетике – комбинации элементов генерации электроэнергии, маркетинга и трейдинга, управления энергосистемами и электрическими сетями; предложение услуг в категории «за счетчиком», розницы. Акцент в стратегическом выборе сегодня фокусируется на степени интеграции элементов цепочки стоимости. Рынки слияний и поглощений (M&A) в секторе ВИЭ показывают быстрый рост, что свидетельствует о здоровье отрасли [12].

Учитывая усиление конкуренции, либерализацию рынков, переход потребителей на новые технологии, многие страны составили дорожные карты в области цифровой автоматизации управления и оптимизации энергопотребления, сетевых решений для хранения энергии, интеграции в развивающуюся глобальную энергетическую экосистему. Новые бизнес-модели включают в себя такие технологии и программное обеспечение, которые способствуют переходу к децентрализованной, распределённой и транзакционной электрической сети. Клиенты (торговые, промышленные объекты, поставщики коммунальных услуг) снижают затраты на электроэнергию, увеличивая прибыльность своих проектов; открывают новые источники дохода в микрогенерации за счёт максимальной интеграции ВИЭ и снижения выбросов CO₂, одновременно повышают общую надёжность поставок электроэнергии. Этот сетевой эффект особенно важен для островных территорий, и отдалённых сообществ, рассчитывающих на энергетическую автономию. Автономность узлов и модульная структура электростанций позволяет масштабировать энергосеть и распространять внедрение инновационных технологий. Такие компании как E.ON, Engie, Enel, Fortis, Ørsted, Fortum, осуществляют свою деятельность в нескольких странах или зонах обслуживания; предлагаемые ими решения в одном регионе способны быстро мигрировать в регион с сопоставимыми условиями. Интегрированные нефтяные гиганты ExxonMobil, Chevron, BP, Total, Shell, AT&T оценили привлекательность масштабов мирового сектора электроэнергетики, в секторе ВИЭ возникли нетрадиционные конкуренты. Кроме того, появились новые бренды-конкуренты, бросающие вызов традиционным лидерам, – Hive, Nest, Tesla, Bloom быстро завоевывают признание на рынке [9].

Процентные ставки, оставшиеся низкими отчасти благодаря усилиям центральных банков по стимулированию экономического роста, начали расти, что, в свою очередь, спровоцировало увеличение стоимости инвестиций в ВИЭ сектор [8]. В 2018 г. инвестиции в сектор возобновляемой энергетики значительно превысили инвестиции в отрасль ископаемых видов топлива. В Европе и в большинстве развивающихся стран инвестиции в сектор ВИЭ выросли на 39% и 6% соответственно и достигли рекордного уровня финансирования \$61,2 млрд в Европе и \$61,6 млрд на развивающихся рынках. Доля ВИЭ становится все более существенной в энергобалансе крупнейших стран. Так, за первую половину 2019 г. в Германии из энергии солнца, ветра, воды и биомассы впервые произвели больше электроэнергии, чем АЭС и угольные станции. За следующие пять лет, по прогнозам Международного энергетического агентства (IEA), совокупная мощность альтернативных энергоносителей в мире вырастет на 50%, или 1200 ГВт [13].

Альтернативные источники энергии стали вторым по величине рынком электроэнергии в мире, но увеличение их доли по-прежнему нуждается в поддержке [8].

Для национального сектора ВИЭ характерны следующие процессы

В рамках глобальной трансформации энергетики по многим отраслям в РФ идет переоценка планов развития. Вопросы углеводородной, атомной и возобновляемой энергетики являются системообразующими в стратегии развития энергетики в РФ.

Россия по всем этим направлениям актуализирует свою позицию, являясь мировым лидером в атомной энергетике; также развивает возобновляемую энергетику. В 2019 г. на базе рабочей группы Минэнерго стартовала работа по развитию в стране водородной энергетики – задачи на среднесрочную перспективу [14]. Продолжается работа по формированию новой модели газификации, по развитию новых центров угледобычи; стимулируются проекты с высокой добавленной стоимостью, уделяется внимание безопасности в отраслях ТЭК. Сохраняется приоритет цифровизации государственного управления и цифровой трансформации отраслей ТЭК [14].

Все отрасли ТЭК РФ, согласно отчётам Минэнерго, демонстрируют стабильную и надежную работу, обеспечивая жизнедеятельность других секторов экономики в логике сохранения в ближайшие десятилетия углеводородной мировой энергетики. Однако вектор на снижение углеродоемкости глобальной экономики в рамках Парижского соглашения, ратифицированного РФ, приближает риски ущерба экономике страны и явные потери крупнейших российских углеродоемких компаний от возможного введения ЕС трансграничного углеродного регулирования (ТУР).

Так, введение ТУР для отдельных секторов экономики уже в 2021 г. может обеспечить бюджету ЕС на 2021–2027 гг. от €5 млрд до €14 млрд в г.; доля РФ в этой сумме вполне соответствует доле российского экспорта в европейском импорте. Потенциальные риски ущерба и потерь агентов национальной экономики сформировали стимулы к внедрению лучших доступных технологий, перераспределению капитала от более «грязных» отраслей к более «чистым» отраслям (И. Макаров, руководитель департамента мировой экономики ВШЭ, 2020).

Однако, в новых требованиях Минэнерго к ВИЭ- станциям определён более высокий уровень целевого показателя экспорта (отношение выручки от продаж оборудования на экспорт к стоимости ВИЭ-станции в РФ) и установлен штраф за недостаточную локализацию оборудования ЭС в размере 100% от платежа за мощность для всех видов ВИЭ. Очевидно, что такая инициатива создаёт риск полного обесценивания инвестиций в альтернативную энергетику и крайне негативно отразится на стоимости проектов и стоимости заемного финансирования. Необходим дифференцированный подход, при котором 100% штраф применяется, только в случае существенного (на 10–20%) отклонения инвестора от целевых показателей [15].

Стратегические задачи автономного и надежного энергоснабжения регионов приоритетного значения: Арктики, Дальнего Востока, Калининградской области, Крымского полуострова, Северо-Кавказского федерального округа, решаются последовательно, с учётом существующей природной системы обеспечения территории необходимыми ресурсами, позволяющими развивать ВИЭ- энергетику. В ситуации пост-COVID 19 актуализировалась деятельность в целях рационального и экологически ответственного использования энергии и энергетических ресурсов, реализации мер по противодействию изменениям климата [14].

Общий объем допустимых инвестиций в развитие зеленой генерации в РФ в 2025–2030 гг. Минэкономразвития оценивает в 659 млрд руб., хотя Минэнерго берет за базу уровень вложений в 400 млрд руб. Такие суммы, по оценкам аналитиков, позволяют построить от 6 до 24 ГВт мощности на основе ВИЭ. Кроме того, реализация программы ДПМ ВИЭ 2.0 позволит поддержать в России отрасль высокотехнологичного энергомашиностроения с возможным дальнейшим выходом на международные рынки [16].

Привлечение финансовых ресурсов является одним из ключевых условий реализации проектов в секторе ВИЭ

Крупнейшим кредитором отрасли ВИЭ с долей более 60% от всех профинансированных проектов в стране является Газпромбанк (ГПБ). В качестве финансовых инструментов банк использует кредиты на рефинансирование капзатрат, долгосрочное проектное финансирование, сделки M&A, кредитное соглашение на принципах проектного финансирования. Предоставление ГПБ

денежных средств на принципах проектного финансирования означает, что источником обслуживания кредита станет выручка, получаемая ЭС в рамках договоров о предоставлении мощности (ДПМ ВИЭ). В июне 2020 г. Газпромбанк и Ассоциация развития возобновляемой энергетики (АРВЭ) подписали соглашение о сотрудничестве в области развития российского рынка ВИЭ и совершенствования его нормативно-правовой базы, включая оптимизацию правил и инструментов финансирования. Сотрудничество нацелено на привлечение капитала в сектор ВИЭ, развитие надежных финансовых инструментов для агентов хозяйственных отношений.

Являясь лидером российского рынка проектного финансирования инновационных и социально важных проектов, ГПБ рассматривает в качестве оптимального решения по привлечению коммерческого финансирования для российского рынка ВИЭ – проектное финансирование без регресса на заемщика, при котором источником обслуживания долговых обязательств являются денежные потоки, генерируемые проектом. Условием надёжности применения такого финансового инструмента является подтверждение прогнозной выработки энергии с высокой степенью надежности. Однако особенности проектного финансирования указывают на то, что применение такого инструмента в секторе ВИЭ под силу только корпоративному сектору в партнёрстве с государством.

В качестве альтернативы проектному финансированию в секторе ВИЭ в РФ авторы рассматривают инструмент SCF (Supply Chain Finance). Механизм управления цепочкой финансов (SCF) отличается от синдицированного кредитования, проектного и венчурного финансирования, факторинга возможностью привлечения денежных средств заёмщиком в соответствии с операционным циклом своей хозяйственной деятельности и способностью синхронизировать движение финансовых потоков между сторонами цепочки поставок (ЦП) – поставщиком и покупателем, что позволяет фонтировать рабочий капитал и сокращать длительность денежного цикла.

В 2007 г. сотрудниками «Института экономики Леви» (Godley, Lavoie, 2007) были созданы модели представлений об экономических процессах на основе учета взаимосвязанных изменений потоков запасов и других активов, отражающих баланс имущества до начала движения потоков, порождаемых имуществом в совокупности с поведением собственников этих потоков, и баланс имущества после завершения движения потоков, Stock-Flow-Consistent models; каждый поток куда-то втекает, поскольку в сфере финансов нет «черных дыр» [17]. Фактор времени стал ещё более важен в учёте. От продолжительности движения потоков, от длительности полного цикла зависят размеры и темпы изменения запасов, которые затем генерируют изменение потоков, снова изменяющих запасы. Stock-Flow-Consistent models полностью удовлетворяет мейнстриму современной денежной теории (Modern Monetary Theory) о кредитной сущности денег.

Кроме того, для современной практики важна проблема макро- и микроанализа состояния оборота наличных денег. На повестке вопрос эффективного управления оборотными средствами (ОС), в первую очередь, рабочим капиталом (Working capital, собственными ОС) и дебиторской задолженностью.

Востребованность SCF в мире объясняется ростом рынка GTB (Global transaction banking) и эволюцией платёжных экосистем, ориентированных на KYC Registry (Know Your Customer или Know Your Client, Знай своего Клиента). Глобальные представления о сквозной платёжной деятельности, трансграничном характере платежей и мультивалютном предложении в среде 365 позволяют разрабатывать региональные стратегии, признавая уникальные потребности и фиксируя уровень организационного развития платёжного пространства на каждом рынке и в каждом сегменте, а также активно учитывать особенности потоков, связанных с социально-демографическими характеристиками, поколенческими и геополитическими [18, 19]. Глобальный банкинг ориентирован не только на корпоративный сектор, но и на быстрорастущие потребительские сегменты МСП, для которых передовые платёжные решения могут означать выживание в контексте

коммерческой деятельности (быстрый доступ к деньгам для пополнения оборотного капитала) [20] и возможность интеграции в международный бизнес [9].

В РФ вопросы финансирования рабочего капитала стоят остро. Для российского рынка услуг по финансированию ЦП характерна высокая концентрация. Согласно информационно-аналитическому обзору рынка факторинга в РФ по итогам I-го квартала 2020 г., доля двух крупнейших игроков (ВТБ Факторинг и Сбербанк Факторинг) в совокупном портфеле составила 55%, а в выплаченном финансировании — 46%. Лидером на рынке услуг SCF в РФ признан ВТБ Факторинг. Его портфель по сделкам без регресса на 01.04.2020 г. составил 202575,98 млн руб. (Сбербанк Факторинг — 150887,88 млн руб.). ГПБ Факторинг занимает четвертое место после Альфа-Банка. Размер портфеля ГПБ Факторинг по сделкам без регресса за период учёта составил 49448,81 млн руб. В российском факторинговом портфеле по отраслям доля энергогенерации (отрасли клиента в договоре поставки) по итогам 2019 г. составила 0,24% (одиннадцатая отрасль в 70% совокупного факторингового портфеля) [6]. Тем не менее, именно энергогенерация продемонстрировала самые большие темпы роста за период, прирост составил 1751%.

Из числа проектов, реализованных лидером российского рынка SCF — ВТБ Факторинг, 30% осуществлены в секторе электроэнергетики. Основные причины обращения хозяйствующих субъектов за привлечением дополнительного финансирования и применения инструментов SCF следующие: нехватка на модернизацию тепловых сетей средств, заложенных в годовой бюджет муниципалитетом; невозможность предоставить отсрочку платежей Поставщиком; авансирование закупок — необходимость внесения за поставку предоплаты, многократно превышающей расчетный кредитный лимит, с целью фиксации закупочных цен до сезонного повышения; приобретение КИП и финансирование работ по монтажу, настройке контрольно-измерительного оборудования, а также учета автоматизированного сбора электроэнергии для объектов электроэнергетики Сибири; финансирование сбыта электроэнергии — предоставление отсрочки платежа по поставке электроэнергии потребителям (получение оплаты сразу после подписания акта об оказании услуг); финансирование операционного цикла крупной энергетической компании с целью закрытия кассового разрыва между закупкой энергоресурсов и поступлением средств от конечных потребителей и обеспечения бесперебойных поставок топлива для предприятий энергетического комплекса Дальнего Востока; пополнение оборотного капитала для расчетов с поставщиками для нужд северного завоза до момента получения бюджетных субсидий — финансирование Северного завоза в Республику Саха (Якутия).

В результате применения инструментов финансирования SCF субъекты хозяйственных отношений получили следующие экономические эффекты: исполнение проектов; снижение рисков ведения бизнеса; снятие кредитных рисков и улучшение показателей финансовой отчётности; нивелирование валютного риска, связанного с возможным колебанием курса рубля к иностранной валюте в период отсрочки платежа; наполнение складов официальных дилеров в требуемом объёме без привлечения кредитных ресурсов; повышение качества управления дебиторской задолженностью, сокращение сроков дебиторской задолженности — длительности денежного цикла; снятие риска несвоевременных платежей и кассовых разрывов; возможность модернизации — запуска работ, проведения масштабных изменений, досрочной модернизации без использования средств инвестиционного бюджета, значительного сокращения сроков модернизации; оптимизацию расходов на закупки; возможность приобретения товаров по ценам низкого сезона на весь будущий объём поставок; синхронизацию платежей за поставки со своим производственным циклом; возможность производить оплату в удобные для бизнеса сроки, независимо от платёжных условий контрагентов, и гарантировать исполнение обязательств по своевременной поставке продукции и услуг; возможность увеличить располагаемый оборотный капитал и направить его на развитие бизнеса; возможность финансировать отношения с потребителями, стимулировать сбыт.

Заключение

Распространённой формой привлечённого финансирования в РФ остаётся проектное финансирование без регресса на заёмщика, которое при всех преимуществах не удовлетворяет запросу времени на коммерческое финансирование.

Ключевыми агентами сектора альтернативной энергетики являются государственные корпорации и финансовые группы. Тем не менее, такие факторы влияния как «догоняющее развитие», цифровизация экономики и перелив капитала в условиях глобализации конкуренции, способствуют расширению круга участников рынка, выходу на отечественный рынок ВИЭ нерезидентов, в том числе с непрофильными активами, формируя новую страту для конкуренции: не внутритопливную, не межотраслевую, а «нетрадиционную» – борьбу за экосистему.

Управление цепочкой финансов (SCF) или финансирование цепочки поставок становится инструментом удобным для всех участников привлечения коммерческого финансирования в бизнесе. Механизм SCF позволяет небольшим компаниям финансировать свою дебиторскую задолженность, своевременно обеспечивает последних ликвидностью, нивелируя критическое влияние на бизнес несоблюдения платёжной дисциплины контрагентов, способствует развитию сегмента МСП. Крупным компаниям позволяет продлить сроки погашения счетов на оплату, не подвергая своих поставщиков обременительному ожиданию оплаты дебиторской задолженности.

Обладая значительной рыночной властью, компании могут осуществлять трансакции, практически не мобилизуя собственный финансовый капитал, а используя силу влияния своего имиджа – надёжного платёжеспособного клиента. В корпоративном сегменте финансирование ЦП применяется с целью сокращения длительности финансового оборота и приведению его к отрицательной величине, что, собственно, и создаёт добавленную ценность от централизации корпоративного финансирования разноплановых бизнес-портфелей и портфельных стратегий.

В банковском секторе механизм SCF открывает перспективы в интеграции с финтех-компаниями и другими финансовыми институтами современной экономики, позволяет банкингу избежать дезинтермедиации.

В секторе энергетики, и, в частности, генерации на основе ВИЭ, где доминируют ТНК и госкорпорации, сотрудничающие на аутсорсинге с многочисленными агентами МСП, образующими специализированные кластеры и формирующими распределённые сети энергетических услуг, этот механизм позволяет развивать новые продукты, новые бизнес-модели, инновационные стратегии опережающего развития. Этот механизм равноценно выгоден и удобен как крупным агентам рыночных отношений, так и малым предприятиям, в том числе, стартапам.

В пуле программного финансирования сложных, удалённых, труднодоступных, дорогостоящих проектов, к которым можно отнести проекты освоения и развития Арктических широт в РФ, в которых финансирование цепочек поставок контролирует государство посредством участия госкорпораций в операционной деятельности в регионе, использование инструментов SCF может значительно снизить финансовую нагрузку на государственный бюджет в части финансирования государственных программ и ускорить процессы развития. Это особенно актуально в условиях темпоральности момента.

Принимая во внимание текущую финансовую и геополитическую ситуацию, сложившуюся вокруг РФ, рынок SCF имеет большие перспективы, так как позволяет решать вопросы фондирования рабочего капитала в комплексе. Сегодня можно говорить о тенденции устойчивого проникновения SCF в российскую экономику в качестве инструмента управления дебиторской задолженностью. Участники трансакций в ЦП предпочитают платить своим контрагентам и тем самым поддерживать долгосрочные партнёрские отношения (статистика демонстрирует более низкую платёжную дисциплину по банковским кредитам и уровень в 23% просроченной кредиторской задолженности в сфере обеспечения электрической энергией, газом и паром) [7].

Благодарность

Работа выполнена в рамках темы №0226-2018-0004 ИЭП «Взаимодействие глобальных, национальных и региональных факторов в экономическом развитии Севера и Арктической зоны Российской Федерации» по государственному заданию ФИЦ КНЦ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Зайков К.С., Кондратов Н.А., Липина С.А., Бочарова Л.К.** Организационные механизмы реализации политики России в Арктике в XXI в. // Арктика и Север. 2020 – № 39 С. 75–109. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2020.39.75
- [2] **Замятина Н.Ю.** Северный город – база: особенности развития и потенциал для освоения Арктики. // URL: Арктика: экология и экономика. 2020 – №2(38) С. 4–17. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-4-17
- [3] **Тутыгин А.Г., Чижова Л.А., Регета А.И.** Малый бизнес в Арктике: предпосылки для смены парадигмы управления // Арктика и Север. 2020 – № 39. С. 37–51 DOI: 10.37482/issn2221-2698.2020.39.37
- [4] **Майсюк Е.П., Иванова И.Ю.** Экологическая оценка использования разных видов топлива для производства энергии в арктических районах Дальнего Востока // Арктика: экология и экономика. 2020 – №1(37) С. 26–36. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-26-36
- [5] **Хайкин М.М., Жукова П.С.** Соотношение рыночных и нерыночных инструментов при стратегическом планировании развития национальной энергосистемы на основе ветроэнергетики. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки 2014 – № 3(197). С. 98–107.
- [6] **Денисов Р.С., Елистратов В.В., Гзенгер Ш.** Ветроэнергетика в России: возможности, барьеры, и перспективы развития // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 2. С. 17–27. DOI: 10.18721/JEST.230202
- [7] **Доронкин М., Лопатин Е.** Особо крупный фактор. Факторинговый рынок прирастает крупными сделками и регионами. 2020 /Совместный проект НКР и Ассоциации факторинговых компаний // URL: https://ratings.ru/files/research/finance/NCR_Factoring_March2020.pdf (дата обращения 03.08.2020).
- [8] Доклад о статусе глобальной отрасли возобновляемой энергетики 2019 года / Bloomberg NEF (BNEF) // URL: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/> (дата обращения 04.08.2020).
- [9] Стратегии для энергетики. 2019, PwC. /PwC в России. Индустрии. Электроэнергетика и ЖКХ// URL: <https://www.pwc.ru/ru/power-and-utilities/assets/Power%20strategies.pdf> (дата обращения 28.07.2020).
- [10] **Сологубова Г.С.** Сервисный сектор в обеспечении конкурентоспособности национальной экономики: эмпирический анализ, проблемы теории и практики. С. 13–27 // колл. монография Инновационное развитие сервисного сектора как фактор повышения конкурентоспособности национальной экономики / под редакцией О.Н. Кострюковой, Г.С. Сологубовой. – СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2016. – 277 с.
- [11] **Сологубова Г.С.** Составляющие цифровой трансформации : монография / Г.С. Сологубова. — М. : Издательство Юрайт, 2018. — 141 с.
- [12] Ежегодный обзор рынка слияний и поглощений в секторе возобновляемой энергетики. 2018 / KPMG// URL: <https://home.kpmg/ru/ru/home/insights/2018/05/great-expectations-deal-making-in-the-renewable-energy-sector.html> (дата обращения 04.08.2020).
- [13] Инвестиции в сектор возобновляемой энергетики. Пресс-релиз. 2019 / ООН программа по окружающей среде// URL: <https://www.unenvironment.org/ru/novosti-i-istorii/press-release/v-2018-godu-investicii-v-sektor-vozobnovlyaemoy-energetiki> (дата обращения 04.08.2020).

[14] Доклад министра энергетики РФ Александра Новака на итоговом заседании коллегии Минэнерго. 2020 / Энергетическая политика. Общественно-деловой научный журнал // URL: <https://energy-policy.ru/?p=4729>(дата обращения 30.07.2020).

[15] Правительство собирается ужесточить требования по локализации к проектам по новой программе поддержки ВИЭ. 2020 / Информационное агентство Big Electric Power News // <http://www.big-powernews.ru/markets/document94115.phtml?1&q> (дата обращения 10.08.2020).

[16] **Горенбургов М.А., Сологубова Г.С.** Актуальность альтернативной энергетики в РФ. С. 34–40 // Современное общество: проблемы, противоречия, решения. Сборник научных трудов / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2020. 313 с.

[17] **Гребенников П.И.** «Двойная спираль» рыночной экономики. 2019 // URL: https://seinst.ru/files/petrgreb_dvojnaya-spiral_3.pdf (дата обращения 05.08.2020).

[18] **Wei Wang, Gaoyan Lyu, Wei Cui, Yongjian Li.** Strategic technology commercialization in the supply chain under network effects. 2020, 107895 / International Journal of Production Economics. doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107895

[19] **Xu Xinhuan, Chen Xiangfeng, Jia Fu, Brown Steve, Gong Yu, Xu Yifan.** Supply chain finance: A systematic literature review and bibliometric analysis. 2018. / International Journal of Production Economics (INT J PROD ECON). VL. 204. DOI: 10.1016/j.ijpe.2018.08.003

[20] **Алексеева М.Б., Богачев В.Ф., Горенбургов М.А.** Системная диагностика стратегии развития промышленности Арктики, Записки Горного Института, 238, с. 450. DOI: 10.31897/pmi.2019.4.450

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СОЛОГУБОВА Галина Сергеевна – доцент, Санкт-Петербургский государственный экономический университет, канд. экон. наук.

E-mail: en-consalt@mail.ru

БОГАЧЁВ Виктор Фомич – профессор, главный научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «КНЦ РАН», Федеральный исследовательский центр Кольский Научный Центр РАН, д-р экон. наук.

E-mail: vic-bogachev@mail.ru

ГОРЕНБУРГОВ Михаил Абрамович – профессор, главный научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «КНЦ РАН», Федеральный исследовательский центр Кольский Научный Центр РАН, д-р экон. наук.

E-mail: gorenburgow@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 30.11.2020

REFERENCES

[1] **K.S. Zaykov, N.A. Kondratov, S.A. Lipina, L.K. Bocharova,** Organizational mechanisms for implementing Russia's policy in the Arctic in the XXI century. // Arktika i Sever. 2020 – № 39. S. 75–109. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2020.39.75

[2] **N.Yu. Zamyatina,** Northern city-base: features of development and potential for development of the Arctic. // URL: Arktika: ekologiya i ekonomika. 2020 – №2(38) S. 4-17. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-4-17

[3] **A.G. Tutygina, L.A. Chizhova, A.I. Regeta,** Small business in the Arctic: prerequisites for changing the management paradigm // Arktika i Sever. 2020 – № 39. S. 37–51. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2020.39.37

[4] **Ye.P. Maesyuk, I.Yu. Ivanova,** Environmental assessment of the use of different types of fuel for energy production in the Arctic regions of the Far East // Arktika: ekologiya i ekonomika. 2020 – №1(37) S. 26–36. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-26-36

- [5] **M.M. Khaykin, P.S. Zhukova**, Correlation of market and non-market instruments in the strategic planning of the development of the national energy system based on wind power. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Ekonomicheskiye nauki* 2014 – № 3(197). S. 98–107.
- [6] **R.S. Denisov, V.V. Yelistratov, Sh. Gzenger**, Wind power in Russia: opportunities, barriers, and development prospects // *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki*. 2017. T. 23. № 2. S. 17–27. DOI: 10.18721/JEST.230202
- [7] **M. Doronkin, Ye. Lopatin**, A particularly large factor. The factoring market is growing in large transactions and regions. 2020 / *Sovmestnyy proyekt NKR i Assotsiatsii faktoringovykh kompaniy* // URL: https://ratings.ru/files/research/finance/NCR_Factoring_March2020.pdf (data obrashcheniya 03.08.2020).
- [8] Doklad o statusе globalnoy otrasli vozobnovlyayemoy energetiki 2019 goda / BloombergNEF (BNEF) // URL: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/> (data obrashcheniya 04.08.2020).
- [9] Strategii dlya energetiki. 2019, PwC. /PwC v Rossii. Industrii. Elektroenergetika i ZhKKh// URL: <https://www.pwc.ru/ru/power-and-utilities/assets/Power%20strategies.pdf>(data obrashcheniya 28.07.2020).
- [10] **G.S. Sologubova**, Service sector in ensuring the competitiveness of the national economy: empirical analysis, problems of theory and practice. S. 13–27 // koll. monografiya Innovatsionnoye razvitiye servisnogo sektora kak faktor povysheniya konkurentosposobnosti natsionalnoy ekonomiki / pod redaktsiyey O.N. Kostryukovoy, G.S. Sologubovoy. – SPb.: Izd-vo SPbGEU, 2016. – 277 s.
- [11] **G.S. Sologubova**, Components of digital transformation: monografiya / G.S. Sologubova. — M.: Izdatelstvo Yurayt, 2018. — 141 s.
- [12] Yezhegodnyy obzor rynka sliyaniy i pogloshcheniy v sektore vozobnovlyayemoy energetiki. 2018 / KPMG // URL: <https://home.kpmg/ru/ru/home/insights/2018/05/great-expectations-deal-making-in-the-renewable-energy-sector.html> (data obrashcheniya 04.08.2020).
- [13] Investitsii v sektor vozobnovlyayemoy energetiki. Press-reliz. 2019 / OON programma po okruzhayushchey srede// URL: <https://www.unenvironment.org/ru/novosti-i-istorii/press-release/v-2018-godu-investicii-v-sektor-vozobnovlyaemoy-energetiki> (data obrashcheniya 04.08.2020).
- [14] Doklad ministra energetiki RF Aleksandra Novaka na itogovom zasedanii kollegii Minenergo. 2020 / *Energeticheskaya politika. Obshchestvenno-delovoy nauchnyy zhurnal* // URL: <https://energypolicy.ru/?p=4729>(data obrashcheniya 30.07.2020).
- [15] Pravitelstvo sobirayetsya uzhestochit trebovaniya po lokalizatsii k proyektam po novoy programme podderzhki VIE. 2020 / *Informatsionnoye agentstvo Big Electric Power News* // <http://www.bigpowernews.ru/markets/document94115.phtml?1&q> (data obrashcheniya 10.08.2020).
- [16] M.A. Gorenburgov, G.S. Sologubova, Relevance of alternative energy in the Russian Federation. S. 34–40 // *Sovremennoye obshchestvo: problemy, protivorechiya, resheniya. Sbornik nauchnykh trudov / Sankt-Peterburgskiy gornyy universitet*. SPb, 2020. 313 s.
- [17] **P.I. Grebennikov**, The "double helix" of the market economy. 2019 // URL: https://seinst.ru/files/petrgreb_dvojnaya-spiral_3.pdf (data obrashcheniya 05.08.2020).
- [18] **Wei Wang, Gaoyan Lyu, Wei Cui, Yongjian Li**, Strategic technology commercialization in the supply chain under network effects. 2020, 107895 / *International Journal of Production Economics*. doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107895
- [19] **Xu Xinhan, Chen Xiangfeng, Jia Fu, Brown Steve, Gong Yu, Xu Yifan**, Supply chain finance: A systematic literature review and bibliometric analysis. 2018. / *International Journal of Production Economics (INT J PROD ECON)*. VL. 204. DOI: 10.1016/j.ijpe.2018.08.003
- [20] **M.B. Alekseyeva, V.F. Bogachev, M.A. Gorenburgov**, System diagnostics of the Arctic industry development strategy, *Zapiski Gornogo Instituta*, 238, s. 450. DOI: 10.31897/pmi.2019.4.450

THE AUTHORS

SOLOGUBOVA Galina S. — *Saint-Petersburg State University of Economics*.
E-mail: en-consalt@mail.ru

BOGACHEV Viktor F. – *Federal research center Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.*

E-mail: vic-bogachev@mail.ru

GORENBURGOV Mikhail A. – *Federal research center Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.*

E-mail: gorenburgow@mail.ru

Received: 30.11.2020

DOI: 10.18721/JEST.26407

УДК 621.316.93

*С.Л. Шишигин, Д.С. Шишигин, И.Н. Смирнов*Вологодский государственный университет,
Вологда, Россия**РАСЧЕТ ГРОВОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ
В ЦЕПНЫХ СХЕМАХ С УЧЕТОМ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ ГРУНТА**

Удар молнии вызывает в воздушной линии волны перенапряжений, распространение которых представляет опасность для электрооборудования электрических подстанций. Для моделирования волновых процессов обычно используется теория длинных линий, однако для адекватного учета импульсной короны и сопротивления земли приходится дробить линию на элементы так, что альтернативный подход с использованием многозвенных цепных схем становится конкурентоспособным. Импульсная корона имеет нелинейную характеристику, поэтому расчеты волновых процессов производятся во временной области. Проблема в том, что сопротивление земли задано в частотной области (по формуле Карсона), поэтому сейчас его приходится моделировать сложными эквивалентными схемами. В работе получена дискретная во времени схема частотно-зависимого сопротивления земли, которая упрощает решение. Согласно рекомендациям СИ-ГРЭ расчеты заземлителей при импульсных воздействиях проводятся в модели грунта с частотно-зависимыми параметрами. Эта рекомендация применена к сопротивлению земли, что позволило обнаружить эффект уменьшения запаздывания распространения волны в высокоомном грунте, вызванный увеличением электропроводности грунта в первый момент времени прихода волны. Достоверность методики подтверждена сравнением с экспериментальными данными, расчетами частотным методом в модели длинной линии и расчетами в программе EMTP.

Ключевые слова: воздушная линия, грозовые перенапряжения, моделирование, теория заземлителей, импульсная корона, сопротивление земли, удельная проводимость, частотная зависимость.

Ссылка при цитировании:

Шишигин С.Л., Шишигин Д.С., Смирнов И.Н. Расчет грозовых перенапряжений воздушных линий в цепных схемах с учетом частотных свойств грунта // *Материаловедение. Энергетика.* 2020. Т. 26, № 4. С. 87–99. DOI: 10.18721/JEST.26407

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

S.L. Shishigin, D.S. Shishigin, I.N. Smirnov

Vologda State University, Vologda, Russia

**CALCULATION OF LIGHTNING SURGES IN TRANSMISSION
LINES USING ELECTRIC CIRCUITS CONSIDERING SOIL
FREQUENCY CHARACTERISTICS**

A lightning strike causes voltage surges in a transmission line, the spread of which is dangerous for the electrical equipment of electrical substations. The transmission line theory is usually used to simulate wave processes, but for the adequate consideration of the impulse corona and the earth-return impedance, it is necessary to split the line into elements so that an alternative approach using multi-link electric circuits becomes competitive. The impulse corona has a nonlinear

characteristic, so calculations of wave processes are carried out in the time domain. The problem is that the earth-return impedance is defined in the frequency domain (according to the Carson formula), therefore at the moment it has to be simulated using complex equivalent circuits. This paper presents a time-discrete circuit of frequency-dependent earth-return impedance, which simplifies the solution. According to the recommendations of CIGRE, calculations of grounding systems for impulse effects are carried out in a soil model with frequency-dependent parameters. This recommendation was applied to the earth-return impedance, which allowed us to detect the effect of reducing the delay in wave propagation in high-resistance soil caused by an increase of the soil electrical conductivity at the first moment of the wave arrival. The reliability of the method is confirmed by comparison with experimental data, calculations by the Fourier method in the transmission line model, and calculations in the EMTP program.

Keywords: power line, electric surges, lightning protection, impulse, mathematical models, electric grounding, electric corona, electric impedance, electric conductivity, frequency dependence.

Citation:

S.L. Shishigin, D.S. Shishigin, I.N. Smirnov, Calculation of lightning surges in transmission lines using electric circuits considering soil frequency characteristics, *Materials Science. Power Engineering*, 26 (04) (2020) 87–99, DOI: 10.18721/JEST.26407

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

Введение. Удар молнии в провод воздушной линии (ВЛ), опору или грозозащитный трос с перекрытием изоляции создает волну перенапряжения, распространение которой представляет опасность для электрооборудования электрических подстанций (ПС).

Для выбора средств защиты от перенапряжений производится численное моделирование волновых процессов ВЛ и ПС. Стандартный подход основан на теории длинных линий, современное состояние которой (применительно к рассматриваемой задаче) отражено в работах [1–3]. Этот подход является безальтернативным для проектировщиков и многих исследователей благодаря возможностям программы EMTP. В то же время, учет импульсной короны и потерь в земле приводит к необходимости дробления линий на элементы малой длины [4], что дает основание для применения цепных схем с сосредоточенными параметрами. При большом числе звеньев цепные схемы позволяют моделировать распространение, запаздывание, отражение и преломление волн с достаточной точностью. Высокая трудоемкость расчетов остается сдерживающим фактором использования данной модели.

Пример эффективного использования многозвенных цепных схем с сосредоточенными параметрами дает теория заземлителей [5]. Она применима и для расчета волновых процессов ВЛ, поскольку проводник в воздухе можно рассматривать частным случаем проводника в земле.

Современная теория заземлителей подверглась существенным изменениям, связанным с переходом к частотно-зависимой модели земли [6, 7], согласно которой электропроводность грунта увеличивается при увеличении частоты, что потребовало пересчета высокочастотных и импульсных характеристик заземлителей [8, 9]. Сопротивление земли в петле «провод-земля» также зависит от частотных характеристик грунта [10].

Расчет волновых процессов ВЛ при наличии импульсной короны – нелинейная задача, решение которой производится во временной области. В то же время формулы, описывающие сопротивление земли, получены в частотной области.

Типовое решение данной проблемы заключается в замене частотно-зависимых сопротивлений эквивалентными схемами с близкими частотными характеристиками. В работе [1] это схемы 5-9 порядка, полученные предварительным расчетом. В программе EMTP (метод Марти) подобные схемы строятся автоматически в процессе решения. Включение схем высокого порядка в

каждый элемент ВЛ усложняет схему замещения. В теории заземлителей разработана альтернативная методика с использованием дискретных схем [5, 8].

Целью работы является исследование влияния частотных свойств электропроводности грунта на волновые процессы ВЛ, а также моделирование волновых процессов ВЛ на основе цепных схем с сосредоточенными параметрами.

Цепная модель тонкого проводника в земле и воздухе

Провода ВЛ и стержни заземлителей относятся к одному классу тонких проводников, поэтому могут рассматриваться совместно. Провод ВЛ – частный случай стержневого заземлителя с чисто емкостной проводимостью растекания тока (активная проводимость равна нулю).

Для формирования многозвенной цепной схемы проводники дробятся на элементы длиной $l < \lambda/10$, где λ – длина электромагнитной волны. Например, импульсу с длительностью фронта $T_1 = 0.1$ мкс соответствует эквивалентная частота $f = 1/4 T_1 = 2.5$ МГц. Длина волны в воздухе $\lambda = c/f = 120$ м, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Тогда провода ВЛ дробятся на элементы длиной не более 12 м.

Каждому элементу ставится в соответствие П–четыреполюсник с продольным сопротивлением, включающим внутреннее и внешнее индуктивное сопротивление проводника, и поперечной проводимостью, моделирующей растекание тока в земле или емкостные токи проводников в воздухе (рис. 1). Взаимные электромагнитные связи между четырехполюсниками учитываются взаимными сопротивлениями и проводимостями. Параметры схемы приведены в [5].

Для моделирования потерь в земле волнового канала «провод ВЛ–земля» в продольные ветви добавляется частотно–зависимое сопротивление земли $Z(j\omega)$. Для моделирования импульсной короны в поперечные ветви включается нелинейная емкость

$$\Delta C(u) = C_d(u) - C_0,$$

где C_0 – геометрическая емкость провода, $C_d(u)$ – динамическая емкость коронирующего провода на фронте импульса.

Динамическая емкость выбрана согласно [11, С. 78]

$$C_d(u) = 4/3 \cdot C_0 \cdot B \cdot \sqrt[3]{u/U_0}, \quad u > U_0, du/dt > 0, \tag{1}$$

где u – напряжение провода, U_0 – начальное напряжение коронного разряда, $B = 0.85$ при отрицательной полярности и $B = 1.02$ при положительной полярности.

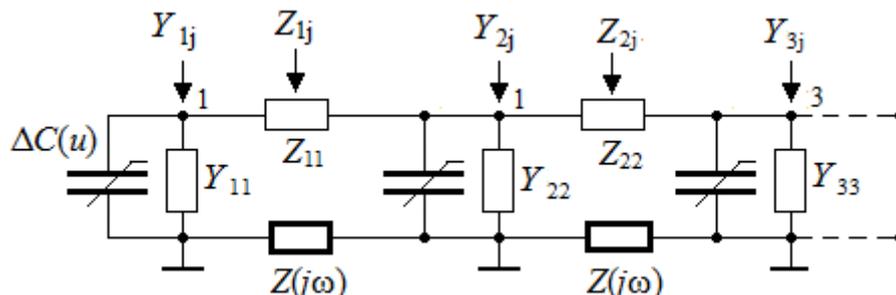


Рис. 1. Цепная модель тонкого проводника в земле и воздухе
Fig. 1. Circuit model of a thin-wire conductor in soil and air

Таким образом, модель заземлителя (рис. 1) применима для проводников ВЛ и ПС, расположенных как в земле, так и в воздухе.

Сопротивление земли в качестве обратного провода ВЛ

В однопроводной линии земля играет роль обратного провода, сопротивление которой с учетом поверхностного эффекта рассчитывается по формуле Карсона

$$Z(j\omega) = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-2h\lambda}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + j\omega\mu_0/\rho}} d\lambda,$$

где ω – угловая частота, h – высота подвеса провода, ρ – удельное сопротивление земли. Предполагается, что токи электрического смещения малы по сравнению с токами проводимости, т.е. $\omega\epsilon \ll \sigma$, где $\sigma = 1/\rho$. Это допущение, как принято считать, выполняется на частотах до 1 МГц, что справедливо для низкоомного грунта. В высокоомном грунте токи смещения уже значительно превышают токи проводимости для импульса с фронтом порядка 0.1 мкс, возникающего при обратном перекрытии изоляции опоры [12]. Тем не менее, формулу Карсона продолжают применять и в подобных случаях, включая программу ЕМТР.

Уточнение формулы Карсона с учетом токов электрического смещения началось практически сразу после ее появления (обзор в [3]). Вайс (Wise, 1933 г.) полагая, что формула Карсона справедлива для грунта с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = \epsilon_0$, выполнил формальную замену удельной проводимости грунта σ на $\sigma + j\omega\epsilon_0(\epsilon_r - 1)$. Зунде (Sunde, 1955 г.) заменил σ на $\sigma + j\omega\epsilon$ в формуле Карсона, что представляется более обоснованным. Будем придерживаться этого варианта, тем более что различие вариантов при характерном значении $\epsilon_r = 10$ несущественно.

Формула Карсона ранее считалась сложной для вычислений (вместо нее часто использовали формулу Рюденберга), а с позиции сегодняшнего дня ее недостаток в отсутствие физической интерпретации.

М.В. Костенко [13] (путем замены подынтегральной функции мажорирующей функцией) вычислил интеграл Карсона, что позволило установить его физический смысл. Плоскость нулевого потенциала, которая для идеально проводящей земли совпадает с ее поверхностью, в реальной земле (с конечной проводимостью) смещается на глубину

$$\Delta h(j\omega) = \frac{1}{p} = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0\sigma}}, \quad \sigma = 1/\rho, \quad (2)$$

где p – коэффициент распространения плоской электромагнитной волны в проводящей среде, отсюда Δh – толщина скин-слоя (теперь это комплексная величина).

Тогда, для вычисления внешней индуктивности провода можно применить метод зеркальных изображений, увеличив высоту подвеса провода на величину Δh (2)

$$L(j\omega) = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2(h + \Delta h(j\omega))}{R} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{R} + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{\Delta h(j\omega)}{h} \right) \quad [\text{Гн/м}],$$

где h – высота подвеса провода, R – радиус провода.

Погонное сопротивление петли провод-земля

$$Z(j\omega) = Z_{внут} + Z_{внеш} + Z_{зем} = Z_{внут} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{R} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{\Delta h(j\omega)}{h} \right) \quad [\text{Ом/м}], \quad (3a)$$

где $Z_{внут}$ – внутреннее сопротивление провода, $Z_{внеш}$ – внешнее индуктивное сопротивление провода для идеально проводящей земли, $Z_{зем}$ – сопротивление земли (обратного провода ВЛ).

По аналогии с (3a) можно записать взаимное сопротивление петли “два провода – земля” (не прибегая к формуле Карсона), увеличив в известной формуле, полученной по методу зеркальных изображений, высоту подвеса проводов на Δh (2)

$$Z_{12}(j\omega) = Z_{внеш} + Z_{зем} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{(h_1 + h_2 + 2\Delta h(j\omega))^2 + d^2}}{\sqrt{(h_1 - h_2)^2 + d^2}} =$$

$$= \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{(h_1 + h_2)^2 + d^2}}{\sqrt{(h_1 - h_2)^2 + d^2}} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{(h_1 + h_2 + 2\Delta h(j\omega))^2 + d^2}}{\sqrt{(h_1 + h_2)^2 + d^2}}, \quad (3б)$$

где h_1, h_2 – высота подвеса проводов, d – горизонтальное расстояние между проводами.

Таким образом, сопротивление земли по М.В. Костенко определяется проще, чем по Карсону, при высокой степени (погрешность 3%) совпадения с оригиналом (рис. 2). При сравнении с другой известной формулой сопротивления земли – формулой Рюденберга, формула М.В. Костенко точнее (рис. 2a).

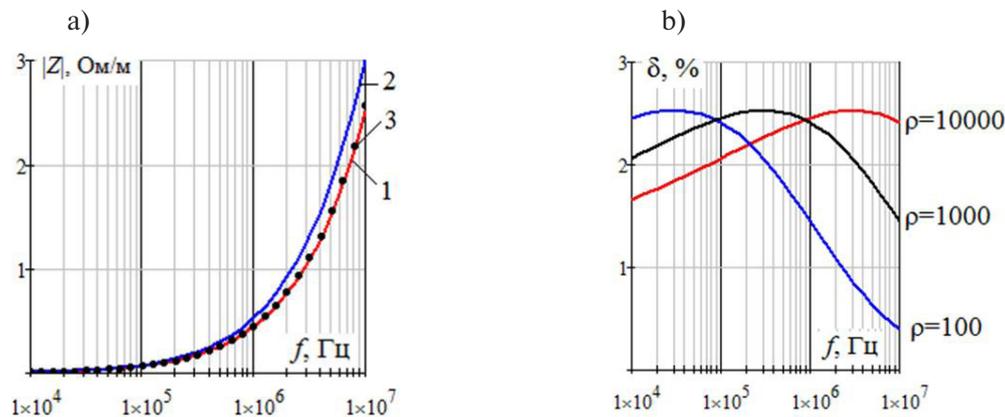


Рис. 2a. Частотная характеристика модуля сопротивления земли по формуле: 1 – Карсона, 2 – Рюденберга, 3 – М.В. Костенко; $h = 10$ м, $\rho = 10000$ Ом·м

Fig. 2a. Frequency response of the earth-return impedance module according to the formula: 1– Carson, 2–Rudenberg, 3– M.V. Kostenko; $h = 10$ m, $\rho = 10000$ $\Omega \cdot \text{m}$

Рис. 2б. Относительная погрешность модуля сопротивления земли по формуле М.В. Костенко по сравнению с формулой Карсона; $h = 10$ м, ρ [Ом·м]

Fig. 2b. Relative error of the earth-return impedance module according to M.V. Kostenko's formula in comparison with Carson's formula; $h = 10$ m, ρ [$\Omega \cdot \text{m}$]

Работа [13], к сожалению, малоизвестна. Значительно позже методика М.В. Костенко была открыта заново иностранными исследователями: С. Dubanton (1969 г.), С. Gary (1976 г.), А. Deri (1981 г.).

Частотные характеристики электропроводности грунта

Частотные характеристики удельной проводимости грунта $\sigma(\omega)$ и диэлектрической проницаемости $\varepsilon(\omega)$ получены экспериментально многими исследователями (обзор в [8]).

Будем использовать частотную модель грунта Мессира, удобную для аналитических расчетов, и модель Алипио-Висакро, применение которой рекомендовано СИГРЭ.

В работе [8] оригинальная форма записи частотных функций $\sigma(\omega)$, $\varepsilon(\omega)$ преобразована к более удобной форме комплексной удельной проводимости $\sigma(j\omega)$.

По Мессире

$$\sigma(j\omega) = \sigma_0 \left(1 + \sqrt{j\omega\varepsilon/\sigma_0}\right)^2, \quad \varepsilon = 8\varepsilon_0, \quad (4a)$$

где σ_0 – удельное сопротивление грунта на низкой частоте (100 Гц).

По Алипио-Висакро (рекомендация СИГРЭ)

$$\sigma(j\omega) = \sigma_0 \left(1 + j\omega\varepsilon/\sigma_0 + 2.37 \left(10^{-3}/\sigma_0\right)^{0.73-n} (j\omega\varepsilon/\sigma_0)^n\right), \quad n = 0.54, \quad \varepsilon = 12\varepsilon_0. \quad (4b)$$

При замене $\sigma = \sigma_0$ на $\sigma(j\omega)$ согласно (4) происходит переход от классической модели к частотно-зависимой модели грунта.

Тогда уровень плоскости нулевого потенциала вместо (2) равен

$$\Delta h(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0\sigma(j\omega)}}. \quad (5)$$

Собственное и взаимное сопротивление петли «провод-земля» получается в (3) после замены (2) на (5).

Метод дискретных схем

Метод дискретных схем – наиболее распространенный численный метод расчета переходных процессов в электрических цепях с сосредоточенными параметрами, включающих частотно-зависимые и нелинейные элементы.

Временной интервал дробится на N равных шагов длиной h . При малом шаге h индуктивности и емкости заменяются резисторами с источниками ЭДС и тока, учитывающими начальные условия каждого шага (рис. 3). В работах [5, 8] доказано, что к этим схемам сводится сопротивление и проводимость произвольного частотно-зависимого элемента, что существенно расширило область применения метода дискретных схем.

Покажем методику определения параметров дискретной схемы (рис. 3а) для сопротивления земли $Z(j\omega)$ (3).

Формальной заменой $j\omega$ на s переходим к операторному сопротивлению земли $Z(s)$. Дважды проинтегрировав $Z(s)$ в пространстве изображений и выполнив обратное преобразование Лапласа (численно в данной задаче), получаем переходное сопротивление $z(t)$ (оно численно равно на-

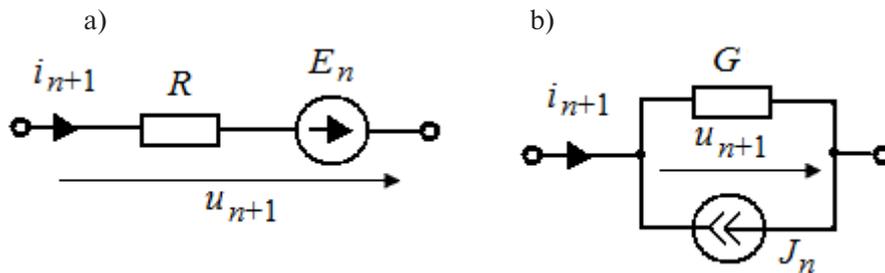


Рис. 3. Дискретная схема: а) индуктивности и произвольного частотно-зависимого сопротивления, б) емкости и произвольной частотно-зависимой проводимости на n -временном шаге

Fig. 3. Discrete circuit of: a) inductance and arbitrary frequency-dependent impedance, b) capacitance and arbitrary frequency-dependent conductivity at the n -time step

пряжению цепи при воздействии тока единичного наклона $i(t) = t$. Переходное сопротивление в узловых точках обозначим z_n .

Эту процедуру можно изобразить схематически

$$Z(j\omega) \Rightarrow Z(s) \Rightarrow z(t) = L^{-1} [Z(s) / s^2] \Rightarrow z_n, n = 0 \dots N.$$

Тогда параметры дискретной схемы сопротивления земли (рис. 3а)

$$R = \frac{z_1}{h}, E_n = \frac{1}{h} \sum_{m=1}^n (2z_{n-m+1} - z_{n-m} - z_{n-m+2}) i_m, n = 0 \dots N, z_0 = 0,$$

где $N + 1$ – число узлов, h – длина шага.

Таким образом, сопротивление земли (3) моделируется дискретной схемой (рис. 3а). В петле «провод-земля» эта схема включена последовательно с аналогичной схемой для внутреннего сопротивления провода, поэтому сопротивления и ЭДС складываются. В результате учет сопротивления земли не приводит к усложнению схемы замещения ВЛ.

Нелинейная емкость (рис. 1), моделирующая импульсную корону проводов ВЛ, рассчитывается в начале каждого шага по формуле (1) и принимается постоянной в пределах шага. Тогда она моделируется дискретной схемой (рис. 3б).

Волновые процессы в однопроводной линии

Рассчитаем волновые процессы в однопроводной полубесконечной ВЛ при воздействии коугольного импульса тока с фронтом 0.1 мкс. Место наблюдения выберем на расстоянии 3 км от начала ВЛ. Удельное сопротивление земли (на низкой частоте) $\rho = 10000$ Ом·м.

Вариант 1. Чисто активная модель земли $\sigma = 1/\rho = \text{const}$. Расчеты выполнены по программе ЕМТР и частотным методом (рис. 4, график 1), их результаты полностью совпадают.

Фронт волны сглаживается, волна запаздывает на 0.6 мкс (по сравнению с волной в воздухе), что позволяет определить эквивалентную (с тем же запаздыванием) частоту синусоидальной волны $f = 4.4$ МГц. На этой частоте токи смещения в разы превышают токи проводимости, т.е. нарушены ограничения формулы Карсона и ее применение необоснованно.

Вариант 2. Активно-емкостная модель земли с проводимостью $\sigma + j\omega\epsilon$ при $\sigma = \text{const}$, $\epsilon = \text{const}$. Расчеты выполнены частотным методом и методом дискретных схем (рис. 4, график 2), их результаты хорошо совпадают.

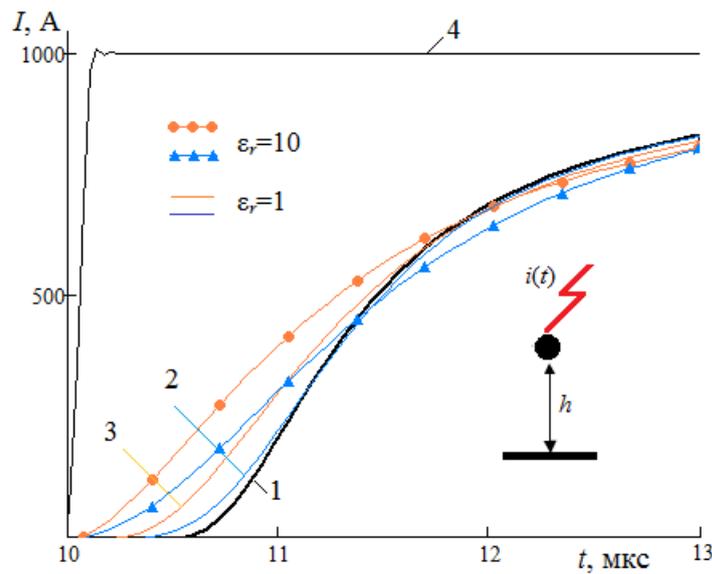


Рис. 4. Ток на расстоянии 3 км от начала полубесконечной однопроводной ВЛ для модели грунта: 1 – с чисто активной проводимостью $\sigma = 1/\rho = \text{const}$, 2 – с активно-емкостной проводимостью $\sigma + j\omega\epsilon$ ($\sigma = \text{const}$, $\epsilon = \text{const}$), 3 – с частотно-зависимыми параметрами (4а), 4 – без учета потерь в грунте; $\rho = 10000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h = 10 \text{ м}$, радиус провода 1 см

Fig. 4. Current at a distance of 3 km from the beginning of a semi-infinite single-wire transmission line for the soil model: 1 – with purely active conductivity $\sigma = 1/\rho = \text{const}$, 2 – with active-capacitive conductivity $\sigma + j\omega\epsilon$ ($\sigma = \text{const}$, $\epsilon = \text{const}$), 3 – with frequency-dependent parameters (4a), 4 – without considering losses in the soil; $\rho = 10000 \text{ }\Omega\cdot\text{m}$, $h = 10 \text{ m}$, the wire radius is 1 cm

С учетом токов смещения в грунте запаздывание волн уменьшается тем больше, чем выше диэлектрическая проницаемость грунта. Причина – увеличение электропроводности грунта – на эквивалентной частоте $f = 4.4 \text{ МГц}$ удельное сопротивление грунта $|\rho(j\omega)| = 3800 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при $\epsilon_r = 1$ и $|\rho(j\omega)| = 410 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при $\epsilon_r = 10$.

Вариант 3. Модель земли с частотно-зависимыми параметрами (4). Расчеты выполнены частотным методом и методом дискретных схем (рис. 4, график 3), их результаты хорошо совпадают.

Запаздывание волны уменьшается по сравнению с вариантом грунта 2, поскольку электропроводность грунта в этой модели выше. На эквивалентной частоте $f = 4.4 \text{ МГц}$ удельное сопротивление грунта $|\rho(j\omega)| = 1770 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при $\epsilon_r = 1$ и $|\rho(j\omega)| = 310 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при $\epsilon_r = 10$.

Таким образом, в первый момент времени прихода волны из-за высокой мгновенной проводимости грунта глубина скин-слоя значительно меньше, чем в установившемся режиме, поэтому значительная часть волны распространяется в воздухе. Далее проводимость снижается, глубина скин-слоя увеличивается и процессы запаздывания и затухания волны в грунте вновь проявляются в полной мере. При $\epsilon_r \gg 1$ запаздывание волны (по сравнению с волной в воздухе) равно нулю, как при идеально проводящей земле.

Полученные теоретические результаты могут дать объяснение экспериментальным данным, полученным при моделировании волновых процессов ВЛ на Кольском полуострове [14]. Удельное сопротивление грунта здесь обычно принимают $\rho = 5000\text{--}10000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, однако при проведении расчетов наилучшее совпадение с экспериментом получено при $\rho = 300\text{--}700 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Причиной авторы [14] считают многослойность грунта с высокой проводимостью верхнего слоя. Другой вероятной причиной, как следует из данной работы, являются частотные свойства высокоомного грунта.

Сравнение с экспериментальными данными

В опытах С. Gary [15] в начало крайнего провода ВЛ вводится импульс напряжения

$$u(t) = U_m \left[0.988e^{-0.123t} - 1.064e^{-4.1t} \sin(12.3t + 70^\circ) \right], \text{ где } U_m = 850 \cdot 10^3, t \text{ [мкс]}$$

и выполнены измерения напряжения на расстоянии 1, 3, 7, 10 км от начала ВЛ (рис. 5). Удельное сопротивление грунта по длине ВЛ, к сожалению, не измерялось (в расчетах авторы принимают $\rho = 100\text{--}1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

Расчеты, выполненные при $\rho = 200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, хорошо согласуются с измерениями (рис. 5), что подтверждает достоверность разработанной методики. Погрешности на расстоянии 7 и 10 км могут быть снижены, если предположить, что удельное сопротивление грунта в конце линии больше, чем в начале.

Исследуем влияние разных факторов на затухание волны в линии на длине 10 км.

Без учета короны и потерь в земле максимум напряжения составляет 745 кВ (рис. 6, график 3). Затухание волны здесь обусловлено только сопротивлением проводов.

С учетом затухания волны в земле (без учета короны) максимум напряжения снижается с 745 кВ до 425 кВ (рис. 6, график 4). Затухание волны весьма значительное, несмотря на относительно небольшое удельное сопротивление грунта ($\rho = 200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Таким образом, при большой длине пробега затухание волн следует учитывать не только в высокоомном грунте.

Учет импульсной короны (без учета потерь в грунте) снижает максимум напряжения с 745 кВ до 375 кВ (рис. 6, график 5). Это снижение лишь немного больше, чем за счет потерь в земле.

С учетом короны и потерь в земле первоначальный максимум напряжения снижается с 745 кВ до 320 кВ (рис. 6, график 6). Кажется бы, снижение должно быть больше, учитывая сильное затухание волны от двух рассмотренных факторов по отдельности. Причина в том, что к моменту прихода волны в канале “провод-земля” напряжение провода, обусловленное уже пришедшей

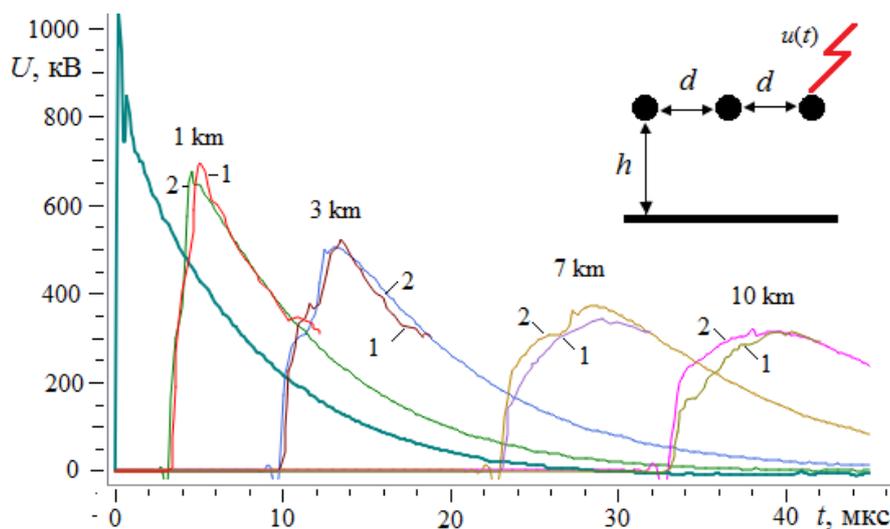


Рис. 5. Напряжение ВЛ: 1 – измерения С. Gary; 2 – расчет; $h = 12 \text{ м}$, $d = 4 \text{ м}$, радиус проводов $R = 13.2 \text{ мм}$, $\rho = 200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

Fig. 5. Transmission line voltage: 1 – C. Gary measurements; 2 – calculation; $h = 12 \text{ m}$, $d = 4 \text{ m}$, wire radius $R = 13.2 \text{ mm}$, $\rho = 200 \text{ }\Omega\cdot\text{m}$

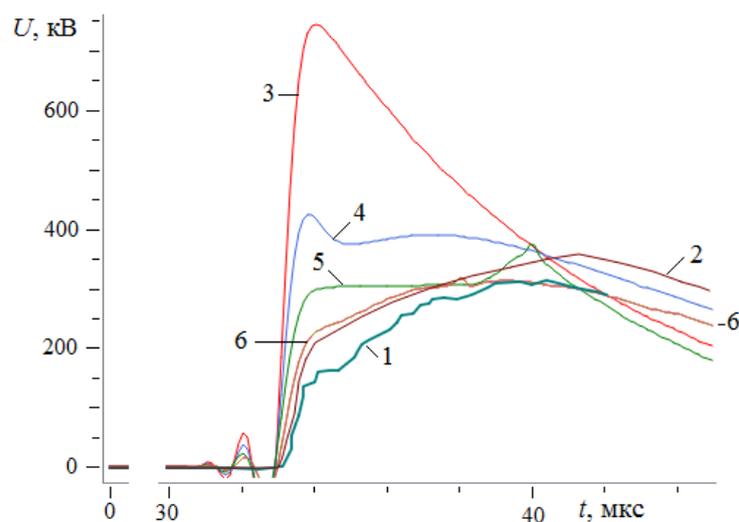


Рис. 6. Напряжение на расстоянии 10 км от начала ВЛ: 1 – измерения С. Gary; 2 – данные из документации к программе EMTP-RV; расчеты: 3 – потери только в проводах, 4 – с потерями в земле, но без короны, 5 – с короной положительной полярности, но без потерь в земле, 6 – с потерями в земле и на корону

Fig. 6. The voltage at a distance of 10 km from the beginning of the transmission line: 1 – measurement С. Gary; 2 – data from the documentation to the program EMTP-RV; calculations: 3 – losses only in wires, 4 – with losses in the ground, but without a corona, 5 – with corona of positive polarity, but no losses in the ground, 6 – with losses in the ground and with the corona

волной в воздухе, превышает напряжение начала коронного разряда, поэтому потери в земле и потери на корону действуют совместно, их нельзя рассматривать по отдельности.

Отметим, что результаты расчетов (рис. 6, график 6) согласуются с экспериментальными данными (рис. 6, график 1) не хуже, чем расчеты, выполненные в стандартной программе EMTP-RV (рис. 6, график 2).

Обсуждение результатов и выводы

Моделирование волновых процессов ВЛ и ПС при ударах молнии обычно производится методами теории длинных линий. В то же время для учета импульсной короны и потерь в земле провода ВЛ приходится дробить на элементы малой длины так, что моделирование ВЛ многосвязной цепной схемой – реальная альтернатива модели длинной линии.

Расчеты проводятся во временной области, поскольку импульсная корона имеет нелинейную характеристику. Проблема в том, что сопротивление земли, которое определяет затухание в волновом канале “провод-земля”, определено в частотной области (по формуле Карсона).

Существующий способ моделирования частотно-зависимого сопротивления во временной области сводится к построению эквивалентных схем высокого порядка. Включение подобной схемы в каждый элемент ВЛ существенно усложняет решение. Модификация формулы Карсона с учетом токов электрического смещения, переход к частотно-зависимой модели земли делает этот способ труднореализуемым. Предложенный способ моделирования частотно-зависимого сопротивления стандартной дискретной во времени схемой индуктивности, но с другими параметрами, упрощает расчеты и расширяет область применения метода дискретных схем.

М.В. Костенко установил физический смысл формулы Карсона – плоскость нулевого потенциала в земле с конечной проводимостью располагается на глубине $\Delta h(j\omega)$. Тогда внешняя индуктивность провода (собственная и взаимная) находится по методу зеркальных изображений для идеальной земли, если увеличить высоту подвеса провода на величину $\Delta h(j\omega)$.

Высокоомный грунт обладает ярко выраженными частотными свойствами, что проявляется в значительном увеличении электропроводности на высоких частотах или в первые моменты импульса. Переход к частотно-зависимой модели грунта – рекомендация СИГРЭ при расчете заземлителей в высокоомном грунте. В данной работе она распространена и на сопротивление земли в петле «провод-земля», что позволило установить новый эффект. Из-за более высокой электропроводности на фронте импульса волна проникает в грунт на меньшую глубину и движется с меньшим запаздыванием, чем принято считать при использовании классической модели грунта (с постоянным удельным сопротивлением).

Достоверность разработанной методики подтверждена сравнением с экспериментальными данными, расчетами частотным методом (по формулам длинной линии) и по программе ЕМТР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Ефимов Б.В., Гумерова Н.И.** Моделирование деформации грозовых волн в воздушных линиях с учетом совместного влияния конструкции опор, короны на проводах и потерь в земле // Труды КНЦ РАН. Энергетика. 2013. Вып. 7(17). С. 13–32.

[2] **Ефимов Б.В., Селиванов В.Н.** Волны перенапряжений на оборудовании подстанции при ударах молнии за пределами защищенного подхода // Труды КНЦ РАН. 2018. Т. 9. № 3-16. С. 7–23.

[3] **Ametani A., Miyamoto Y., Baba Y., Nagaoka N.** “Wave propagation on an overhead multiconductor in a high-frequency region”, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 56, no. 6, 2014, pp. 1638–1648.

[4] **Anane Z., Bayadi A., Huang K.** Distortion Phenomena on Transmission Lines Using Corona Modeling ATP/EMTP. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 25, No. 2; 2018, pp. 383–389.

[5] **Шишигин С.Л.** Математические модели и методы расчета заземляющих устройств // Электричество. 2010. № 1. С. 16–23.

[6] CIGRE WG C4.33. “Impact of soil-parameter frequency dependence on the response of grounding electrodes and on the lightning performance of electrical systems,” CIGRE Technical Brochure, no. 781, Oct. 2019.

[7] **Alipio R., Visacro S.** Time-domain analysis of frequency-dependent electrical parameters of soil. IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, 2017, vol. 59, No. 3, pp. 873–878.

[8] **Шишигин С.Л., Черепанов А.В., Шишигин Д.С.** Моделирование заземлителя в грунте с частотно-зависимой удельной проводимостью // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т.24. № 3. С. 91–101.

[9] **Шишигин Д.С., Шишигин С.Л.** Шаговые алгоритмы расчета волновых процессов в задачах грозозащиты электрических подстанций // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т. 10. № 2. С. 75–84.

[10] **Conti A.D., Alipio R.** Lightning transients on branched distribution lines considering frequency-dependent ground parameters. 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP), 2016, pp. 1–5.

[11] Техника высоких напряжений / Г.Н. Александров и др.; под ред. М.В. Костенко. – М.: Высш. шк., 1973. 528 с.

[12] **Ивонин В.В., Данилин А.Н., Ефимов Б.В., Карпов А.С., Климов А.А.** Экспериментальные исследования пробоя гирлянды изоляторов воздушных линий электропередачи // Труды КНЦ РАН. 2019. Т. 10. № 5-18. С. 120–125.

[13] **Костенко М.В.** Взаимные сопротивления между воздушными линиями с учетом поверхностного эффекта в земле // Электричество. 1955. № 10. С. 29–34.

[14] **Ефимов Б.В., Гумерова Н.И., Стогова Я.А.** Анализ деформации грозовых волн при их распространении по ВЛ на расстояние более 100 км // Труды Кольского научного центра РАН. 2011. № 1 (4). С. 43–59.

[15] Gary C., Timotin A., Cristescu D. Prediction of surge propagation influenced by corona and skin effect. IEE Proc., Vol. 130, Pt. A, No. 5, 1983, pp. 264–272.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ШИШИГИН Сергей Леонидович – профессор, Вологодский государственный университет, д-р техн. наук.
E-mail: ctod28@yandex.ru

ШИШИГИН Дмитрий Сергеевич – доцент, Вологодский государственный университет, канд. техн. наук.
E-mail: shishigind@yandex.ru

СМИРНОВ Иван Николаевич – аспирант, Вологодский государственный университет, без степени.
E-mail: ivan.smirnov18@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 13.10.2020

REFERENCES

- [1] **B.V. Yefimov, N.I. Gumerova**, Modelirovaniye deformatsii grozovykh voln v vozdushnykh liniyakh s uchetom sovmestnogo vliyaniya konstruksii opor, korony na provodakh i poter v zemle [Modeling of lightning wave deformation in transmission lines, taking into account the combined effect of the structure of supports, corona on wires, and losses in the ground]. Trudy KNTs RAN. Energetika. 2013. Vyp. 7(17). pp. 13–32.
- [2] **B.V. Yefimov, V.N. Selivanov**, Volny perenapryazheniy na oborudovanii podstantsii pri udarakh molnii za predelami zashchishchennogo podkhoda [Surge waves on substation equipment in case of lightning strikes outside the protected side]. Trudy KNTs RAN. 2018. T. 9. № 3-16. pp. 7–23.
- [3] **A. Ametani, Y. Miyamoto, Y. Baba, N. Nagaoka**, “Wave propagation on an overhead multiconductor in a high-frequency region”, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 56, no. 6, 2014, pp. 1638–1648.
- [4] **Z. Anane, A. Bayadi, K. Huang**, Distortion Phenomena on Transmission Lines Using Corona Modeling ATP/EMTP. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 25, No. 2; 2018, pp. 383–389.
- [5] **S.L. Shishigin**, Matematicheskiye modeli i metody rascheta zazemlyayushchikh ustroystv [Mathematical models and methods for calculating grounding systems]. Elektrichestvo. 2010. № 1. pp. 16–23.
- [6] CIGRE WG C4.33. “Impact of soil-parameter frequency dependence on the response of grounding electrodes and on the lightning performance of electrical systems,” CIGRE Technical Brochure, no.781, Oct. 2019.
- [7] **R. Alipio, S. Visacro**, Time-domain analysis of frequency-dependent electrical parameters of soil. IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, 2017, vol. 59, No. 3, pp. 873–878.
- [8] **S.L. Shishigin, A.V. Cherepanov, D.S. Shishigin**, Modelirovaniye zazemlitelya v grunte s chastotno-zavisimoy udelnoy provodimostyu [Modeling of a ground conductor in the soil with frequency-dependent specific conductivity]. Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2018. T. 24. № 3. pp. 91–101.
- [9] **D.S. Shishigin, S.L. Shishigin**, Shagovyie algoritmy rascheta volnovykh protsessov v zadachakh grozozashchity elektricheskikh podstantsiy [Step algorithms for calculating wave processes in electrical substation lightning protection problems]. Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye. 2017. T. 10. № 2. pp. 75–84.

- [10] **A.D. Conti, R. Alipio**, Lightning transients on branched distribution lines considering frequency-dependent ground parameters. 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP), 2016, pp. 1–5
- [11] *Tekhnika vysokikh napryazheniy [high-voltage engineering]*. G.N. Aleksandrov i dr.; pod red. M.V. Kostenko. – M.: Vyssh.shk., 1973. 528 p.
- [12] **V.V. Ivonin, A.N. Danilin, B.V. Yefimov, A.S. Karpov, A.A. Klimov**, Eksperimentalnyye issledovaniya proboya girlyandy izolyatorov vozduzhnykh liniy elektroperedachi [Experimental studies of breakdown of a garland of insulators of transmission lines]. Trudy KNTs RAN. 2019. T. 10. № 5-18. pp. 120–125.
- [13] **M.V. Kostenko**, Vzaimnyye soprotivleniya mezhdu vozduzhnymi liniyami s uchetom poverkhnostnogo effekta v zemle. [Mutual resistances between transmission lines taking into account the surface effect in the ground]. Elektrichestvo. 1955. № 10. pp. 29–34.
- [14] **B.V. Yefimov, N.I. Gumerova, Ya.A. Stogova**, Analiz deformatsii grozovykh voln pri ikh rasprostranenii po VL na rasstoyaniye boleye 100 km [Analysis of the deformation of lightning waves when they propagate along the transmission line at a distance of more than 100 km]. Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN. 2011. № 1 (4). pp. 43–59.
- [15] **C. Gary, A. Timotin, D. Cristescu**, Prediction of surge propagation influenced by corona and skin effect. IEE Proc., Vol. 130, Pt. A, No. 5, 1983, pp. 264–272.

THE AUTHORS

SHISHIGIN Sergey L. – *Vologda State University*.
E-mail: ctod28@yandex.ru

SHISHIGIN Dmitriy S. – *Vologda State University*.
E-mail: shishigind@yandex.ru

SMIRNOV Ivan N. – *Vologda State University*.
E-mail: ivan.smirnov18@mail.ru

Received: 13.10.2020



DOI: 10.18721/JEST.26408
УДК 621.515

*Л.Н. Маренина¹, О.А. Соловьёва¹,
Ю.Б. Галеркин¹, Е.Ю. Попова¹, В.Н. Каминский²*

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия;

² НПО "Турботехника",
г. Протвино, Московская обл., Россия

РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЗОВАННОЙ МОДЕЛИ И РАСЧЕТ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Компьютерные программы первичного проектирования на основе математических моделей потерь напора и отклоняющей способности решеток А. Комарова используются на первом этапе создания проточной части осевых компрессоров. Для проведения газодинамического исследования с использованием CFD-методов необходимо создать расчётную модель проточной части, полученной в результате проектирования. В работе описаны этапы создания параметризованной расчётной модели четырехступенчатого осевого компрессора. Параметризация проведена таким образом, чтобы при проектировании проточной части в программе первичного проектирования полученная геометрия передавалась в программный комплекс ANSYS CFX. При копировании данных происходит автоматическое построение лопаток, меридионального контура и расчётных сеток. Полученная модель готова к проведению дальнейшего газодинамического расчёта. Использование параметризованной модели делает возможным проведение оптимизации с несколькими изменяемыми параметрами и разными критериями эффективности.

Ключевые слова: осевой трансзвуковой компрессор, параметризация, вычислительная газодинамика, первичное проектирование, ANSYS.

Ссылка при цитировании:

Маренина Л.Н., Соловьёва О.А., Галеркин Ю.Б., Попова Е.Ю., Каминский В.Н. Разработка параметризованной модели и расчет осевого компрессора энергетической установки // Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26, № 4. С. 100–111. DOI: 10.18721/JEST.26408

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

*L.N. Marenina¹, O.A. Solovyeva¹,
Yu.B. Galerkin¹, E.Yu. Popova¹, V.N. Kaminsky²*

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

² NPO "Turbotechnika", Protvino, Moscow region, Russia

DEVELOPMENT OF A PARAMETRIZED MODEL AND CALCULATION OF A POWER UNIT AXIAL COMPRESSOR

Computer programs for primary design based on mathematical models of pressure losses and A. Komarov's model of flow deviation angle are used at the first stage of constructing axial compressors flow path. To conduct a gas-dynamics research using CFD methods, it is necessary to create a computational model of the flow path obtained as a result of the design. The paper

describes the main points of creating a parameterized design model of a four-stage axial compressor. The parameterization is carried out in a way to ensure that the geometry obtained by the primary flow path design program is transferred to the ANSYS CFX software package. When copying the data, the blades, meridional contour and computational grids are constructed automatically. The resulting model is ready for further gas-dynamics calculations. The use of the parameterized model enables optimization with several adjustable parameters and various criteria of efficiency.

Keywords: axial-flow compressors, parametrization, computational fluid dynamics, preliminary design, ANSYS.

Citation:

L.N. Marenina, O.A. Solovyeva, Yu.B. Galerkin, E.Yu. Popova, V.N. Kaminsky, Development of a parameterized model and calculation of a power unit axial compressor, *Materials Science. Power Engineering*, 26 (04) (2020) 100–111, DOI: 10.18721/JEST.26408

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

Введение. Газодинамический расчет проточной части осевых компрессоров с использованием CFD-методов хорошо зарекомендовал себя в проектной практике. Зарубежные фирмы широко применяют современные подходы к расчету и проектированию компрессоров, в том числе цифровые. Они разрабатывают собственные математические модели и программы, используя для верификации как экспериментальные данные, так и хорошо известные коммерческие CFD-пакеты.

Программный комплекс оптимизации формы и размеров осевых компрессоров представлен в работах [1, 2]. Первичное проектирование осуществляется на основе одномерного расчёта на средней линии тока. Далее применяется двухмерный подход, в результате которого строятся треугольники скоростей на нескольких линиях тока по высоте лопатки, рассчитываются параметры потока. Несколько осевых компрессоров были оптимизированы при помощи данной программы, затем результаты расчетов по инженерным моделям были верифицированы в программе ANSYS CFX посредством CFD-расчетов.

Усовершенствованная модель расчета и проектирования трансзвуковых осевых компрессоров, основанная на двухмерных расчетах, представлена в работе [3]. Верификация модели основана на результатах экспериментальных исследований трансзвуковой осевой ступени и трехступенчатого компрессора P&W 3S1. Результаты программных расчетов были также сопоставлены с CFD-расчетом этих объектов.

Программы трехмерного инженерного анализа собственной разработки использованы при проектировании пятиступенчатого осевого компрессора в работе [4]. Оптимизация осуществляется изменением формы средней линии лопатки. Для последующего уточняющего анализа полученные координаты передаются в коммерческий CFD-пакет NUMECA.

Методы цифрового проектирования компрессоров активно разрабатываются и внедряются во многих странах, в том числе и в России. В работах [5], [6], [7] показана успешная реализация вычислительных методов применительно к неподвижным элементам центробежных компрессоров, однако CFD-моделирование центробежных компрессоров в целом пока представляет проблему [8], [9], [10]. Положительный опыт CFD-расчетов применительно к осевым турбинам показан в работах [11], [12], [13]. Однако CFD-пакеты не могут в полной мере заменить одномерные и двухмерные инженерные программы расчета и проектирования турбомашин, но хорошо зарекомендовали себя в качестве вспомогательного инструмента для создания более совершенных специализированных программ.

Компрессорная группа лаборатории «Моделирование технологических процессов и проектирование энергетического оборудования» ЦНТИ СПбПУ использует в проектной практике ком-

пьютерные программы собственной разработки (РРОК), в основе которых лежат математические модели потерь напора и отклоняющей способности решеток А. Комарова [14]. Для окончательной доводки размеров и формы элементов спроектированной проточной части, получения наглядной картины течения, необходимой для качественного анализа полученных результатов, требуется проведение CFD-расчетов.

Целью данной работы является создание единого автоматизированного комплекса проектирования и CFD-расчета газодинамических характеристик осевых компрессоров. Необходимо связать программу первичного проектирования РРОК с рабочей средой Workbench программного комплекса ANSYS CFX. Получившийся комплекс позволит пользователю проводить CFD-расчеты газодинамических характеристик спроектированного варианта осевого компрессора в автоматическом режиме без необходимости построения 3Д моделей и расчетных сеток в ручном режиме.

Методы и материалы

Для формирования единого программного комплекса расчета и проектирования осевых компрессоров и связи результатов первичного проектирования с программой проведения CFD-расчетов была проведена параметризация проточной части осевого компрессора. Исходная геометрия для построения получена в результате расчёта по программе первичного проектирования РРОК, которая доказала свою эффективность в исследовательской и проектной практике [15]. Программа позволяет анализировать газодинамические параметры элементарных лопаточных решеток осевых компрессорных ступеней в зависимости от выбранных проектировщиком исходных параметров проектирования:

- степени реактивности,
- коэффициента расхода,
- относительного шага решетки рабочего колеса,
- фактора диффузорности рабочего колеса,
- фактора диффузорности или относительного шага решетки направляющего аппарата.

В результате первичного проектирования определяются основные размеры меридиональной формы компрессора и его лопаток в 20 сечениях по высоте. На рис. 1 показана упрощенная схема ступени осевого компрессора (ОК) с указанием контрольных сечений, а также развертка на плоскость кольцевых лопаточных решеток с указанием лопаточных углов в том виде, в котором они представлены в программе первичного проектирования.

Для построения параметризованной модели использовалась программа DesignModeler программного комплекса ANSYS. Проектирование компрессора производится по 20 осесимметричным поверхностям тока, где расстояние от оси ротора определяется радиусом r_n (рис. 1а), таким образом, для построения одной лопатки необходимо построить 20 эскизов, каждый из которых является пересечением поверхности лопатки и осесимметричной поверхности тока. Каждый эскиз лопаток РК и НА определяется одинаковым набором параметров: $Angle_{LE}$ и $Angle_{TE}$ – входной и выходной лопаточные углы; B – хорда лопатки; B_f – положение максимальной толщины относительно входной кромки; $delta$ – максимальная толщина профиля; R_{LE} и R_{TE} – радиусы скругления входной и выходной кромок. Входной направляющий аппарат (ВНА) имеет более сложную геометрию, для его построения необходимо указать дополнительный размер – положение начала участка постоянной толщины. Эскизы, используемые при построении лопаток, и условное обозначение параметров представлены на рис. 1в,г.

Результаты

Параметризованная расчётная модель осевого компрессора, полученная в результате проведенной работы, позволяет легко осуществлять построение проточной части, используя геоме-

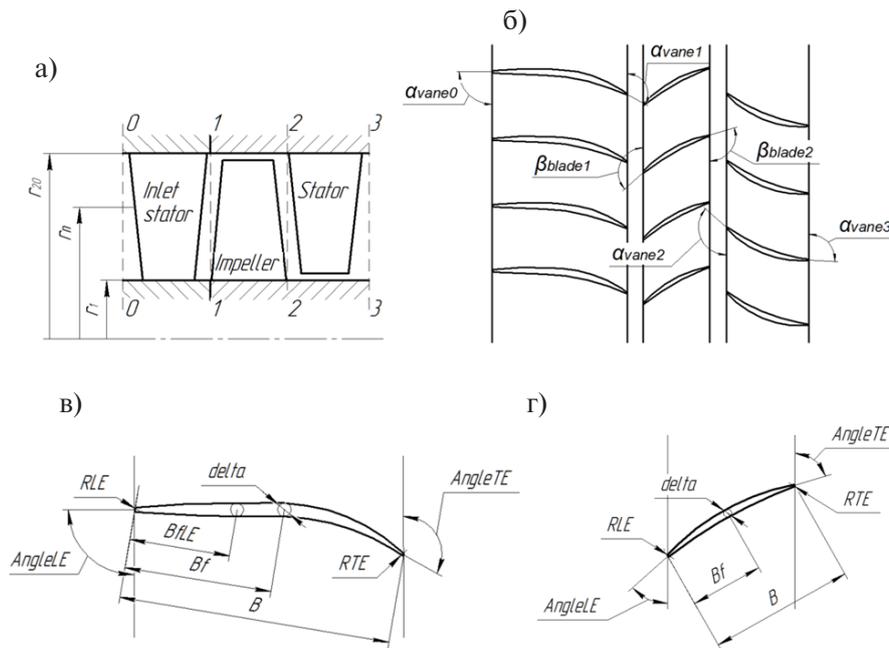


Рис. 1. Схема расположения контрольных сечений в меридиональной плоскости – а; развёртка на плоскость кольцевых лопаточных решеток – б; эскизы лопаток ВНА – в и ПК – г

Fig. 1. Layout of control sections in the meridional plane – а; blade-to-blade plane and the blade (vane) angles – б; sketches of the inlet stator vane – в and the impeller blade – г

трические данные из программы РРОК. Основные этапы построения расчетной модели описаны ниже.

Создание эскиза лопатки начинается с создания плоскости, параллельной плоскости XZ. Плоскость необходимо расположить на расстоянии от оси Z, равном соответствующему радиусу осесимметричной поверхности тока r_n . Это расстояние выносится в качестве первого параметра Workbench, для эскиза на первой поверхности тока оно обозначено как R1. Далее на эскизе создаются вспомогательные отрезки, которые необходимы для определения лопаточных углов. Углы отсчитываются от оси X, им присваиваются соответствующие названия ($AngleLE1$ и $AngleTE1$) и они также выносятся в качестве параметров (рис. 2а).

Средняя линия лопатки строится при помощи инструмента «дуга», задаётся условие касательности к построенным ранее отрезкам. Для указания толщины профиля используется окружность с центром на средней линии. Диаметр окружности обозначается $delta1$, выносится как параметр Workbench. Также, для определения положения лопатки относительно осей, задаётся совпадение центра окружности с центральной точкой эскиза. Элементы, которые окончательно определены в пространстве, подсвечиваются синим цветом. Зеленый цвет означает, что необходимо указать дополнительные размеры (рис. 2б).

На следующем этапе строится хорда профиля, её длина обозначается как $B1$. Из центра окружности опускается перпендикуляр к хорде, расстояние от точки их пересечения до входной кромки обозначается $Bf1$. Эта величина определяет положение максимальной толщины профиля (рис. 2в). В случае с лопаткой, задняя и передняя поверхности которой строятся при помощи одной дуги, $Bf1$ составляет половину от хорды профиля $B1$. Обе величины выносятся как параметры Workbench, в таблице параметров указывается их взаимосвязь: $P3 = P2 * 0.5$ (рис. 2г), где $P1...Pn$ – программное обозначение параметров с использованием сквозной нумерации.

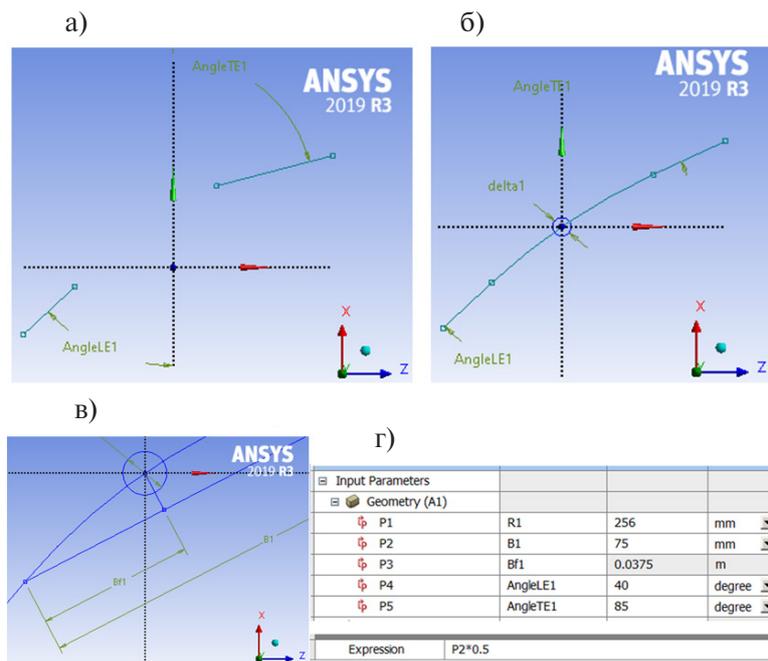


Рис. 2. Построение лопаточных углов в программе DesignModeler – а; построение окружности, определяющей толщину профиля – б; задание положения максимальной толщины профиля – в; задание взаимосвязи между параметрами – г
 Fig. 2. Blade angles construction in the DesignModeler program – а; creation a circle that defines the profile thickness – б; setting the position of the maximum profile thickness – в; parameters relationship in the parameter table – г

На следующем этапе строится наружный контур лопатки. Для этого на эскизе создаются элементы закругления входной и выходной кромки в виде дуг, радиусы которых обозначаются соответственно RLE1 и RTE1 и выносятся в список параметров. Далее, также при помощи инструмента «дуга», строятся передняя и задняя поверхности лопатки, задаётся условие касательности к входной и выходной кромкам и к окружности delta1. Эскиз становится полностью определенным, указания дополнительных размеров не требуется. При изменении любого параметра лопатка автоматически перестраивается. Таким образом, мы получили параметризованный эскиз лопатки на первой осесимметричной поверхности тока, который подходит как для РК, так и для НА (рис. 3а). Как отмечалось ранее, для построения лопатки ВНА вводится дополнительный размер BfLE (рис. 1в).

Таким образом, для описания одного эскиза лопатки РК или НА используются 8 параметров, для ВНА – 9 параметров. В файле-шаблоне Excel необходимо расположить эти параметры в том же порядке, в каком они добавлялись в таблицу параметров Workbench (рис. 3б и 3в). Также необходимо обратить внимание, что в программе первичного проектирования отсчёт лопаточных углов от оси X в РК и НА различается (рис. 1б). Для учёта этого обстоятельства, в файле-шаблоне Excel углы для РК пересчитываются по формуле $1800-\beta$.

Для создания эскизов в оставшихся 19 сечениях необходимо повторить описанные выше действия, присваивая новым параметрам номер соответствующего сечения. Для ускорения построения можно воспользоваться функцией «Write script», записать последовательность действий и воспроизводить их при помощи действия «Run script». Когда все необходимые параметры будут вынесены в таблицу Workbench и заполнится файл-шаблон Excel, перестроение всех 20 эскизов лопаток можно будет производить одним действием – копированием данных из Excel в Workbench.

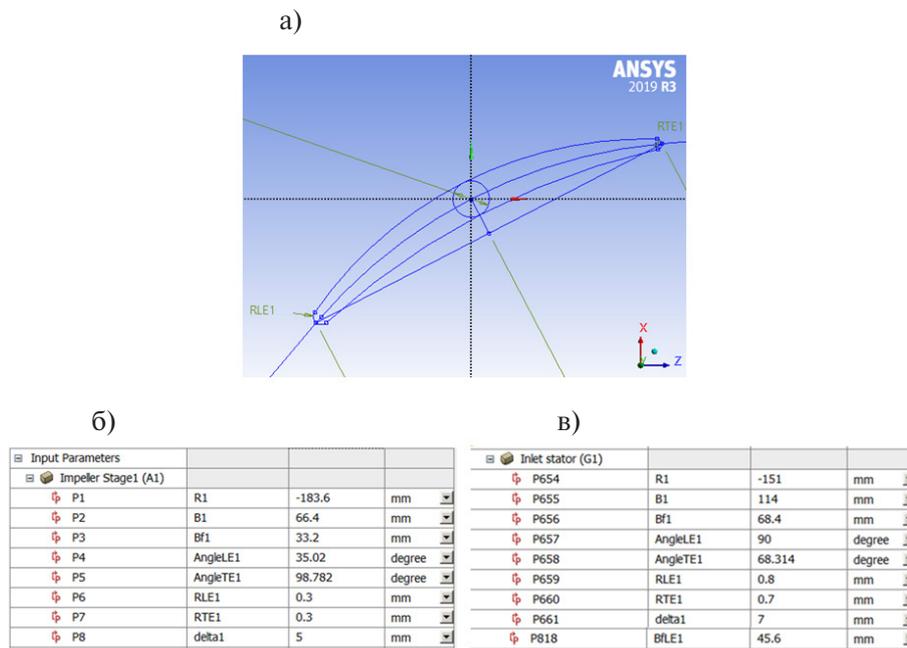


Рис. 3. DesignModeler, параметризованный шаблон лопатки для ПК или НА – а; таблица параметров Workbench: ПК – б и ВНА – в

Fig. 3. DesignModeler, parameterized blade template for impeller or stator – а; table of Workbench parameters: impeller – б, inlet stator – в

Построение трехмерного лопаточного профиля производится с помощью инструмента Skin/Loft путем соединения 20 эскизов лопаток одной поверхностью. Однако, для корректной работы функции «Skin» необходимо указывать эскизы, на которых нет дополнительных линий (вспомогательных объектов, использованных при построении лопаточного профиля). Также, во избежание ошибок, рекомендуется создавать операцию «Skin» отдельно для передней и задней поверхностей. С учетом вышесказанного, необходимо скопировать элементы лопаточного профиля на дополнительные эскизы, которые будут использоваться при построении поверхности лопатки (рис. 4а).

Для экспорта готовой лопатки в сеточный генератор TurboGrid необходимо задать геометрическую форму и положение втулки и периферии. С этой целью в отдельном окне DesignModeler строится и параметризуется общий меридиональный контур для всех четырех ступеней осевого компрессора. Координаты точек вдоль оси Y обозначаются как $R_{i, hub}$ и $R_{i, shg}$ для втулки и периферии соответственно, i – номер контрольного сечения. Положение точек вдоль оси Z задается размерами $Z_{i, hub}$ и отсчитывается от плоскости XY. Расчёт размера $Z_{i, hub}$ для каждого контрольного сечения описан в таблице параметров Workbench формулой, в которой учитывается осевая протяженность лопаток и величины зазоров между лопаточными решетками. Общий вид полученного меридионального контура представлен на рис. 4б.

Полученные из меридионального контура компрессора радиусы закругления втулочной и наружной поверхностей используются для построения меридионального обвода для каждой лопатки в отдельности. Для этого в файле DesignModeler с готовым трехмерным лопаточным профилем создаётся эскиз участка меридионального контура, по которому при помощи операции Revolve строится объемное тело. При создании функции «ExportPoints», необходимой для экспорта геометрии в сеточный генератор TurboGrid, выделяется поверхность пересечения этого тела с поверхностью готовой лопатки. Итоговый вид проточной части для лопаток ВНА, ПК и НА первой ступени представлены на рис. 5.

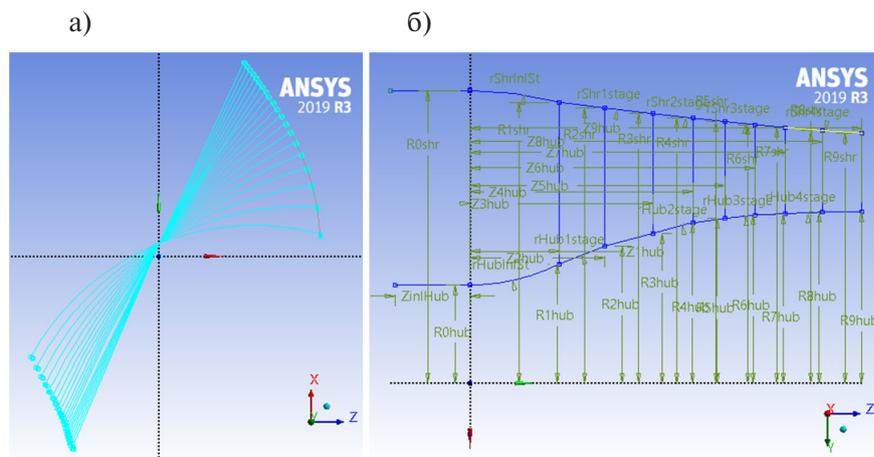


Рис. 4. DesignModeler, построение задней поверхности лопатки при помощи инструмента Skin/Loft – а; параметризованный меридиональный контур четырехступенчатого осевого компрессора – б

Fig. 4. DesignModeler, construction of the blade back surface with a tool Skin/Loft – а; parameterized meridional contour of a four-stage axial compressor – б

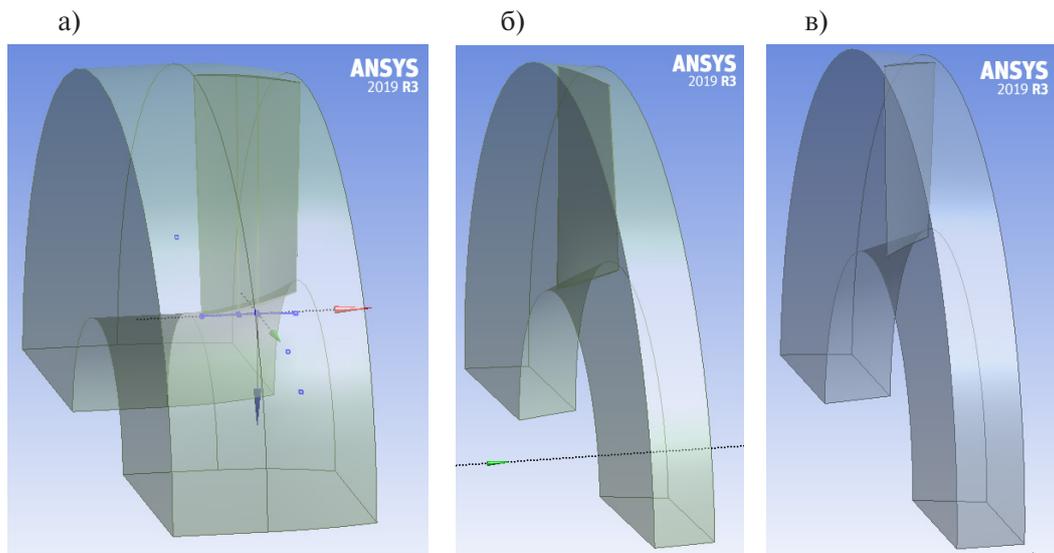


Рис. 5. DesignModeler, итоговый вид лопаток ВНА – а, ПК – б и НА – в первой ступени осевого компрессора

Fig. 5. DesignModeler, the final view of the inlet stator vane – а, impeller blade – б and stator vane – в of an axial compressor first stage

Для построения расчетной сетки использовалась программа TurboGrid. Готовая структурированная гексаэдральная сетка состоит из порядка 400 000 элементов для одного лопаточного венца. Для дальнейшего газодинамического расчета предполагается задание модели турбулентности SST (Shear Stress Transport), требующей значений величины $y^+ < 10$. С учетом этого величина первого пристеночного элемента составляет около 0,015 мм.

На следующем этапе необходимо выгрузить готовые сетки в программу CFX-Pre, где в полуавтоматическом режиме с использованием функции «Turbo Mode» происходит задание граничных условий для всех поверхностей. Общий вид полученной расчётной модели четырехступенчатого осевого компрессора представлен на рис. 6.

Представленная выше параметризованная модель была использована при выполнении работ по осевому компрессору энергетической установки по проекту «Разработка технических решений и прототипов устройств – камера сгорания, компрессор низкого давления для создания конкурентоспособных газовых турбин мощностью 25 МВт для газоперекачивающих агрегатов на основе цифровых двойников разрабатываемых устройств».

При расчёте использовалась модель турбулентности SST. Между неподвижными и вращающимися элементами использовался интерфейс «Stage» с осреднением скорости в окружном направлении. На входе задавалось полное давление 101325 Па и полная температура 288,15 К, на выходе – статическое давление 303500, частота вращения 10200 об/мин. На рис. 7 представлена структура потока на средней по высоте лопатки линии тока.

В результате CFD-расчёта четырехступенчатого осевого компрессора при описанных выше граничных условиях получены значения газодинамических параметров в виде КПД (84,3%) и отношения давлений компрессора (3,3).

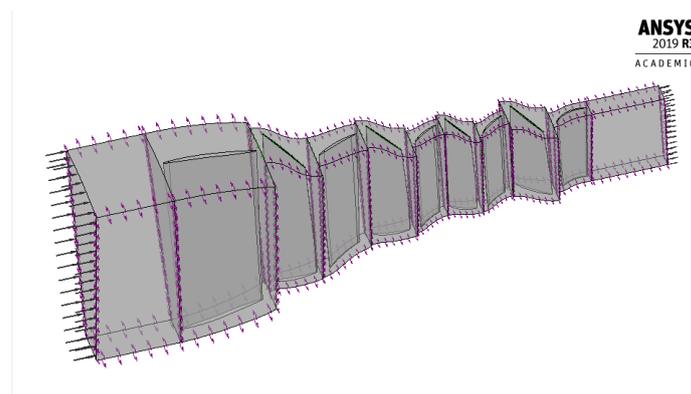


Рис. 6. ANSYS CFX-Pre, общий вид готовой расчётной модели четырехступенчатого осевого компрессора
Fig. 6. ANSYS CFX-Pre, general view of the final design model of a four-stage axial compressor

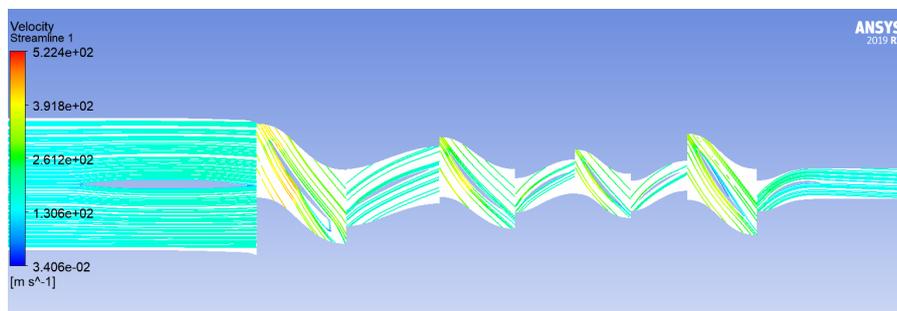


Рис. 7. ANSYS CFX-Post, структура потока на средней по высоте лопатки линии тока
Fig. 7. ANSYS CFX-Post, streamlines on the blade-to-blade surface

Обсуждение

Для эффективного проектирования и производства компрессорной техники требуются наиболее современные и полные математические модели, компьютерные программы, реализующие цифровые технологии проектирования. В результате работы было произведено формирование единого автоматизированного комплекса проектирования и CFD-расчета газодинамических характеристик осевых компрессоров. Созданный комплекс исключает необходимость пользователю производить трудоемкие ручные построения геометрии и расчетных сеток и ускоряет процесс проектирования новых осевых компрессоров. Данные из программы первичного проектирования передаются в созданные геометрические шаблоны программы DesignModeler и далее в сеточный генератор TurboGrid. Готовая параметризованная модель учитывает сложные взаимосвязи геометрических параметров, перестраивая проточную часть в автоматическом режиме. Результаты пробного расчета показали полную готовность модели к проведению дальнейших CFD-исследований. Дальнейшим этапом работ в этом направлении является верификация CFD-расчетов и выработка рекомендаций по их постановке и проведению, которая бы гарантировала получение достоверных результатов. В рамках выполнения работ по проекту планируется рассчитать семейство газодинамических характеристик компрессора при нескольких значениях частоты вращения.

Заключение

В результате работы был сформирован единый автоматизированный комплекс, позволяющий проводить первичное проектирование по заданным параметрам и CFD-расчет газодинамических характеристик осевых компрессоров. Описанный выше алгоритм создания параметризованной модели проточной части четырехступенчатого осевого компрессора показал возможность подготовки объекта для проведения газодинамического расчета внутри программного комплекса ANSYS CFX. Были успешно проведены расчеты исследуемого объекта – четырехступенчатого осевого компрессора ГТД. Результаты расчетов показали эффективность предложенной параметрической модели, удобство ее использования. Применение параметризованной модели делает возможным проведение оптимизации с несколькими изменяемыми параметрами и разными критериями эффективности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10165). Расчеты проводились с использованием суперкомпьютерного центра «Политехнический» СПбПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Banjac M.** Development of method and computer program for multistage axial compressor design: part I – mean line design and example cases. / M. Banjac, M. V. Petrovic / Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2018 June 11-15, 2018, Oslo, Norway.
- [2] **Banjac M.** Development of method and computer program for multistage axial compressor design: part II – two-dimensional design and validation using CFD. / M. Banjac, M. V. Petrovic / Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2018 June 11-15, 2018, Oslo, Norway.
- [3] **Li T.** Axial compressor performance prediction using improved streamline curvature approach. / T. Li, Y. Wu, H. Ouyang, X. Qiang / Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2018 June 11-15, 2018, Oslo, Norway.
- [4] **Zhang J., Zhou Zh., Cao H., Li Q.** Aerodynamic design of a multi-stage industrial axial compressor Advances in Engineering Software 116 (2018) 9–22.

[5] **Galerkin Y., Drozdov A., Solovyeva O.** Vaneless diffuser for low flow rate centrifugal compressor stage. – Proceedings of 13th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics. – Paper ID: ETC2019-329. – ETC13, Lausanne, Switzerland. – April 8-12, 2019.

[6] **Галеркин Ю.Б., Дроздов А.А., Соловьёва О.А.** Особенности работы безлопаточных диффузоров центробежных компрессорных ступеней с разной меридиональной формой. Труды 16 Международной научно-технической конференции по компрессоростроению. – Спб. – Том 1. – 2014. С. 171–178.

[7] **Marenina L., Galerkin Y., Soldatova K.** Computational fluid dynamics application for analysis of centrifugal compressor stage stator part. – International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 7 (6), pp. 656–661. DOI: 10.18178/ijmerr.7.6.656-661

[8] **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>

[9] **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

[10] **Borovkov A., Voinov I., Galerkin Yu., 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>

[11] **Rakov G.L., Rassokhin V.A., Zabelin N.A., Olennikov S.Y., Sebelev A.A., Sukhanov A.I., Schislyaev S.M.** A low emission axial-flow turbine for the utilization of compressible natural gas energy in the gas transport system of Russia. International Journal of Environmental and Science Education. 2016. Vol. 11, № 18, pp. 11721–11733.

[12] **Smirnov M.V., Sebelev A.A., Zabelin N.A., Kuklina N.I.** Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part I. 12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, ETC 2017.

[13] **Sebelev A.A., Smirnov M.V., Borovkov A.I., Kuklina N.I., Rakov G.L.** Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part II: Method validation and final results. 13th European Turbomachinery Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, ETC 2019.

[14] **Комаров А.П.** Исследование плоских компрессорных решеток / Лопаточные машины и струйные аппараты, Сб. статей, Вып. 2. М.: Машиностроение 1967. С. 67–110.

[15] **Попов Ю.А.** Совершенствование и анализ прочной части осевых компрессоров и ступеней с использованием результатов испытания лопаточных решеток. [текст]: дис...канд. техн. наук / Ю.А. Попов; СПбГПУ. – Спб., 2010.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МАРЕНИНА Любовь Николаевна – ведущий инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, M.Sc.
E-mail: marenina_ln@mail.ru

СОЛОВЬЁВА Ольга Александровна – старший преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.
E-mail: solovyeva.oa@yandex.ru

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

E-mail: yuri_galerkin@mail.ru

ПОПОВА Елена Юрьевна – спец. по учебно-методической работе, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: e.popova@list.ru

КАМИНСКИЙ Валерий Наумович – генеральный директор, НПО "Турботехника", д-р техн. наук.

E-mail: design@kamturbo.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 09.11.2020

REFERENCES

[1] **M. Banjac**, Development of method and computer program for multistage axial compressor design: part I – mean line design and example cases / M. Banjac, M. V. Petrovic / Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT 2018 June 11-15, 2018, Oslo, Norway.

[2] **M. Banjac**, Development of method and computer program for multistage axial compressor design: part II – two-dimensional design and validation using CFD / M. Banjac, M. V. Petrovic / Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2018 June 11-15, 2018, Oslo, Norway.

[3] **T. Li**, Axial compressor performance prediction using improved streamline curvature approach / T. Li, Y. Wu, H. Ouyang, X. Qiang / Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2018 June 11-15, 2018, Oslo, Norway.

[4] **J. Zhang, Zh. Zhou, H. Cao, Q. Li**, Aerodynamic design of a multi-stage industrial axial compressor Advances in Engineering Software 116 (2018) 9–22.

[5] **Y. Galerkin, A. Drozdov, O. Solovyeva**, Vaneless diffuser for low flow rate centrifugal compressor stage. – Proceedings of 13th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics. – Paper ID: ETC2019-329. – ETC13, Lausanne, Switzerland. – April 8-12, 2019.

[6] **Yu.B. Galerkin, A.A. Drozdov, O.A. Solovyeva**, Osobennosti raboty bezlopatochnykh diffuzorov tsen-trobeznykh kompressornykh stupeney s raznoy meridionalnoy formoy (Features of the operation of vaneless diffusers of centrifugal compressor stages with different meridional shapes). Trudy 16 Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii po kompressorostroyeniyu. – Spb. – Tom 1. – 2014. S. 171–178.

[7] **L. Marenina, Y. Galerkin, K. Soldatova**, Computational fluid dynamics application for analysis of centrifugal compressor stage stator part. – International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 7 (6), pp. 656–661. DOI: 10.18178/ijmerr.7.6.656-661

[8] **A.I. Borovkov, I.B. Voinov, 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>

[9] **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

[10] **A. Borovkov, I. Voinov, Yu. 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>

[11] **G.L. Rakov, V.A. Rassokhin, N.A. Zabelin, S.Y. Olennikov, A.A. Sebelev, A.I. Sukhanov, S.M. Schislyaev**, A low emission axial-flow turbine for the utilization of compressible natural gas energy in the gas transport system of Russia. *International Journal of Environmental and Science Education*. 2016. Vol. 11, № 18, pp. 11721–11733.

[12] **M.V. Smirnov, A.A. Sebelev, N.A. Zabelin, N.I. Kuklina**, Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part I. 12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, ETC 2017.

[13] **A.A. Sebelev, M.V. Smirnov, A.I. Borovkov, N.I. Kuklina, G.L. Rakov**, Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part II: Method validation and final results. 13th European Turbomachinery Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, ETC 2019.

[14] **A.P. Komarov**, Issledovaniye ploskikh kompressornykh reshetok (Investigation of flat compressor cascades) / Lopatochnyye mashiny i struynyye apparaty, Sb. statey, Vyp. 2. M.: Mashinostroyeniye 1967. S. 67–110.

[15] **Yu.A. Popov**, Sovershenstvovaniye i analiz prochnoy chasti osevykh kompressorov i stupeney s ispolzovaniyem rezultatov ispytaniya lopatochnykh reshetok (Improvement and analysis of the flow path of axial compressors and stages using the results of vane cascade testing). [tekst]: dis...kand. tekhn. nauk. / Yu.A. Popov; SPbGPU. – SPb., 2010.

THE AUTHORS

MARENINA Lyubov' N. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: marenina_ln@mail.ru

SOLOVYEVA Olga A. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: solovyeva.oa@yandex.ru

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

POPOVA Elena Yu. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: e.popova@list.ru

KAMINSKY Valeriy N. – *NPO "Turbotekhnika"*.
E-mail: design@kamturbo.ru

Received: 09.11.2020

DOI: 10.18721/JEST.26409

УДК 62-523.2

Д.М. Шишов, Д.А. Шевцов, Д.В. Сухов

Московский авиационный институт,
Москва, Россия

БЕЗДАТЧИКОВЫЙ РЕГУЛЯТОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНО-ФАЗОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Рассматривается способ построения бездатчикового регулятора синхронного электродвигателя с постоянными магнитами на роторе. Недостатком таких популярных методов управления электродвигателями переменного тока, как векторное управление и прямое управление моментом, является использование математической модели двигателя. Предлагаемый подход позволяет исключить необходимость использования математической модели электродвигателя в процессе управления. Это позволяет существенно упростить структуру регулятора. Вместе с тем, способ амплитудно-частотно-фазового регулирования, предлагаемый в статье, позволяет достичь высоких показателей энергоэффективности. Также показано решение проблемы пуска электродвигателя под нагрузкой без использования датчиков положения ротора. Описаны принципы построения структуры и схемотехнической реализации регулятора и приведены результаты моделирования основных процессов. Перечислены основные преимущества предложенного решения и описана область его применения.

Ключевые слова: электропривод, регулятор электродвигателя, синхронный двигатель с постоянными магнитами, бездатчиковое управление, амплитудно-частотно-фазовое управление.

Ссылка при цитировании:

Шишов Д.М., Шевцов Д.А., Сухов Д.В. Бездатчиковый регулятор электродвигателя с амплитудно-частотно-фазовым управлением // Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26, № 4. С. 112–122. DOI: 10.18721/JEST.26409

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

D.M. Shishov, D.A. Shevtsov, D.V. Sukhov

Moscow Aviation Institute,
Moscow, Russia

SENSORLESS MOTOR CONTROLLER WITH AMPLITUDE-FREQUENCY-PHASE CONTROL

The paper considers development of a sensorless driver for a synchronous electric motor with permanent magnets is considered. The disadvantage of such popular methods for controlling AC motors as vector control and direct torque control is the use of a mathematical model of the motor. The proposed approach eliminates the need to use a mathematical model of the electric motor in the control process. This makes it possible to significantly simplify the structure of the regulator. The proposed method of amplitude-frequency-phase control allows achieving high levels of energy efficiency. The solution to the problem of starting an electric motor under load without using rotor position sensors is also shown. The principles of constructing the structure and circuit design of the regulator are described and the main results of modeling are presented. The authors list the main advantages of the proposed solution and describe the scope of its application.

Keywords: electric drive, motor driver, permanent magnet synchronous motor, sensorless control, amplitude-frequency-phase control.

Citation:

D.M. Shishov, D.A. Shevtsov, D.V. Sukhov, Sensorless motor controller with amplitude-frequency-phase control, *Materials Science. Power Engineering*, 26 (04) (2020) 112–122, DOI: 10.18721/JEST.26409

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

Введение. Последние несколько десятков лет огромное количество публикаций посвящается так называемому векторному управлению электродвигателями переменного тока, в том числе и синхронными двигателями с постоянными магнитами. Существуют издания, посвященные теоретическим аспектам данного метода [1], [2], [3], большое количество практических рекомендаций от производителей микроконтроллеров, например в [4], [5] и др., посвященных детальному анализу векторного управления. В них разработан и отточен математический аппарат и рассмотрено огромное количество вариантов исполнения. Многие фирмы производят электронную аппаратуру, в которой реализованы алгоритмы векторного управления. В качестве примера можно назвать преобразователи частоты (инверторы) Mitsubishi FR-E700, Delta VFD-VE, OMRON V1000. Однако, поиски оптимальных структур регулирования электродвигателей не останавливаются. Выходят новые публикации, посвященные улучшению предложенных ранее алгоритмов: [6], [7], [8]. Предлагаются альтернативные подходы к решению задачи управления, представленные, например в [9], [10], [11]. Это свидетельствует о том, что векторное управление имеет свои недостатки, как и любое техническое решение. Главным и принципиальным его недостатком является зависимость качества управления от точности соответствия параметров математической модели, по которой вычисляются управляющие воздействия, и реального электродвигателя. Кроме этого, можно отметить достаточно большой объем вычислений, который требует наличия соответствующих ресурсов.

Наравне с векторным управлением интерес научного и инженерного сообщества также прикован к так называемому методу прямого управления моментом (DTC) [12], [13], [14]. Все разновидности этого метода также базируются на использовании математической модели двигателя при вычислении управляющего воздействия. Особенно критичными к точности задания параметров модели являются разновидности векторного управления и прямого управления моментом, называемые бездатчиковыми [15]. Это название отражает отсутствие датчиков положения ротора и частоты вращения в структуре регулятора. Угол поворота ротора, необходимый для вычисления управляющего воздействия в рамках обоих методов, определяется косвенно по математической модели двигателя. Таким образом, ошибка в задании параметров модели в бездатчиковых системах влияет на эффективность управления гораздо сильнее.

Целью данной работы является разработка структуры и схемотехнических решений для бездатчикового регулятора синхронного электродвигателя, обеспечивающего эффективное преобразование энергии без использования математической модели двигателя.

Физические основы оптимального управления электродвигателем переменного тока

Основной задачей, которую решает регулятор электродвигателя, является формирование токов в обмотках якоря ЭД для создания вращающегося электромагнитного поля. Для любого электродвигателя, ротор которого создает магнитный поток, можно записать следующее соотношение для электромагнитного момента:

$$M_{эм} = kB_r B_s \sin(\alpha), \quad (1)$$

где B_r – магнитная индукция поля ротора, B_s – магнитная индукция поля статора, k – конструктивный коэффициент пропорциональности, α – угол между магнитными потоками ротора и статора. Максимальный момент двигателя создается при условии минимума потребляемого тока, когда поля ротора и статора ортогональны. Если применить простейшие преобразования, воспользовавшись законом Фарадея, можно показать, что для выполнения условия ортогональности полей необходимо обеспечить совпадение по фазе тока статора и ЭДС статора, которая наводится полем ротора и отстает по фазе от индукции ротора на $\pi/2$. Полезную мощность электродвигателя можно выразить следующим образом:

$$P_2 = E_0 I \cos(\psi), \quad (2)$$

где E_0 – изображающий вектор ЭДС, создаваемой вращающимся потоком возбуждения Φ_0 , I – вектор тока якорной обмотки, ψ – угол между этими векторами. В коллекторных двигателях постоянного тока условие сонаправленности векторов тока и ЭДС якоря обеспечивается благодаря работе щеточно-коллекторного узла. В двигателях переменного тока: синхронных и асинхронных, формирование тока фаз происходит за счет коммутации силовых ключей транзисторного преобразователя и обеспечивается алгоритмом, который реализует система управления регулятора. Отдельно необходимо отметить тот факт, что и для синхронных и для асинхронных двигателей в установившемся режиме работы частота вращения поля ротора всегда равна частоте вращения поля статора. Ведь только в этом случае можно говорить о поддержании какого-либо постоянного угла между векторами индукции ротора и статора.

Поддержание ортогональности полей ротора и статора (совпадение по фазе тока и ЭДС статора) – первое условие оптимального управления электродвигателем. Вторым условием является соответствие формы тока фазы форме ЭДС. Однако для его выполнения требуется с большой точностью измерять или вычислять мгновенное значение ЭДС каждой из фаз, что является весьма непростой технической задачей.

Векторное управление, если отбросить всю математику с преобразованиями систем координат и векторным анализом, по своей физической сути предназначено для решения задачи управления углом между векторами индукции ротора и статора во всем диапазоне частот вращения и во всех режимах работы. По-другому можно сказать, что при векторном управлении регулируется фазовый угол между током и ЭДС. В этой связи, по мнению авторов правильнее говорить не о векторном, а о фазовом управлении. С учетом того, что в системах векторного управления также реализуется регулирование амплитуды фазных токов и их частоты (то есть момента двигателя и его частоты вращения), векторное управление электродвигателями можно назвать одной из разновидностей амплитудно-частотно-фазового управления. Хоть это немного громоздко, зато хорошо отражает физическую суть процессов в системе: с помощью импульсного транзисторного преобразователя (инвертора) регулируется амплитуда, фаза (по отношению к ЭДС) и частота синусоидальных токов в обмотке статора электродвигателя.

Предлагаемый метод

Основной идеей при разработке предлагаемого метода бездатчикового управления и регулятора, основанного на этом методе, является то, что фазовый угол между векторами напряжения и ЭДС фазы в реальном двигателе принимает небольшие значения. Обычно он не превышает 20° . В связи с этим, можно судить о положении вектора ЭДС фазы по положению вектора фазного напряжения с достаточной с практической точки зрения точностью.

Кроме фазового сдвига между током и ЭДС фазы на эффективность использования электродвигателя влияет форма токов фаз. В качестве оптимальной формы тока была принята синусоидальная. При такой форме токов в многофазной системе создается круговое вращающееся

магнитное поле. Разрабатываемый регулятор предназначен для управления трехфазными синхронными электродвигателями, с обмоткой якоря, соединенной по схеме «звезда» без вывода нейтрального провода. С точки зрения управления токами фаз, такая система является многомерной связанной, что усложняет задачу [16]. Однако известно, что в таких системах можно сформировать три синуса тока, если все три фазы электрически симметричны. Для этого нужно обеспечить питание электродвигателя трехфазным напряжением, имеющим синусоидальную форму или модулированным по закону синуса. Таким образом, возникает три задачи для реализации предлагаемого метода амплитудно-частотно-фазового управления:

1. Формировать в фазах электродвигателя три синусоидальных тока, сдвинутых на 120° .
2. Фазовый сдвиг между напряжением и током фазы устремить к нулю.
3. Обеспечить пуск электродвигателя при любой нагрузке в диапазоне от нуля до максимума, ограничивая при этом токи фаз.

Необходимо отметить, что при формировании трехфазного синусоидального тока на симметричной нагрузке типа «звезда» или «треугольник» автоматически будут получены синусоидальные фазные напряжения. Такие напряжения необходимы, чтобы реализовать многопульсный выпрямитель для малоинерционного вычисления их амплитуды.

На рис. 1 изображена структурная схема регулятора с амплитудно-частотно-фазовым управлением, предлагаемая авторами. Аббревиатурами на нем обозначены следующие блоки: УСП – усилитель сигнала рассогласования; ОУС – ограничитель уровня сигнала; ГУН – генератор, управляемый напряжением; ФИУ – формирователь импульсов управления; ТИУМ – транзисторный импульсный усилитель мощности; ФД – фазовый детектор; ФНЧ – фильтр низких частот; ПН – перемножитель напряжений. На вход схемы подается сигнал, соответствующий амплитуде заданного фазного напряжения УЗАД. Из него вычитается сигнал измеренной амплитуды первой гармоники фазного напряжения УИЗМ. Полученный сигнал ошибки усиливается и ограничивается по уровню. Это необходимо для предотвращения аварийных ситуаций при значительной разнице заданного и измеренного значений, например при пуске. В предлагаемом варианте полученное значение может быть только в диапазоне от 0 до 1. Оно подается на соответствующий вход каждого из трех перемножителей напряжений ПН1-ПН3. На второй вход каждого из умножителей подается выход с соответствующей фазой от блока ГУН. В схеме используется трехфазный ГУН с фиксированной амплитудой напряжения выходных синусов в 1В. Таким образом, на выходе умножителей вырабатывается трехфазная система синусоидальных сигналов с амплитудой от 0 до 1В.

Предлагаемая схема обеспечивает подчиненное регулирование по току за счет введения местных ООС. Выход каждого из умножителей, скорректированный с учетом величины фазного тока подается на блок формирователя импульсов управления силовыми транзисторными ключами усилителя мощности. ФИУ может быть построен на различных принципах импульсной модуляции либо с использованием релейных алгоритмов. Для выделения первой гармоники фазного напряжения, формируемого импульсными методами, применяется фильтр низких частот с частотой среза, которая определяется частотой коммутации ключей ТИУМ.

Этот фильтр вносит фазовый сдвиг в сигнал напряжения. Для работы контура коррекции фазы между током и напряжением необходимо ввести в сигналы токов такой же фазовый сдвиг. Для этого они подаются на аналогичный по параметрам ФНЧ.

Главная петля обратной связи в схеме обеспечивает формирование фазных напряжений с заданной амплитудой. Для ее работы необходим блок вычисления этого параметра. Вычислитель амплитуды фазных напряжений может быть реализован с помощью метода многопульсного выпрямления. Из трехфазной системы сигналов достаточно просто можно получить 12-фазную. С помощью прецизионного выпрямителя данная система преобразуется в постоянное напряжение с малой амплитудой пульсаций.

системе происходит автоматически с оптимальной скоростью и по оптимальному закону за счет работы контура коррекции фазового угла между токами и напряжениями фаз и главной обратной связи по напряжению фаз.

Результаты моделирования

Компьютерное моделирование процессов в регуляторе производилось в среде OrCad с достаточно подробной проработкой схемотехнических решений для каждого блока. В связи со сложностью полной модели регулятора ее исследование в среде OrCad представляется невозможным из-за возникновения проблем со сходимостью решения системы дифференциальных уравнений. Если говорить о результатах моделирования отдельных блоков и их комплексов, то наибольший интерес на наш взгляд представляет фазовый детектор. На рис. 2 приведена модель системы автоподстройки фазы двух сигналов, имеющих одинаковую частоту. Именно с такими сигналами мы имеем дело, если говорим об электродвигателе. Фазные токи, напряжения, ЭДС имеют всегда одну и ту же частоту. Это существенно упрощает задачу корректировки фазового сдвига между током и напряжением.

Рассмотрим архитектуру модели. Выход сумматора 1 имитирует выход фазового детектора. Сам фазовый детектор собран на элементах HS4, HS3, U23A, U24A, U22A, U25A, U18A, R48, R49, R52, R53, R55. Особенностью данной схемы является наличие на ее входах компараторов напряжения с гистерезисом. Это необходимо для того, чтобы детектор не реагировал на остаточные пульсации сигнала с датчика напряжения фазы (резисторы R47, R56), прошедшего через ФНЧ, собранный на элементах R37, C7. Ширина гистерезиса компараторов настраивается заведомо больше, чем размах пульсаций.

Фаза электродвигателя представлена элементами L1 и R36. Транзисторная стойка, с помощью которой на фазу может быть подано двуполярное напряжение $\pm 270\text{В}$, имитируется с помощью элемента 9 (усилитель с ограничением выходного сигнала). Элемент F1 (источник тока, управ-

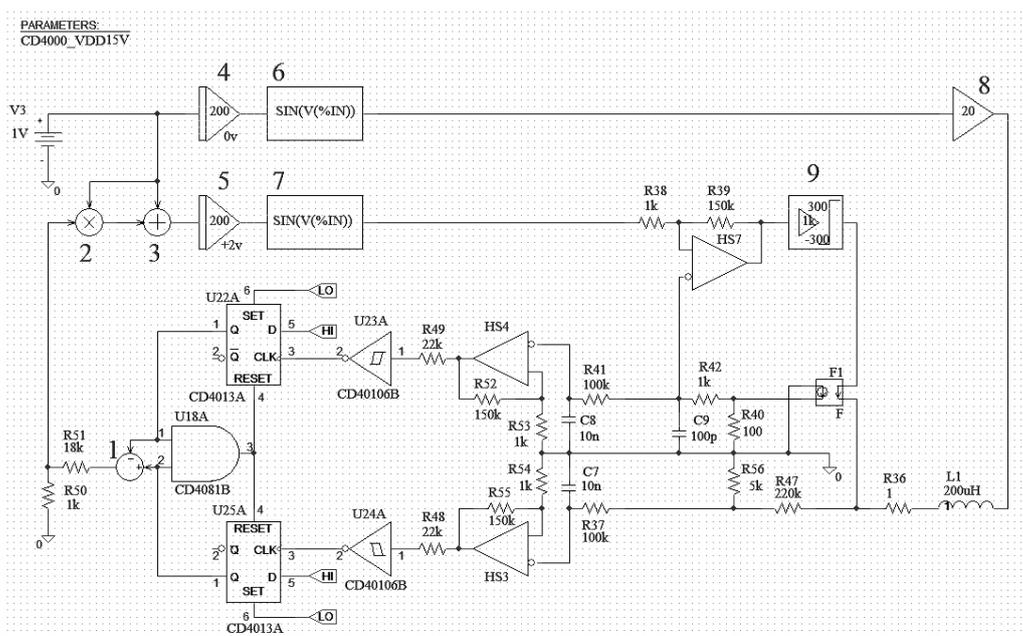


Рис. 2. Модель для демонстрации работы блока фазового детектора в OrCad

Fig. 2. Demonstration model of the phase detector unit in OrCad

ляемый ток) – датчик тока фазы, сигнал с которого преобразуется в напряжение с помощью резистора R40. ФНЧ, собранный на элементах R42, С9 предназначен для фильтрации ВЧ составляющих спектра напряжения на резисторе R40. Полученный сигнал подается на вход триггера Шмитта (HS7, R38, R39), который предназначен для реализации релейного алгоритма формирования тока фазы. Опорное напряжение триггера Шмитта (релейного элемента) формируется при воздействии синусоидального сигнала, получаемого с помощью функционального блока 7, который совместно с интегратором 5 имитирует ГУН. Блоки 4, 6 и 8 имитируют фазную ЭДС. Начальные условия интеграторов задают начальную разность фаз между фазной ЭДС и фазным током.

На рис. 3 на верхнем графике показаны сигналы, имитирующие напряжение и ток фазы. Видно, что начальный фазовый сдвиг за несколько периодов сводится к нулю. На нижнем графике показан сигнал на выходе фазового детектора (выход сумматора 1). Отрицательный импульс вырабатывается, когда напряжение на инверсном входе HS4 становится положительным и заканчивается, когда напряжение на инверсном входе HS3 становится также положительным. В противоположном случае будет вырабатываться положительный импульс. Эти импульсы, скорректированные по амплитуде с помощью делителя R50, R51, подаются на перемножитель 2 и сумматор 3. Полученный на выходе сумматора сигнал воздействует на интегратор 5. В результате происходит автоподстройка фазы. Из результатов моделирования видно, что фазовый сдвиг между ЭДС и напряжением фазы не превышает 10° .

На рис. 4 представлены результаты моделирования пуска двигателя под нагрузкой.

Результаты компьютерного моделирования позволяют судить о принципиальной возможности реализации на практике предложенной структуры бездатчикового регулятора синхронного двигателя с постоянными магнитами на роторе, а также схемотехнических решений для его блоков.

Предложенный авторами метод управления токами фаз синхронного электродвигателя по сравнению с векторным методом и методом прямого управления моментом обладает следующими преимуществами:

- для работы регулятора и электропривода в целом в близком к оптимальному режиме не требуется знание параметров двигателя (математической модели) и датчики положения ротора;

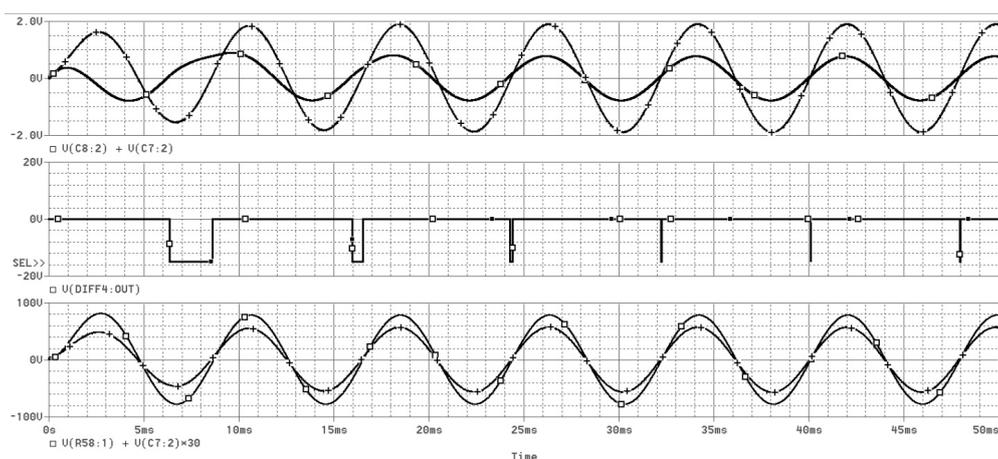


Рис. 3. Сигналы тока и напряжение фазы (верхний график); сигнал на выходе фазового детектора (средний график); ЭДС и напряжение фазы (нижний график)

Fig. 3. Phase current and voltage signals (top graph); signal at the output of the phase detector (middle graph); EMF and phase voltage (bottom graph).

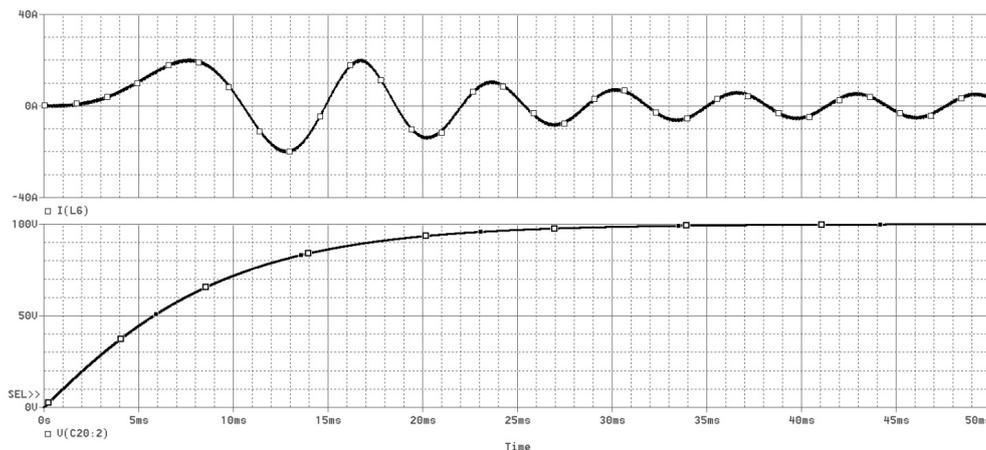


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования процессов пуска электродвигателя с предлагаемым регулятором. Ток фазы электродвигателя (верхний график); амплитуда напряжения фазы электродвигателя, пропорциональная частоте вращения (нижний график)

Fig. 4. Results of computer simulation of the processes of starting an electric motor with the proposed controller. Motor phase current (upper graph); the amplitude of the voltage of the phase of the electric motor, proportional to the rotational speed (bottom graph)

- гарантированный пуск двигателя при любом моменте нагрузки меньше максимального без знания начального положения ротора и момента нагрузки;
- малое время синхронизации фазы тока и напряжения – отличная динамика;
- относительная простота структуры и технической реализации;
- возможность достаточно простой реализации регулятора без использования программно-управляемых устройств.

Также к достоинствам предложенной структуры регулятора можно отнести следующее:

- близкий к оптимальному режим работы электродвигателя с точки зрения преобразования энергии вследствие малого фазового сдвига между фазной ЭДС и фазным током;
- круговое вращающееся поле в любом установившемся режиме и, как следствие, отсутствие пульсаций электромагнитного момента;
- автоматическое ограничение тока на заданном уровне не требует отдельного узла токовой защиты.

Энергоэффективные электроприводы с хорошими динамическими свойствами все более востребованы в современной технике, особенно в транспортных системах. Описанный в статье подход позволяет создавать такие электроприводы на базе синхронных электродвигателей с постоянными магнитами.

Заключение

Предложена структура регулятора синхронного электродвигателя с постоянными магнитами, с помощью которой можно получить близкий к оптимальному режим работы электродвигателя во всем диапазоне нагрузок и частот вращения от нуля до номинального значения. Это обеспечивается за счет формирования синусоидальных токов фаз, фазовый сдвиг которых относительно ЭДС этих фаз достаточно мал. При этом в процессе работы регулятор не использует математическую модель электродвигателя, а также датчики положения ротора. Регулятор обеспечивает гарантированный пуск во всем диапазоне нагрузок, не используя при этом информацию о начальном положении ротора и моменте нагрузки. Все это позволяет применять предложенный принцип построения регулятора и разработанную структуру для построения бездатчиковых электроприводов различного назначения, в том числе в промышленности и транспортных системах.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России, номер темы FSFF-2020-0015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Ion Boldea, Syed A. Nasar.** Vector Control of AC Drives. CRC Press, 1992. 256 p.
- [2] **Novotny D.W., Lipo T.A.** Vector Control and Dynamics of AC Drives. Clarendon Press, 1996. 440 p.
- [3] **Калачев Ю.Н.** Векторное регулирование (заметки практика). Издательство компании ЭФО, 2013. 72 с.
- [4] **Zambada J., Deb D.** Sensorless Field Oriented Control of a PMSM. Режим доступа: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/01078b.pdf> (дата обращения 27.11.2020).
- [5] **Ramamoorthy R.T., Larimore B., Bhardwaj M.** Sensored Field Oriented Control of 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Motors Using TMS320F2837x, no. February, 2016. Режим доступа: www.ti.com/lit/an/sprabz0/sprabz0.pdf (дата обращения 27.11.2020).
- [6] **Gonçalves P.F.C., Cruz S.M.A., Mendes A.M.S.** "Sensitivity to Parameter Mismatch in a Bi-Subspace Predictive Current Control Strategy for Six-Phase PMSM Drives," IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore, Singapore, 2020, pp. 4875–4880, DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9254871
- [7] **Kumar C.D., Shiva B.S., Verma V.** "Vector Control of PMSM Drive with Single Current Sensor," 2020 IEEE Students Conference on Engineering & Systems (SCES), Prayagraj, India, 2020, pp. 1–6, DOI: 10.1109/SCES50439.2020.9236774
- [8] **Zhu Y., Gu W., Lu K., Wu Z.** "Vector Control of Asymmetric Dual Three-Phase PMSM in Full Modulation Range," in IEEE Access, vol. 8, pp. 104479–104493, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2999647
- [9] **Usman A., Rajpurohit B.S.** "Design and control of a BLDC motor drive using hybrid modeling technique and FPGA based hysteresis current controller," PIICON 2020 – 9th IEEE Power India Int. Conf., pp. 1–5, 2020, DOI: 10.1109/PIICON49524.2020.9112895
- [10] **Bejenar C., Irimia N.D., Luchian M., Lazar F. I.** "Dynamic Behavior Analysis of a Three-Phase BLDC Motor under Scalar Control Strategy for Automotive Actuation Systems," 2020 15th Int. Conf. Dev. Appl. Syst. DAS 2020 – Proc., pp. 7–15, 2020, DOI: 10.1109/DAS49615.2020.9108937
- [11] **Mosaddegh Hesar H., Abootorabi Zarchi H., Arab Markadeh G.** "Online MTPTA and MTPIA Control of Brushless Doubly Fed Induction Motor Drives," IEEE Trans. Power Electron., vol. 8993, no. c, pp. 1–1, 2020, DOI: 10.1109/tpel.2020.3000150
- [12] **Seggewiße C., Dost P., Sourkounis C.** "Direct Torque Control with an underlying predictive controller in the rotating reference frame (DTCr)," IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore, Singapore, 2020, pp. 173–179, DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9254217
- [13] **Singh P., Gaur P., Mittal A.P.** "Improved Direct Torque Control Scheme based on Modified Torque Hysteresis Band," 2020 IEEE 5th International Conference on Computing Communication and Automation (ICCCA), Greater Noida, India, 2020, pp. 725–729, DOI: 10.1109/ICCCA49541.2020.9250910
- [14] **Penne M., Qiao W., Qu L., Qu L., Wang J., Li S.** "Model Predictive Saturation Controller-Based Direct Torque Control of Permanent-Magnet Synchronous Machines," 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 2020, pp. 2682–2688, DOI: 10.1109/ECCE44975.2020.9236245
- [15] **Vas P.** Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford University Press, 1998. 729 p.
- [16] **Юревич Е.И.** Теория автоматического управления. Энергия, Ленинград, 1975. 416 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ШИШОВ Дмитрий Михайлович – доцент, Московский авиационный институт, канд. техн. наук.

E-mail: tixi-2@mail.ru

ШЕВЦОВ Даниил Андреевич – профессор, Московский авиационный институт, д-р техн. наук.

E-mail: tixi-2@mail.ru

СУХОВ Дмитрий Викторович – старший преподаватель, Московский авиационный институт, без степени.

E-mail: 9894235@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 27.11.2020

REFERENCES

- [1] **Ion Boldea, A. Syed, Nasar.** Vector Control of AC Drives. CRC Press, 1992. 256 p.
- [2] **D.W. Novotny, T.A. Lipo,** Vector Control and Dynamics of AC Drives. Clarendon Press, 1996. 440 p.
- [3] **Yu.N. Kalachev,** Vektornoye regulirovaniye (zametki praktika) [Vector control (practice notes)]. Izdatelstvo kompanii EFO, 2013. 72 s.
- [4] **J. Zambada, D. Deb,** Sensorless Field Oriented Control of a PMSM. Rezhim dostupa: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/01078b.pdf> (data obrashcheniya 27.11.2020).
- [5] **R.T. Ramamoorthy, B. Larimore, M. Bhardwaj,** Sensored Field Oriented Control of 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Motors Using TMS320F2837x, no. February, 2016. Rezhim dostupa: www.ti.com/lit/an/sprabz0/sprabz0.pdf (data obrashcheniya 27.11.2020).
- [6] **P.F.C. Gonçalves, S.M.A. Cruz, A.M.S. Mendes,** "Sensitivity to Parameter Mismatch in a Bi-Subspace Predictive Current Control Strategy for Six-Phase PMSM Drives," IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore, Singapore, 2020, pp. 4875–4880, DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9254871
- [7] **C.D. Kumar, B.S. Shiva, V. Verma,** "Vector Control of PMSM Drive with Single Current Sensor," 2020 IEEE Students Conference on Engineering & Systems (SCES), Prayagraj, India, 2020, pp. 1–6, DOI: 10.1109/SCES50439.2020.9236774
- [8] **Y. Zhu, W. Gu, K. Lu, Z. Wu,** "Vector Control of Asymmetric Dual Three-Phase PMSM in Full Modulation Range," in IEEE Access, vol. 8, pp. 104479–104493, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2999647
- [9] **A. Usman, B.S. Rajpurohit,** "Design and control of a BLDC motor drive using hybrid modeling technique and FPGA based hysteresis current controller," PIICON 2020 – 9th IEEE Power India Int. Conf., pp. 1–5, 2020, DOI: 10.1109/PIICON49524.2020.9112895
- [10] **C. Bejenar, N.D. Irimia, M. Luchian, F.I. Lazar,** "Dynamic Behavior Analysis of a Three-Phase BLDC Motor under Scalar Control Strategy for Automotive Actuation Systems," 2020 15th Int. Conf. Dev. Appl. Syst. DAS 2020 – Proc., pp. 7–15, 2020, DOI: 10.1109/DAS49615.2020.9108937
- [11] **H. Mosaddegh Hesar, H. Abootorabi Zarchi, G. Arab Markadeh,** "Online MTPTA and MTPIA Control of Brushless Doubly Fed Induction Motor Drives," IEEE Trans. Power Electron., vol. 8993, no. c, pp. 1–1, 2020, DOI: 10.1109/tpel.2020.3000150
- [12] **C. Seggewiße, P. Dost, C. Sourkounis,** "Direct Torque Control with an underlying predictive controller in the rotating reference frame (DTCr)," IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore, Singapore, 2020, pp. 173–179, DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9254217

[13] **P. Singh, P. Gaur, A.P. Mittal**, "Improved Direct Torque Control Scheme based on Modified Torque Hysteresis Band," 2020 IEEE 5th International Conference on Computing Communication and Automation (ICCCA), Greater Noida, India, 2020, pp. 725–729, DOI: 10.1109/ICCCA49541.2020.9250910

[14] **M. Penne, W. Qiao, L. Qu, L. Qu, J. Wang, S. Li**, "Model Predictive Saturation Controller-Based Direct Torque Control of Permanent-Magnet Synchronous Machines," 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 2020, pp. 2682–2688, DOI: 10.1109/ECCE44975.2020.9236245

[15] **P. Vas**, Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford University Press, 1998. 729 p.

[16] **Ye.I. Yurevich**, Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Automatic control theory]. Energiya, Leningrad, 1975. 416 c.

THE AUTHORS

SHISHOV Dmitriy M. – *Moscow Aviation Institute.*
E-mail: tixi-2@mail.ru

SHEVTSOV Daniil A. – *Moscow Aviation Institute.*
E-mail: tixi-2@mail.ru

SUKHOV Dmitriy V. – *Moscow Aviation Institute.*
E-mail: 9894235@gmail.com

Received: 27.11.2020

DOI: 10.18721/JEST.26410
УДК 621.355.9 547.311 546.722/3

*И.А. Тюрикова, А.И. Демидов,
П.А. Новиков, К.С. Тюриков*

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

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНОГО ОКСИДА ЖЕЛЕЗА В КАЧЕСТВЕ ДОБАВКИ К АНОДУ ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА

Рассмотрено применение наноразмерного магнетита в качестве добавки к углеродной матрице анода литий-ионного аккумулятора. Показано, что применение в составе анодного материала Carbon Black наноразмерного оксида железа Fe_3O_4 10–15 нм в качестве добавки позволяет повысить емкость почти в 3 раза с примерно $250 \text{ mA}\cdot\text{ч}\cdot\text{г}^{-1}$ до $780 \text{ mA}\cdot\text{ч}\cdot\text{г}^{-1}$. На основании полученных результатов предложена схема последовательности процессов интеркаляции – деинтеркаляции ионов лития в углеродный каркас, содержащий молекулы оксида железа. Полученные результаты, подтвержденные расчетами и экспериментальными исследованиями, носят фундаментальный характер для понимания природы процессов, влияющих на повышение эксплуатационных характеристик аккумуляторов, а также прикладной характер для получения перспективных материалов анодов литий-ионных аккумуляторов с повышенной электрической емкостью.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, оксиды железа, наночастицы Fe_3O_4 , аноды, емкость батареи.

Ссылка при цитировании:

Тюрикова И.А., Демидов А.И., Новиков П.А., Тюриков К.С. Применение наноразмерного оксида железа в качестве добавки к аноду литий-ионного аккумулятора // Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26, № 4. С. 123–131. DOI: 10.18721/JEST.26410

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

*I.A. Tyurikova, A.I. Demidov,
P.A. Novikov, K.S. Tyurikov*

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

NANOSIZED IRON OXIDE APPLICATION AS AN ADDITIVE TO A LITHIUM-ION BATTERY ANODE

The paper considers application of nanosized magnetite as an additive to the carbon matrix of a lithium-ion battery anode. We show that the use of 10–15 nm nanosized iron oxide Fe_3O_4 as an additive in the composition of the anode material Carbon Black makes it possible to increase the capacity by almost 3 times: from approximately $250 \text{ mA}\cdot\text{h}\cdot\text{g}^{-1}$ to $780 \text{ mA}\cdot\text{h}\cdot\text{g}^{-1}$. Based on the results obtained, we propose a diagram of the sequence of intercalation–deintercalation processes of lithium ions into a carbon framework containing iron oxide molecules. The results obtained, confirmed by calculations and experimental studies, are fundamental for understanding the nature of the processes that affect the increase in the performance of batteries, as well as their applied nature for obtaining promising anode materials for lithium-ion batteries with increased electrical capacity.

Keywords: lithium-ion battery, iron oxides, Fe_3O_4 nanoparticles, anodes, battery capacity.

Citation:

I.A. Tyurikova, A.I. Demidov, P.A. Novikov, K.S. Tyurikov, Nanosized iron oxide application as an additive to a lithium-ion battery anode, *Materials Science. Power Engineering*, 26 (04) (2020) 123–131, DOI: 10.18721/JEST.26410

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

Введение. В последние годы повышенный интерес исследователей привлекают направления возможного повышения емкости литий-ионных аккумуляторов для эффективного применения их в портативных электронных устройствах. Электроды с более высокой емкостью заряда могут существенно улучшить эксплуатационные характеристики литий-ионных батарей, сделать их компактнее и дешевле, однако это возможно только при условии, что сам материал не слишком дорогой или редкий.

Графит, как наиболее часто используемый материал для анодов литий-ионных аккумуляторов, позволяет обеспечить стабильную работу анода, но его применение существенно ограничено из-за низкой теоретической емкости ($372 \text{ мА}\cdot\text{ч}\cdot\text{г}^{-1}$) [1]. На сегодняшний день, традиционные анодные материалы на углеродной основе полностью изучены и требуют развития нового подхода при разработке анодных систем, в связи с чем перед современными исследователями стоит задача поиска и создания более совершенных электродных материалов для литий-ионных аккумуляторов. Многообещающим подходом к получению высокоэффективных электродных материалов является их модифицирование различными добавками. В последнее время оксиды переходных металлов получили огромный исследовательский интерес в качестве перспективных анодных материалов для литий-ионных батарей из-за их высокой емкости [2]. Среди них магнетит (Fe_3O_4) особенно привлекателен по причине как высокой емкости, так и экологичности, распространенности, дешевизны и высокой электронной проводимости [3]. В [4] описано применение Fe_3O_4 в количествах, соизмеримых с углеродом, другими авторами рассматриваются незначительные добавки оксида железа [5]. Авторы [6, 7] считают важным и основополагающим моментом при изготовлении анодов литий-ионных аккумуляторов нового поколения с применением оксида железа использование наноразмерных частиц с высокой площадью поверхности.

Понимание процессов, влияющих на повышение емкости аккумуляторов за счет использования примесей способно влиять как на успешный результат поиска и создания новых композиций материалов анодов литий-ионных батарей, так и на улучшение их эксплуатационных характеристик в целом.

В связи с этим целью настоящей работы являлось решение прикладной задачи, заключающейся в получении перспективного анодного материала на основе углеродной матрицы Carbon Black с добавками оксида железа и установлении общих закономерностей процессов, определяющих повышение емкости аккумуляторов, изготовленных с применением композиционного материала на основе оксида железа и углерода.

Экспериментальная часть

Приготовление материала с наночастицами оксида железа, распределенными в углеродной матрице, проводили в несколько этапов. Магнитные наночастицы получали в соответствии со способом, описанным в [8], парциальным окислением ионов двухвалентного железа в водном растворе двойной серноокислой соли железа и аммония $\text{FeSO}_4\cdot(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (соль Мора) с последующим осаждением высокодисперсных частиц магнетита водным раствором аммиака, многократным промыванием и последующим отделением магнитных наночастиц от воды и сушкой при температуре 160°C . Далее полученный материал был смешан с углеродом Carbon Black (Tinci,

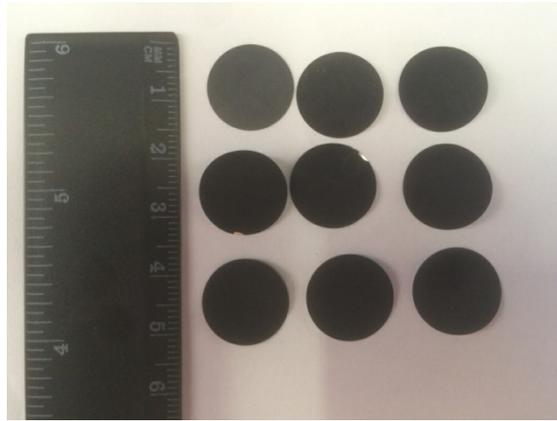


Рис. 1. Заготовки для анодов литий-ионных аккумуляторов
Fig. 1. Blanks for anodes of lithium-ion batteries

КНР) в соотношении 1:9 по массе при добавлении 10% раствора поливинилиденфторида (PVDF, Tinci, КНР) в N-метилпирролидоне в соотношении 9:1 по массе. В результате монодисперсные наночастицы оксида железа равномерно распределялись в углеродной матрице. Полученную клеевидную суспензию (анодную массу) наносили на медную подложку, после чего проводили сушку и прокатку на вальцах. Для полного испарения растворителя из матрицы образцы помещали в сушильный шкаф и проводили термообработку при температуре 80 °С в течение 12 часов, после чего вырезали заготовки по форме электрода для литий-ионных батарей диаметром 15 мм (рис. 1). Сборку осуществляли в атмосфере сухого аргона. Электрохимические исследования проводили в герметичной двухэлектродной ячейке дисковой конструкции габарита CR2032. В качестве электрода сравнения двухэлектродной ячейки использовали металлический литий. Испытания проводили на зарядно-разрядном стенде СТ3008W-5V10mA (Neware) в гальваностатическом режиме при токе 0,16 мА и изменении напряжения от 0,05 до 3 В при комнатной температуре. Плотность тока составляла 0,09 мА·с⁻². Изучение морфологии образцов произведено с использованием растровой электронной микроскопии (Supra 55VP). Рентгенофазовый анализ (РФА) осуществлен с помощью рентгеновского дифрактометра Bruker D8 Advance.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2 изображены фотографии наночастиц Fe₃O₄, порошка Carbon Black и исследуемого материала, приготовленного на их основе, выполненные с помощью РЭМ. Примерный размер частиц углеродной матрицы составляет 20 нм, наночастиц оксида железа – находится в интер-

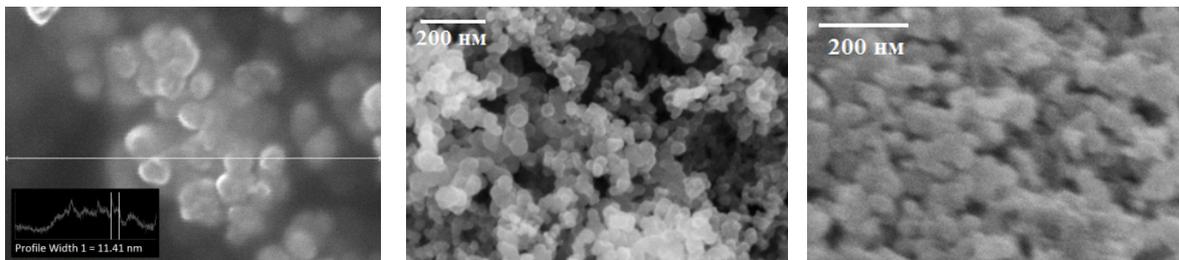


Рис. 2. РЭМ-изображения наночастиц оксида железа, Carbon Black и материала на их основе (слева-направо)
Fig. 2. SEM images of iron oxide nanoparticles, Carbon Black and material based on them (from left to right)

вале 10-15 нм. Испытуемый материал представляет собой смесь сферических наночастиц оксида железа одного размерного порядка с углеродной основой.

На рис. 3 представлены дифрактограммы наноразмерного оксида железа до и после температурной обработки с постепенным повышением температуры от комнатной до 160 °С. Данный температурный режим выбран с целью выведения паров воды из пор, формируемых сферическими частицами [9]. В результате термообработки на поверхности наночастиц Fe_3O_4 образуется слой, отвечающий составу Fe_2O_3 .

В процессе циклирования испытуемых электродов время разряда на протяжении первых циклов постепенно снижается (рис. 4). Как видно по рис. 5, после существенного уменьшения удельной емкости в течение первых циклов (примерно на 30-35% от второго к пятому и последующим циклам), наблюдается выравнивание данного параметра до почти постоянного значения. Предположительно, такой характер представленных зависимостей связан с последовательностью процессов интеркаляции и деинтеркаляции примесного компонента и лития в углеродную матрицу.

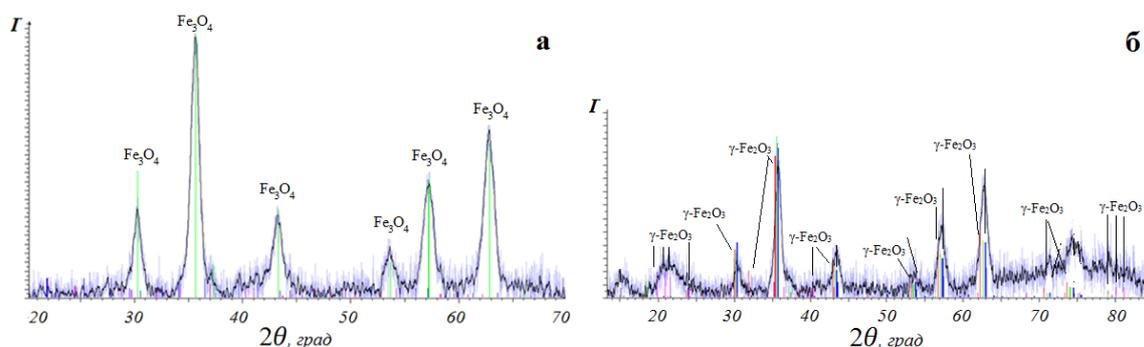


Рис. 3. Дифрактограмма наночастиц оксида железа до (а) и после (б) термообработки
 Fig. 3. The XRD pattern of the iron oxide nanoparticles before (a) and after (b) heat treatment

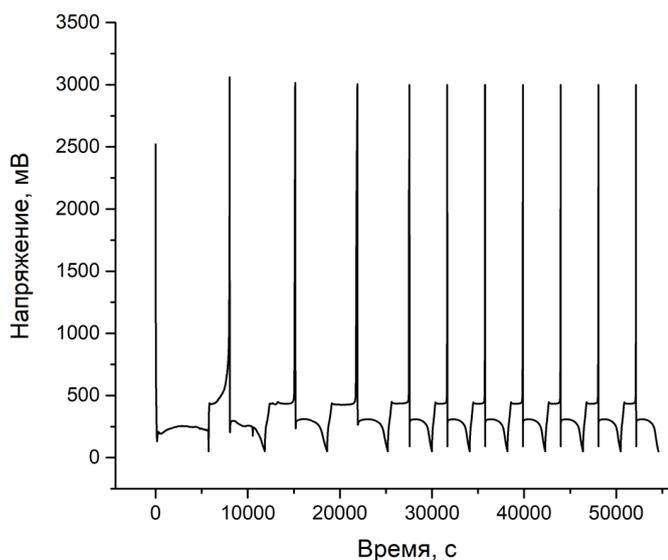


Рис. 4. Зависимость напряжения от времени для первых 10 циклов
 Fig. 4. Time – voltage dependence for the first 10 cycles

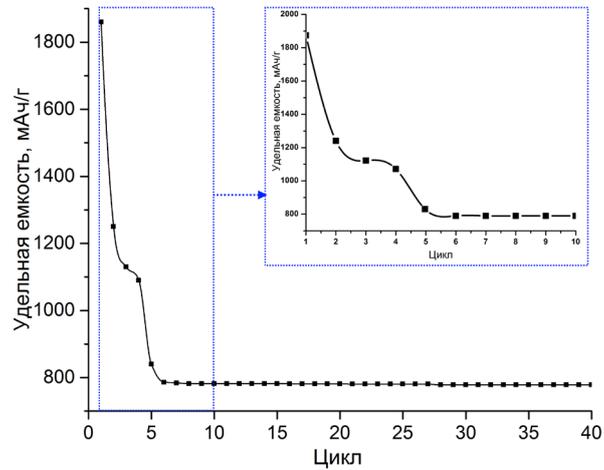
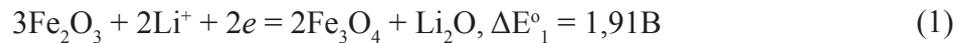


Рис. 5. Зависимость удельной емкости от порядкового номера цикла

Fig. 5. The serial number of the cycle – specific capacity dependence

Процесс заряда отрицательного электрода с участием оксидов железа может быть представлен как двухстадийный:



Во время первого цикла заряда возможно присутствие в углеродной матрице как частиц Fe, так и Fe₃O₄, которые в процессе следующих циклов могут участвовать в образовании частиц Fe. Значения стандартной величины ЭДС реакций (1) и (2) были рассчитаны по величинам стандартной энергии Гиббса^{1,2} соответствующих реакций.

При первом заряде происходит формирование отрицательного электрода – ионы лития внедряются (интеркалируют) в углеродную матрицу. Поскольку основой исследуемого материала является аморфный Carbon Black, то процесс заряда может быть записан в следующем виде:



Предельный состав интеркалята Li_xC_y определяется особенностями углеродного материала: каждый внедренный атом лития занимает место внутри углеродного каркаса. Различной степени интеркаляции x отвечает несколько соединений: LiC₆, LiC₁₂, LiC₁₈ и др. Соединение LiC₆ обладает отрицательным электродным потенциалом, который на 0,2 В положительнее потенциала металлического лития в том же электролите [10, 11].

При использовании Fe₂O₃, как и в случае с Fe₃O₄, в результате конверсионной реакции (2) образуются диспергированные в матрице из оксида лития частицы железа, при этом, исходя из значений ЭДС, сначала идут реакции (1) и (2) и только затем (3). В результате протекания конверсионных реакций (1) и (2) и реакции внедрения возможно образование сложных систем в объеме анода, содержащих углеродный каркас, внутри которого распределены атомы железа и лития

¹ Термодинамические константы веществ. Справочник в 10 вып. Вып. 10. Ч.1. Под ред. В. П. Глушко (отв. ред.). – М.: ВИНТИ, 1981. – 297 с.

² Краткий справочник физико-химических величин. Изд. 8-е, перераб./ Под ред. А.А. Равделя и А. М. Пономаревой. – Л.: Химия, 1983. – 232 с.

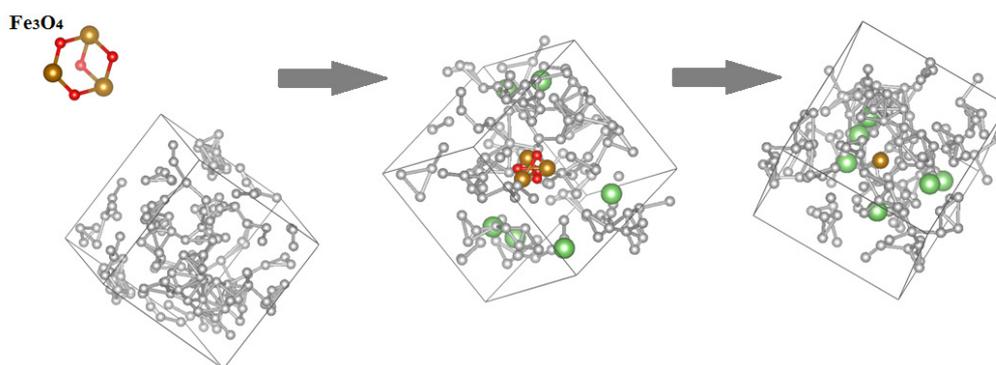


Рис. 6. Схема внедрения лития в углеродную матрицу, содержащую оксид железа
 Fig. 6. Scheme of lithium intercalation into a carbon matrix containing iron oxide

(рис. 6). Таким образом, в результате первых зарядно-разрядных циклов происходит восстановление оксида железа до железа в матрице оксида лития с последующей интеркаляцией лития вглубь каркаса. При этом находящийся в углеродном каркасе оксид железа "раздвигает" углерод в своем окружении, и в следующих циклах ионы лития активно проникают в это пространство и взаимодействуют с оксидом железа в соответствии с уравнениями (1) и (2).

Электрохимическая интеркаляция лития в углеродную матрицу включает в себя множество процессов, таких как диффузия ионов лития в растворе электролита, разряд ионов лития с одновременным взаимодействием с материалом электрода (углеродом) и диффузия внутри углеродного электрода [10, 11]. Поскольку подвижность электронов намного выше, чем у ионов лития, миграция вторых посредством электрического поля внутри углерода незначительна, и они в течение нескольких циклов, занимая положения с наиболее благоприятным окружением, то есть в максимальной по размерам межатомной пустоте, остаются в ней, продолжая дальнейшее циклирование из этих позиций (рис. 6). Таким образом, массовый перенос ионов лития в углероде можно рассматривать как диффузионный процесс. Поскольку диффузия в твердом состоянии обычно является медленным процессом, скорость диффузии будет лимитировать общую скорости реакции и первые несколько циклов заряда-разряда будут описывать интеркаляцию лития в пустоты [12], характеризуясь нестабильным временем цикла и емкостными параметрами процесса. Далее процесс разряда и заряда становится практически постоянным по времени и емкость элемента несущественно меняется в течение времени его работы.

Отметим, что данная схема справедлива в том случае, если оксид железа выступает в качестве добавки в общем объеме углеродного анодного материала, поскольку пустоты, создаваемые изначально оксидом железа, не переполняют общий объем материала, обеспечивая ограниченные более частым расположением углеродных атомов свободные объемы, куда диффундирует литий. При существовании избыточных пустот литий будет значительно более свободно перемещаться по углеродной матрице и менее активно и непредсказуемо (что может проявляться в нестабильном времени процесса заряда-разряда) взаимодействовать с рядом расположенным оксидом железа. Предположительно, именно такой характер интеркаляции влияет на повышение емкости электрода, а решение прикладной задачи по подбору оптимального соотношения углерод-оксид железа позволит добиться максимально возможной удельной емкости для такого материала анодов литий-ионных аккумуляторов. Важно, что емкость электродов будет также зависеть от особенностей частиц оксида железа, используемых в качестве добавки, в частности их размерных характеристик [7, 13], во многом определяемых процессом синтеза.

Для разных типов Carbon Black с разной площадью поверхности, используемых в качестве анодного материала, характерны различные значения удельной емкости, повышающейся с увеличением площади поверхности от $200 \text{ mA}\cdot\text{ч}\cdot\text{г}^{-1}$ при $60 \text{ м}^2\cdot\text{г}^{-1}$ до примерно $600 \text{ mA}\cdot\text{ч}\cdot\text{г}^{-1}$ для более высокопористых [14, 15]. С применением в составе анодного материала наноразмерного оксида железа становится возможным повышение емкости до $780 \text{ mA}\cdot\text{ч}\cdot\text{г}^{-1}$, в то время как удельная емкость наиболее доступного и применяемого в качестве углеродной матрицы Carbon Black составляет примерно $250 \text{ mA}\cdot\text{ч}\cdot\text{г}^{-1}$.

Заключение

Изучение процесса электрохимической интеркаляции-деинтеркаляции лития в углеродной матрице, содержащей оксид железа, позволяет сделать вывод о перспективности применения наночастиц магнетита в качестве добавок к анодам литий-ионных аккумуляторов с целью повышения их емкости более, чем в 3 раза. В соответствии с предложенной гипотезой внедрения атомов лития дано объяснение предпочтительности применения оксида железа в качестве добавки, то есть в небольших количествах относительно углерода. Наряду с этим, емкость электродов во многом определяется размерными характеристиками частиц добавки, а значит, методикой синтеза, обеспечивающей получение монодисперсных наночастиц оксида железа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Choi S.** Lithium Intercalated Graphite with Preformed Passivation Layer as Superior Anode for Lithium Ion Batteries / S. Choi et al. // *Applied Surface Science*. – 2018. – V. 455. – P. 637–372.
- [2] **Lu Y.** Nanostructured Conversion-type Anode Materials for Advanced Lithium-Ion Batteries / Y. Lu et al. // *Chem*. – 2018. – V. 4. – № 5. – P. 972–996.
- [3] **Huang Y.** Ternary $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{FeCO}_3$ Composite as a High-Performance Anode Material for Lithium-Ion Batteries / Y. Huang et al. // *The Journal of Physical Chemistry C*. – 2019. – V. 123. – № 20. – P. 12614–12622.
- [4] **Wang Y.** One-Pot Magnetic Field Induced Formation of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$ Composite Microrods with Enhanced Lithium Storage Capability / Y. Wang et al. // *Small*. – 2014. – V. 10. – № 14. – P. 2815–2819.
- [5] **Hao S.** Hierarchical three-dimensional Fe_3O_4 @porous carbon matrix/graphene anodes for high performance lithium ion batteries / S. Hao et al. // *Electrochimica Acta*. – 2018. – V. 260. – P. 965–973.
- [6] **Li Y.** Porous $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$ @Carbon octahedron arrayed on three-dimensional graphene foam for lithium-ion battery / Y. Li et al. // *Composites Part B: Engineering*. – 2019. – V. 171. – P. 130–137.
- [7] **Yi Q.** Hollow Fe_3O_4 /carbon with surface mesopores derived from MOFs for enhanced lithium storage performance / Q. Yi et al. // *Science Bulletin*. – 2020. – V. 65. – № 3. – P. 233–242.
- [8] Пат. 2593392 Российская Федерация, МПК H01F1/28, B82B3/00. Способ получения ферромагнитной жидкости / А.И. Демидов, И.А. Полатайко; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО "СПбПУ Петра Великого". – 2015121189/07; заявл. 03.06.2015; опубл. 10.08.2016.
- [9] **Тюрикова И.А.** Влияние температуры на свойства системы Fe_3O_4 -маннит-вода / И.А. Тюрикова, А.И. Демидов // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. – 2018. – Т. 24. – № 3. – С. 193–201.
- [10] **Морачевский А.Г.** Термодинамика сплавов лития с элементами подгруппы углерода (C, Si, Ge, Sn, Pb) / А.Г. Морачевский, А.И. Демидов; под. ред. А.А. Поповича. – СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2016. – 151 с.
- [11] **Ji K.** Lithium intercalation into bilayer graphene / K. Ji et al. // *Nature Communications*. – 2019. – V. 10. – Article № 275.

[12] **Mao C.** Selecting the Best Graphite for Long-Life, High-Energy Li-Ion Batteries / C. Mao et al. // Journal of The Electrochemical Society. – V. 165. – № 9. – A1837.

[13] **Yan Z.** Pulverization Control by Confining Fe₃O₄ Nanoparticles Individually into Macropores of Hollow Carbon Spheres for High-Performance Li-ion Batteries / Z. Yan et al. // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2018. – V. 10. – №3. – P. 2581–2590.

[14] **Patel M.U.M.** Comparative Study of Polysulfide Encapsulation in the Different Carbons Performed by Analytical Tools / M.U.M. Patel, R. Dominko // Ceramic Materials for Energy Applications V: A Collection of Papers Presented at the 39th International Conference on Advanced Ceramics and Composites. – 2015. – V. 36. – № 7. – P. 85–100.

[15] **Dong P.** Chemically treated carbon black waste and its potential applications / P. Dong et al. // Journal of Hazardous Materials. – 2018. – V. 321. – P. 62–72.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТЮРИКОВА Ирина Андреевна – ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: polatayko_irina@spbstu.ru

ДЕМИДОВ Александр Иванович – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р хим. наук.

E-mail: demidov1902@gmail.com

НОВИКОВ Павел Александрович – научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: novikov.p.a@gmail.com

ТЮРИКОВ Кирилл Сергеевич – заведующий лабораторией, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: kirill.tyurikov@spbstu.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 15.10.2020

REFERENCES

[1] **S. Choi**, Lithium Intercalated Graphite with Preformed Passivation Layer as Superior Anode for Lithium Ion Batteries / S. Choi et al. // Applied Surface Science. – 2018. – V. 455. – P. 637–372.

[2] **Y. Lu**, Nanostructured Conversion-type Anode Materials for Advanced Lithium-Ion Batteries / Y. Lu et al. // Chem. – 2018. – V. 4. – № 5. – P. 972–996.

[3] **Y. Huang**, Ternary Fe₂O₃/Fe₃O₄/FeCO₃ Composite as a High-Performance Anode Material for Lithium-Ion Batteries / Y. Huang et al. // The Journal of Physical Chemistry C. – 2019. – V. 123. – № 20. – P. 12614–12622.

[4] **Y. Wang**, One-Pot Magnetic Field Induced Formation of Fe₃O₄/C Composite Microrods with Enhanced Lithium Storage Capability / Y. Wang et al. // Small. – 2014. – V. 10. – № 14. – R. 2815–2819.

[5] **S. Hao**, Hierarchical three-dimensional Fe₃O₄@porous carbon matrix/graphene anodes for high performance lithium ion batteries / S. Hao et al. // Electrochimica Acta. – 2018. – V. 260. – P. 965–973.

[6] **Y. Li**, Porous Fe₂O₃/Fe₃O₄@Carbon octahedron arrayed on three-dimensional graphene foam for lithium-ion battery / Y. Li et al. // Composites Part B: Engineering. – 2019. – V. 171. – P. 130–137.

[7] **Q. Yi**, Hollow Fe₃O₄/carbon with surface mesopores derived from MOFs for enhanced lithium storage performance / Q. Yi et al. // Science Bulletin. – 2020. – V. 65. – № 3. – P. 233–242.

[8] Pat. 2593392 RU, IPC H01F1/28, B82B3/00. Method for obtaining ferromagnetic liquid / A. I. Demidov, I. A. Polatayko; applicant and patentee FSAEI HE "Peter the Great SPbPU". – 2015121189/07; decl. 03.06.2015; publ. 10.08.2016.

[9] **I.A. Tyurikova**, Vliyaniye temperatury na svoystva sistemy Fe₃O₄-mannit-voda / I.A. Tyurikova, A.I. Demidov // Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. – 2018. – T. 24. – № 3. – S. 193–201.

[10] **A.G. Moraczewski**, Thermodynamics of lithium alloys with elements of the carbon subgroup (C, Si, Ge, Sn, Pb) / A.G. Moraczewski, A.I. Demidov; Edited by A.A. Popovich. – SPb.: Publ. Polytechnic University, 2016. – 151 p.

[11] **K. Ji**, Lithium intercalation into bilayer graphene / K. Ji et al. // Nature Communications. – 2019. – V. 10. – Article № 275.

[12] **C. Mao**, Selecting the Best Graphite for Long-Life, High-Energy Li-Ion Batteries / C. Mao et al. // Journal of The Electrochemical Society. – V. 165. – № 9. – A1837.

[13] **Z. Yan**, Pulverization Control by Confining Fe₃O₄ Nanoparticles Individually into Macropores of Hollow Carbon Spheres for High-Performance Li-ion Batteries / Z. Yan et al. // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2018. – V. 10. – № 3. – R. 2581–2590.

[14] **M.U.M. Patel**, Comparative Study of Polysulfide Encapsulation in the Different Carbons Performed by Analytical Tools / M.U.M. Patel, R. Dominko // Ceramic Materials for Energy Applications V: A Collection of Papers Presented at the 39th International Conference on Advanced Ceramics and Composites. – 2015. – V. 36. – № 7. – R. 85–100.

[15] **P. Dong**, Chemically treated carbon black waste and its potential applications / P. Dong et al. // Journal of Hazardous Materials. – 2018. – V. 321. – R. 62–72.

THE AUTHORS

TYURIKOVA Irina A. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: polatayko_irina@spbstu.ru

DEMIDOV Aleksandr I. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: demidov1902@gmail.com

NOVIKOV Pavel A. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: novikov.p.a@gmail.com

TYURIKOV Kirill S. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: kirill.tyurikov@spbstu.ru

Received: 15.10.2020

DOI: 10.18721/JEST.26411

УДК 671.622

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

Оренбургский государственный университет,
Оренбург, Россия

ПОИСКОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЛИЯНИЮ БЕЗОКСИДЛИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

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 термической обработки изделий из твердых сплавов на их эксплуатационные характеристики (твердость и износостойкость). Применение упрочняющих технологий обработки режущего инструмента для снижения нестабильности 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 термической обработки порошковых твердых сплавов существенно отличаются от режимов обработки компактных сталей. Наличие пористости интенсифицирует многие химические процессы при термообработке за счет значительной активности поверхности изделий из порошковых материалов и повышает чувствительность к окислению и обезуглероживанию во время нагрева под закалку [1–22]. Цель данной работы состояла в определении влияния влияния термообработки (изменение температур нагрева перед закалкой и отпуском) на твердость, прочность, на изгиб и износостойкость образцов твердых сплавов.

Ключевые слова: изделия из твердых сплавов, безокислительный нагрев, твердость, прочность, износ.

Ссылка при цитировании:

Козик Е.С., Богодухов С.И., Свиденко Е.В. Поисковые исследования по влиянию безокислительного нагрева на эксплуатационные свойства изделий из твердых сплавов // *Материаловедение. Энергетика.* 2020. Т. 26, № 4. С. 132–142. DOI: 10.18721/JEST.26411

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. Shvidenko

Orenburg State University,
Orenburg, Russia

EXPLORATORY RESEARCH ON THE EFFECT OF NON-OXIDATIVE HEATING ON THE PERFORMANCE PROPERTIES OF HARD ALLOY PRODUCTS

The most applicable methods for increasing the resistance of hard alloys are mechanical processing, application of wear-resistant films and coatings. Along with this, another area of interest of improving the operational properties of cutting tools is heat treatment. The common disadvantages of these methods are a slight increase in resistance and insufficient stability of the results obtained. In this regard, we conducted a series of experimental studies 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 their cutting properties remains an urgent problem. There are various methods of hardening carbide cutting tools, which are divided into three groups: mechanical processing, coating and heat treatment. At the same time, heat treatment is a simple method providing acceptable results. The heat treatment conditions for powder cemented carbides differ from the treatment conditions for compact steels. Porosity intensifies many chemical processes during heat treatment due to considerable activity of the surface of the products manufactured by using powder materials, and enhances susceptibility to oxidation and decarburization during heating for hardening [1–22]. The purpose of this paper was to determine the influence of heat treatment (heating temperature changes prior to quenching and tempering) on hardness, strength, bending and wear-resistant properties of cemented carbide samples.

Keywords: cemented carbide products, non-oxidative heating, hardness, strength, wear.

Citation:

E.S. Kozik, S.I. Bogodukhov, E.V. Shvidenko, Exploratory research on the effect of non-oxidative heating on the performance properties of hard alloy products, *Materials Science. Power Engineering*, 26 (04) (2020) 132–142, DOI: 10.18721/JEST.26411

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

Введение. Обработка заготовок резанием в технологии машиностроения занимает важное место, но применение новых конструкционных материалов с повышенными эксплуатационными свойствами зачастую сдерживается низкой стойкостью инструмента.

Все это ставит задачу повышения эксплуатационных характеристик и работоспособности металлообрабатывающего инструмента, и в первую очередь, инструмента, изготовленного с использованием твердых сплавов.

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 термической обработки изделий из твердых сплавов на их эксплуатационные характеристики (твёрдость и износостойкость).

Применение упрочняющих технологий обработки режущего инструмента для снижения нестабильности 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 термической обработки порошковых твердых сплавов существенно отличаются от режимов обработки компактных сталей. Наличие пористости интенсифицирует многие химические процессы при термообработке за счет значительной активности поверхности изделий из порошковых материалов и повышает чувствительность к окислению и обезуглероживанию во время нагрева под закалку [1–17].

Цель данной работы состояла в определении влияния термообработки (изменение температур нагрева перед закалкой и отпуском) на твердость, прочность, на изгиб и износостойкость образцов твердых сплавов.

Методы и материалы

Термическая обработка (ТО) образцов твердых сплавов включала закалку и отпуск (или без него), причем, изменяли как методы нагрева, так и закалочные среды, в качестве которых рассматривали воду и воздух, индустриальное масло, концентрированный водный раствор желтой кровяной соли и ее порошок.

Материалом для исследования послужили пятигранные пластины из твердого сплава марки ВК8, внешний вид которых представлен на рис. 1.

Химический состав и физико–механические свойства твердого сплава марки ВК8 представлены в табл. 1.

В первой серии опытов безокислительный нагрев проводили в соляной ванне. При этом рассмотрели влияние ТО (изменение температур нагрева перед закалкой и отпуском) на твердость, прочность на изгиб и износостойкость образцов твердых сплавов. Затем проводился отпуск закаленных образцов при температурах 400 – 700 °С с интервалом 100 °С.

Во второй серии опытов для обеспечения безокислительного нагрева, который способствует повышению эксплуатационной стойкости и качества нагрева изделий из твердых сплавов на основе карбида вольфрама в процессе закалки была разработана и применена индукционно-закалочная установка [17]. Установка позволила осуществлять одновременный индукционный нагрев большого количества небольших заготовок, причем, что весьма важно для заготовок из твердых сплавов, нагрев заготовок в такой установке равномерный, так как они занимают одинаковое положение по отношению к индуктору.

На третьем этапе была рассмотрена возможность термообработки с прямым контактным нагревом на машине точечной сварки (рис. 2) при этом из-за сокращения времени нагрева (7с про-

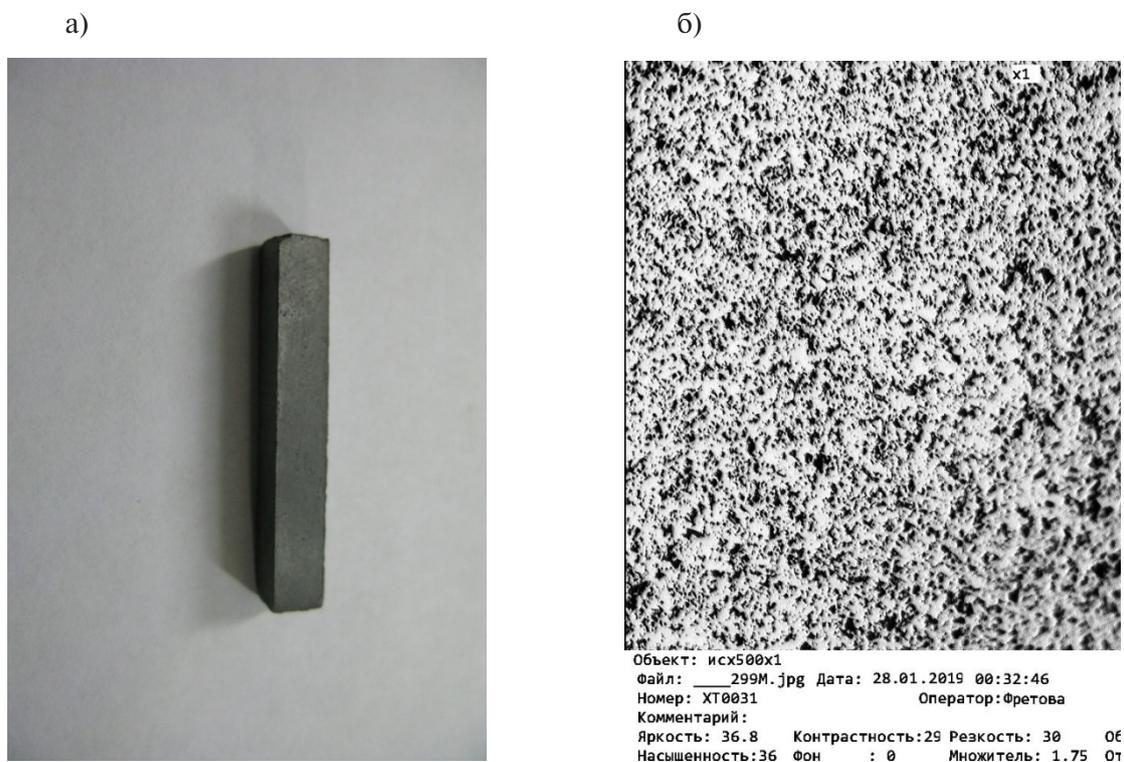


Рис. 1. Твердый сплав марки ВК8: а – штабик, б – исходная микроструктура, x500

Fig. 1. Hard alloy grade VK8: a – bar, b – initial microstructure, x500

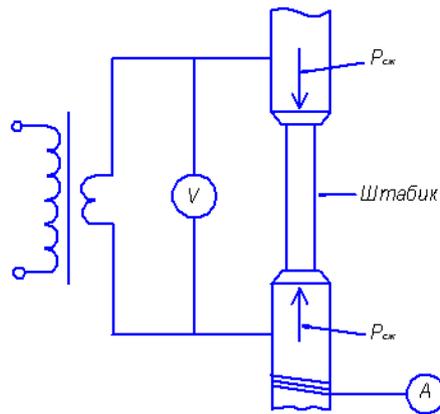


Рис. 2. Схема и вид машины контактной сварки
 Fig. 2. Contact welding machine diagram and view

Таблица 1

Состав и физико-механические свойства твердого сплава марки ВК8

Марка сплава	Химический состав, %		$\sigma_{изг}$, Н/мм ² не менее	Плотность, γ , г/см ³	Твердость, НV
	WC	Co			
ВК8	92	8	1666	14,5-14,8	1200-1300

тив 30с при индукционном нагреве) повышается качество нагрева из-за уменьшения контакта нагреваемой заготовки с воздухом.

Для усиления данного эффекта перед нагревом штабиков на машине контактной сварки их окунали в индустриальное масло, которое в процессе нагрева выгорало, тем самым защищало штабик от действия воздуха. После нагрева исследуемые образцы охлаждали в различных средах.

До и после проведения всех видов безокислительного нагрева определяли твердость по Виккерсу на твердомере HVS-10 с погрешностью ± 5 Н/мм², прочность на изгиб с погрешностью ± 1 %, износостойкость по массе (по сравнению с износом термически не обработанного образца в состоянии поставки).

Для установления влияния вида термообработки на такой параметр, как твердость необходимо определиться с базовым значением исследуемого параметра, т.к. при измерении твердости не всегда обеспечивалась воспроизводимость значений и наблюдался разброс измеряемых величин в значительном диапазоне (от 1316 до 1928 НV, Н/мм²). Для этого измерили твердость по Виккерсу трех исходных штабиков из твердого сплава марки ВК8, по 3 укола слева, по середине и справа каждой грани.

Результаты

После проведения первой серии опытов безокислительного нагрева в соляной ванне была определена твердость штабиков. Результаты измерения твердости, представлены на рис. 3.

Штабики из твердосплавных материалов после различных режимов термообработки нагружали на испытательной машине до разрушения. Данные по испытаниям на изгиб приведены в табл. 2.

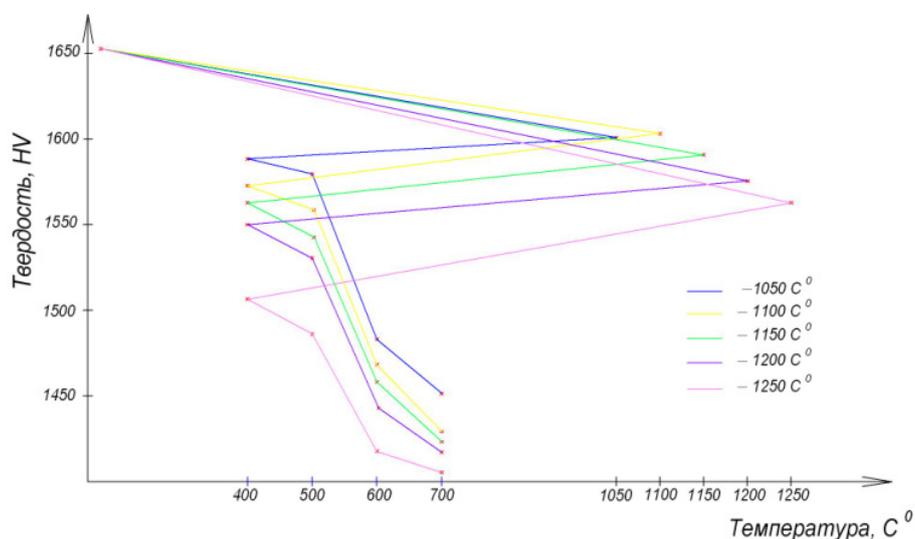


Рис. 3. Зависимость твердости сплава BK8 от температуры ТО
 Fig. 3. Dependence of alloy hardness BK8 on maintenance temperature

Таблица 2

Результаты испытания на прочность при изгибе термообработанных образцов твердых сплавов марки BK8

Table 2

Results of bending strength test of heat-treated samples of hard alloys of grade BK8

Температура нагрева под закалку, °С	Прочность исходных образцов без закалки и отпуска	Прочность, Н/мм ² закаленных образцов после отпуска при температуре, °С				
		без отпуска	400	500	600	700
1050	1670	2915	2922	2807	2637	2479
1100		2794	2859	2770	2591	2455
1150		2458	2571	2414	2059	2140
1200		2477	2584	2471	2331	2072
1250		2450	2334	2318	1961	1929

На основании результатов, полученных при истирании, были построены графики зависимости величины истирания от ее продолжительности, которые представляют практически линейные зависимости, с незначительными вариациями по наклону линий (рис. 4).

Термообработка исследуемых образцов (штабиков) из твердого сплава в индукторе показала, что их твердость повысилась (табл. 3).

Проведена термообработка штабиков с нагревом на машине точечной контактной сварки и затем измерили их твердость (рис. 5).

По интенсивности износа были построены графики по изменению интенсивности истирания образцов твердых сплавов (исходных и после ТО на машине точечной контактной сварки) в зависимости от продолжительности истирания (рис. 6 и 7).

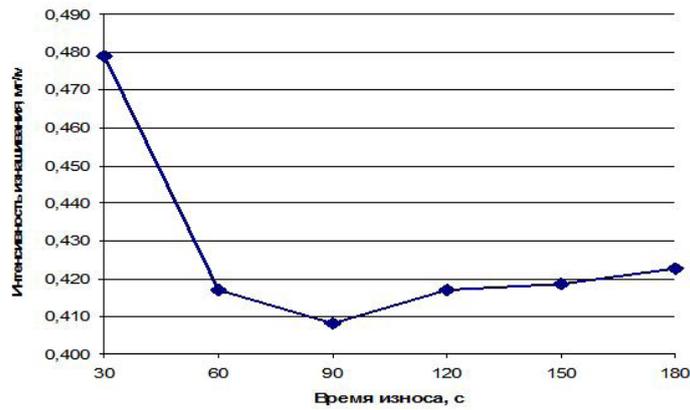


Рис. 4. Зависимость интенсивности изнашивания от продолжительности
 Fig. 4. Wear intensity versus duration

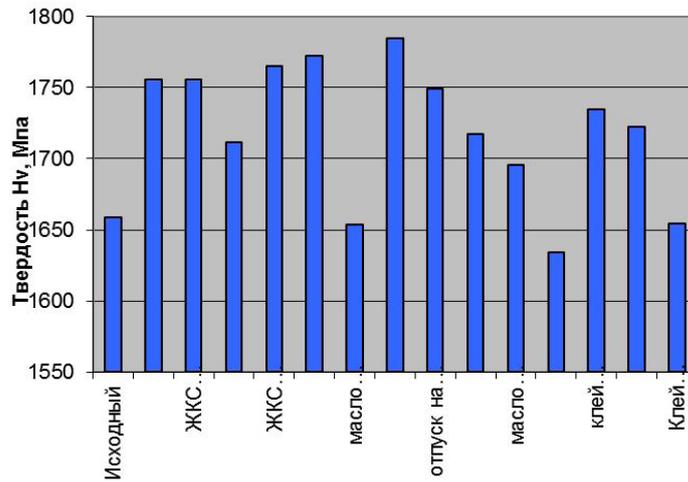
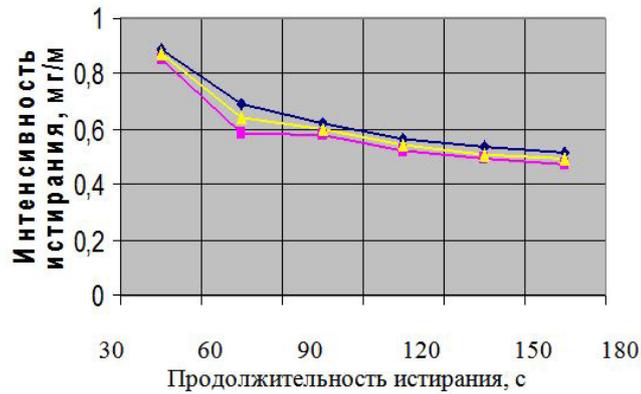


Рис. 5. Гистограмма твердостей исходного и ТО штабиков ВК8
 Fig. 5. Histogram of hardness of initial and maintenance of stacks VK8

Таблица 3
 Значение твердости штабиков (исходного и после закалки с нагревом в индукторе)

Table 3
 Value of stacks hardness (initial and after hardening with heating in inductor)

	Диагональ, мм		Твердость, НV	
	1 сторона	2 сторона	1 сторона	2 сторона
Исходный образец				
ср. знач.	0,108	0,1083	1654	1644
общ. ср	0,1081		1650	
После закалки в масле				
ср. знач.	0,1057	0,1030	1727	1817
общ. ср	0,1043		1772	

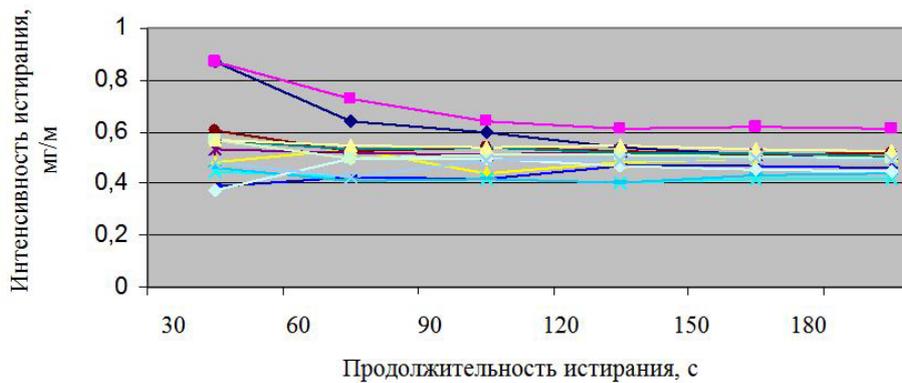


◆ 1 образец ■ 2 образец ▲ ср. значение

Рис. 6. Зависимость интенсивности истирания исходных образцов от продолжительности истирания

◆ 1 sample ■ 2 sample ▲ cf. value

Fig. 6. Dependence of abrasion intensity of initial samples duration of abrasion



◆ 1 ■ 2 ▲ 3 × 4 * 5
 ● 6 + 7 ▲ 8 × 9 * 10
 ■ 11 ▲ 12 × 13

1 – исходный, 2 – закалка в воде; 3 – графит+масло+закалка в масло;
 4 – отпуск на воздухе; 5 – масло+ на воздухе; 6 – графит+масло+ на воздухе;
 7 – ЖКС+ закалка (раствор); 8 – ЖКС+ закалка (порошок); 9 – ЖКС+ отпуск (раствор);
 10 – ЖКС+ отпуск (порошок); 11 – ПВА+закалка ПВА; 12 – ПВА+ на воздухе; 13 – масло+ закалка в масло

Рис. 7. Зависимость интенсивности истирания образцов от вида ТО и продолжительности истирания

1 – initial, 2 – quenching in water; 3 – graphite + oil + quenching into oil; 4 – air release; 5 – oil + in air;
 6 – graphite + oil + in the air; 7 – LCD + quenching (solution); 8 – LCD + quenching (powder);
 9 – LCD + tempering (solution); 10 – LCD + tempering (powder);
 11 – PVA + hardening of PVA; 12 – PVA + in the air; 13 – oil + quenching in oil

Fig. 7. Dependence of abrasion intensity of samples from type of maintenance and duration of abrasion

Обсуждение

Как видно из графика на рис. 3, проведение закалки приводит к снижению твердости при всех температурах нагрева под закалку, причем, с повышением температуры нагрева происходит

снижение твердости и при температуре нагрева от 1050 до 1100 °С оно составляет ≈ 50 HV, а при 1250 °С уже ≈ 100 HV.

Проведение отпуска закаленных образцов при температурах 400 – 700 °С с интервалом 100 °С, также приводит к снижению твердости, причем, при проведении отпуска при температурах 400 °С и 500 °С, как и 600 °С и 700 °С отличие в снижении твердости незначительное (20 – 40 HV), а при температурах отпуска 500 °С и 600 °С снижение твердости существенное (примерно 100 HV).

Проведенные данные испытания показали, что термообработка штабиков из твердых сплавов марки ВК8 положительно сказывается на их прочности. После закалки (без отпуска) прочность штабиков повышается от 75 % при температуре закалки 1050 °С до 45 % при температуре закалки 1250 °С. С повышением температуры отпуска от 400 °С до 700 °С с интервалом 100 °С прочность штабиков несколько уменьшается и при температуре отпуска 700 °С прочность штабиков практически такая же, как и при закалке с температуры закалки 1250 °С – 2479 МПа, т.е. повышение прочности составило 47 % по сравнению с образцами состояния поставки, хотя при температуре отпуска 400 °С прочность на 75 % выше прочности состояния поставки (2922 МПа против 1670 МПа) практически такая же как и после закалки без отпуска (2922 МПа против 2915 МПа).

Относительно повышенную интенсивность изнашивания в начальный период можно объяснить притиркой торцевой поверхности штабика. Кроме традиционного безокислительного нагрева в соляных ваннах нами были предприняты попытки создания новых вариантов безокислительного нагрева, а именно, безокислительный нагрев в индукторе и прямым контактным нагревом на машине точечной сварки.

Термообработка исследуемых образцов (штабиков) из твердого сплава в индукторе показала, что их твердость повысилась на 10 – 30 % по сравнению с образцами в состоянии поставки (1772 против 1650 Н/мм²) (табл. 3), что косвенно указывает на повышение качества нагрева (обеспечение безокислительного нагрева).

Создание безокислительной атмосферы при скоростном индукционном нагреве позволило повысить твердость HV на 120 Н/мм².

Безокислительная атмосфера на машине точечной сварки позволило повысить твердость HV на 250 Н/мм².

Из приведенных данных следует, что практически все виды термообработки (кроме закалки в воде) после нагрева на машине точечной контактной сварки приводят к снижению интенсивности истирания, по сравнению с исходными образцами твердых сплавов (в состоянии поставки), причем, наилучший результат по повышению износостойкости обеспечила обработка с желтой кровяной солью.

При такой обработке износ уменьшился практически в два раза (0,4 после ТО против 0,87 мг/м для исходного образца), причем наибольший эффект по повышению износостойкости в результате термообработки наблюдается в начальный момент истирания (в первые 1,5 минуты).

Выводы

1. Проведение закалки приводит к снижению твердости при всех температурах нагрева под закалку, причем, с повышением температуры нагрева происходит снижение твердости и при температуре нагрева от 1050 до 1100 °С оно составляет ≈ 50 HV, а при 1250 °С уже ≈ 100 HV.

2. Проведение отпуска закаленных образцов при температурах 400 – 700 °С с интервалом 100 °С, также приводит к снижению твердости, причем, при проведении отпуска при температурах 400 °С и 500 °С, как и 600 °С и 700 °С отличие в снижении твердости незначительное (20 – 40 HV), а при температурах отпуска 500 °С и 600 °С снижении твердости существенное (примерно 100 HV).

3. Проведенные данные испытания показали, что термообработка штабиков из твердых сплавов марки ВК8 положительно сказывается на их прочности. После закалки (без отпуска) прочность штабиков повышается от 75 % при температуре закалки 1050 °С до 45 % при температуре

закалки 1250 °С. С повышением температуры отпуска от 400 °С до 700 °С с интервалом 100 °С прочность штабиков несколько уменьшается и при температуре отпуска 700 °С прочность штабиков практически такая же, как и при закалке с температуры закалки 1250 °С – 2479 МПа, т.е. повышение прочности составило 47 % по сравнению с образцами состояния поставки.

4. Термообработка исследуемых образцов (штабиков) из твердого сплава в индукторе показала, что их твердость повысилась на 10 – 30 % по сравнению с образцами в состоянии поставки (1772 против 1650 Н/мм²), что косвенно указывает на повышение качества нагрева (обеспечение безокислительного нагрева).

5. Практически все виды термообработки (кроме закалки в воде) после нагрева на машине точечной контактной сварки приводят к снижению интенсивности истирания, по сравнению с исходными образцами твердых сплавов (в состоянии поставки).

6. При такой термообработке износ уменьшился практически в два раза, причем наибольший эффект по повышению износостойкости в результате термообработки наблюдается в начальный момент истирания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[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) (2008) 295–300.

[2] **Colovcan V.T.** Some analytical consequences of experiment data on properties of WC–Co hard metals. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 26 (4) (2008) 301–305.

[3] **Zhixing Guo, Ji Xiong, Mei Yang, Cijin Jiang.** WC–TiC–Ni cemented carbide with enhanced properties. *J. Alloys and Compnd.* 465 (1-2) (2008) 157–162.

[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) (2016) 8885–8893.

[5] **Chebykin E.P., Stepanova O.G., Goldberg E.L., Gorbarenko S.A., Panov V.S.** Geochemical multi-element 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.* 2016. 30 (3) (2015) 303–316.

[6] **Lakhotkin Yu.V.** Chemical deposition of nanostructured tungsten and tungsten-alloy coatings from gas phase. *Prot. Met. Phys. Chem.* 44 (2018) 319–332.

[7] **Berov Z.Zh., Karamurzov B.S., Tlibekov A.Kh., Yakhutlov M.M.** Selection of a coating material for diamond grits and optimization of its thickness. *J. Superhard Mater.* 5 (2008) 55–61.

[8] **De Oliveira L.J., Cabral S.C., Filgueira M.** Study hot pressed Fe-diamond composites graphitization. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 35 (2012) 228–234.

[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 (2012) 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 (2012) 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] **Panov V.S.** Nanostructured sintered WC–CO hard metals (review) *Powder Metallurgy and Metal Ceramics.* 53 (11) (2015) 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) (2018) 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) (2019) 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

СВИДЕНКО Екатерина Валерьевна – старший преподаватель, Оренбургский государственный университет, канд. техн. наук.

E-mail: tzvetkova.katia2016@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 24.09.2020

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) (2008) 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) (2008) 301–305.

[3] **Zhixing Guo, Ji Xiong, Mei Yang, Cijin. Jiang,** WC–TiC–Ni cemented carbide with enhanced properties. *J. Alloys and Compnd.* 465 (1-2) (2008) 157–162.

[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) (2016) 8885–8893.

[5] **E.P. Chebykin, O.G. Stepanova, E.L. Goldberg, S.A. Gorbarenko, V.S. Panov,** Geochemical multi-element 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.* 2016. 30 (3) (2015) 303–316.

[6] **Yu.V. Lakhotkin,** Chemical deposition of nanostructured tungsten and tungsten-alloy coatings from gas phase. *Prot. Met. Phys. Chem.* 44 (2018) 319–332.

- [7] **Z.Zh. Berov, B.S. Karamurzov, A.Kh. Tlibekov, M.M. Yakhutlov**, Selection of a coating material for diamond grits and optimization of its thickness. *J. Superhard Mater.* 5 (2008) 55–61.
- [8] **L.J. De Oliveira, S.C. Cabral, M. Filgueira**, Study hot pressed Fe-diamond composites graphitization. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 35 (2012) 228–234.
- [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 (2012) 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 (2012) 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. *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) (2015) 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) (2018) 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) (2019) 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

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

Received: 24.09.2020

Научное издание

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЭНЕРГЕТИКА

Том 26, № 4, 2020

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 18.12.2020.

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) и распространяется по подписке через объединенный каталог «Пресса России» (индекс 18390);

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 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 повторов, 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.