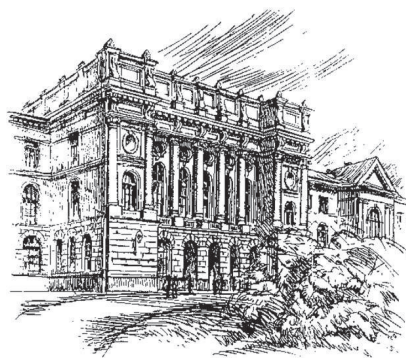


Том 25, №1, 2019



Научно-технические ведомости СПбПУ.

Естественные и инженерные науки

Санкт-Петербург

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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбПУ. ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ НАУКИ
ST. PETERSBURG POLYTECHNIC UNIVERSITY
JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES AND TECHNOLOGY

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

Алфёров Ж.И., академик РАН

Вайсберг Л.А., академик РАН

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

Костюк В.В., академик РАН

Лазарьков А.Н., академик РАН

Окрепилов В.В., академик РАН

Патон Б.Е., академик НАН Украины и РАН

Рудской А.И., академик РАН

Федоров М.П., академик РАН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

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

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

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

Башикарёв А.А., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

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

Гуменюк В.И., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

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

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)

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

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

Alferov Zh.I. — full member of the Russian Academy of Sciences

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

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

JOURNAL 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

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

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

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

Gumenyuk V.I. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

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

Kolsun 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)

Raychik Yaroslav — Dr.Sc. (tech.), prof. Czestochova Polytechnic University
(Poland)

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 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».

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ПИ № ФС77-69285 от 6 апреля 2017 г.)

Подписной индекс **18390** в объединенном каталоге «Пресса России».

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, 2019



Содержание

Памяти Жореса Ивановича Алфёрова	7
---	----------

Энергетика и электротехника

Петреня Ю.К. О программе разработки российских газотурбинных энерготехнологий	8
Костин В.Н., Сериков В.А. Компьютерное моделирование режимов работы систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой	19
Ключаров В.С., Никулин Н.К., Свичарь Е.В. Энергетические характеристики молекулярно-вязкостных вакуумных насосов	30
Джаманбалин Б.К., Кокшаров В.А. Экспертные оценки главных проблем развития электроэнергетики Казахстана	40
Лиханов В.А., Лопатин О.П., Козлов А.Н. Моделирование сажеобразования в цилиндре дизеля	47
Переслыцких О.О., Беляев А.Н. Устойчивость сверхдальних линий электропередачи с управляемой поперечной компенсацией	60
Хомяков К.А., Устинов Д.А. О необходимости корректировки метода расчета электрических нагрузок для предприятий минерально-сырьевого комплекса	71
Дроздов А.А., Рекстин А.Ф. Анализ диаграмм скоростей рабочих колес центробежных компрессорных ступеней после первичного проектирования	79
Лиханов В.А., Лопатин О.П. Исследование токсичности биодизельного двигателя, работающего на спирте	92
Кузнецов Л.Г., Кузнецов Ю.Л., Бураков А.В., Кудла Н.А. Повышение эффективности роторных компрессоров	101

Машиностроение

Чжао В., Жавнер В.Л., Смирнов А.Б., Янь Ч. Применение пневматических цилиндров с возвратными пружинами в мехатронных рекуперативных приводах	111
Пшизов А.К. Влияние деформации водила на распределение нагрузки по ширине зубчатых венцов планетарного редуктора	124
Смирнов А.Б., Жавнер В.Л. Научно-методические аспекты в мехатронике	134

Металлургия и материаловедение

Першин В.Ф., Аль-Шиблави К.А., Баранов А.А., Пасько Т.В. Получение малослойного графена способом жидкофазной сдвиговой эксфолиации	143
Возняковский А.А., Кольцова Т.С., Кидалов С.В., Толочко О.В., Возняковский А.П., Кумсков А.Л. Синтез порошкового гибридного материала состава ДНА-МУНТ и его устойчивых водных наножидкостей	155

Дьячкова Т.П., Таров Д.В., Кобзев Д.Е. Исследование свойств полиэтиленовых композитов на основе функционализированных углеродных нанотрубок	163
Демидов А.И., Маркелов И.А. Термодинамика восстановления железа из оксидов монооксидом углерода в смеси с диоксидом углерода при постоянном содержании кислорода в системе	174
Вайсберг Л.А., Устинов И.Д. Феноменология вибрационной классификации и усреднения по крупности гранулярных материалов	181

Хроника

Васильев Ю.С., Федоров М.П. Василий Андреевич Глухих (к 90-летию со дня рождения)	190
Васильев Ю.С., Кириллов А.И. Александр Александрович Радциг (к столетию со дня рождения)	194
Выступление академика РАН Леонида Абрамовича Вайсберга на Ученом совете Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого 26-го ноября 2018-го года	200



Contents

In memoriam: Zhores Ivanovich Alferov	7
--	----------

Power engineering and Electrical engineering

Petrenya Yu.K. Development program of russian gas turbine power technologies	8
Kostin V.N., Serikov V.A. Computer simulation of operating power supply modes with non linear load	19
Klyucharov V.S., Nikulin N.K., Svichkar E.V. Energy characteristics of molecular-viscous vacuum pumps	30
Jamanbalin B.K., Koksharov V.A. Expert evaluations of main problems in development of electric energy in Kazakhstan	40
Likhanov V.A., Lopatin O.P., Kozlov A.N. Modeling soot formation in cylinder of diesel engine	47
Pereslytskikh O.O., Belyaev A.N. Stability of ultra-long transmission lines with controlled shunt compensation	60
Khomiakov K.A., Ustinov D.A. Adjusting the method for calculation of electrical loads for enterprises of mineral resources industry	71
Drozdov A.A., Rekstin A.F. Velocity diagrams of impellers of centrifugal compressor stages: analysis after preliminary design	79
Likhanov V.A., Lopatin O.P. Study on toxicity of biodiesel engine running on alcohol.....	92
Kuznetsov L.G., Kuznetsov Yu.L., Burakov A.V., Kudla N.A. Efficiency improvement of rotary compressors	101

Mechanical engineering

Wen Zhao, Zhavner V.L., Smirnov A.B., Chuanchao Yan. Application of pneumatic spring-return cylinders in mechatronic drives with energy recovery	111
Pshizov A.K. Effect of carrier deformation on load distribution along the face width of planetary gearbox.....	124
Smirnov A.B., Javner V.L. Scientific and methodological aspects in mechatronics	134

Metallurgy and Materials technology

Pershin V.F., Al-Shiblawi K.A., Baranov A.A., Pasko T.V. Production of low-layer graphene by liquid phase shear exfoliation	143
Vozniakovskii A.A., Koltsova T.S., Kidalov S.V., Tolochko O.V., Voznyakovskii A.P., Kumskov A.L. Synthesis of hybrid powder nanomaterial consisting of detonation nanodiamonds/carbon nanotubes and its stable reversible water nanofluids	155

Dyachkova T.P., Tarov D.V., Kobzev D.E. Study of properties of polyethylene composites based on functionalized carbon nanotubes	163
Demidov A.I., Markelov I.A. Thermodynamics of reduction of iron oxides by carbon monoxide mixed with carbon dioxide at constant oxygen content in the system	174
Vaisberg L.A., Ustinov I.D. , Phenomenology for vibration-induced size segregation and mixing of granular materials	181

Chronicle

Vasiliev Yu.S., Fedorov M.P. Vasilii Andreevich Glukhikh: dedicated to the 90th anniversary of birth	190
Vasiliev Yu.S., Kirillov A.I. Alexander Radzig: dedicated to the 150th anniversary of birth	194
Speech given by full member of the Russian Academy of Sciences L.A. Weisberg upon accepting the diploma of Honorary Doctor at the meeting of the Academic Council of the Polytechnic University on November 26, 2018	200

ПАМЯТИ ЖОРЕСА ИВАНОВИЧА АЛФЁРОВА (1930–2019)



1 марта 2019 года ушел из жизни лауреат Нобелевской премии по физике, академик РАН Жорес Иванович Алфёров.

Жорес Иванович Алфёров родился 15 марта 1930 года в г. Витебске. Окончил факультет электронной техники Ленинградского электротехнического института и в 1952 году начал научную карьеру.

В 1953 году Ж.И. Алфёров стал работать в Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе Академии наук СССР. В 1972 году Жорес Иванович был избран членом-корреспондентом РАН по Отделению общей физики и астрономии (физика), а в 1979 году — академиком по тому же Отделению (физика и астрономия). В период с 1991-го по 2017 год Жорес Иванович был вице-президентом РАН; многие годы он избирался председателем Президиума Санкт-Петербургского научного центра РАН.

С 1988 года научно-педагогическая деятельность академика Ж.И. Алфёрова связана с Политехническим университетом. Он был деканом физико-технического факультета, заведующим кафедрой физики и технологии наноструктур. В 2000 году Жореса Ивановича избрали почетным доктором Политехнического университета. В 2014–2018 годах Ж.И. Алфёров входил в состав наблюдательного совета СПбПУ Петра Великого, был также профессором и научным руководителем Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций нашего Университета. Ж.И. Алфёров — создатель и многолетний ректор Санкт-Петербургского национального исследовательского академического университета Российской академии наук, а также основатель лицея «Физико-техническая школа» при этом университете.

Жорес Иванович Алфёров был поистине подвижником российского физического образования, все его инициативы и свершения трудно переоценить. В 2002 году Ж.И. Алфёров возглавил в качестве председателя Научно-методический совет (НМС) по физике при Министерстве образования и науки, который был создан на базе Политехнического университета. За более чем десятилетний период активной работы НМС по физике Ж.И. Алфёрову удалось объединить ведущие вузы страны с целью сохранения и развития в России фундаментального физического образования как в средней, так и в высшей школе.

Ж.И. Алфёров — автор более 500 научных работ и более 50 изобретений. Заслуги академика Ж.И. Алфёрова перед российской и мировой наукой отмечены многочисленными премиями и наградами. Среди них главная международная награда — это Нобелевская премия по физике 2000 года «За основополагающие работы в области информационных и коммуникационных технологий», в частности «За развитие полупроводниковых гетероструктур для высокоскоростной и оптоэлектроники».

Редакционный совет и редакционная коллегия журнала «Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки» глубоко скорбят по поводу кончины члена редакционного совета академика Жореса Ивановича Алфёрова и выражают искренние соболезнования родным и близким этого выдающегося Ученого, Педагога и общественного деятеля

DOI: 10.18721/JEST.25101
УДК 536.24:620.9:621.165

Ю.К. Петреня

ПАО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия

О ПРОГРАММЕ РАЗРАБОТКИ РОССИЙСКИХ ГАЗОТУРБИННЫХ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЙ*

Газу отведена важнейшая роль в текущем и перспективном топливном энергетическом балансе России и многих стран, включая США и Европу. Применение газотурбинных энергетических технологий, достигших высокого уровня развития, обеспечивает повышение энергоэффективности и конкурентоспособности российской энергетики. Перспективный рынок этих технологий представляет большой интерес для российской промышленности, в том числе и для повышения её экспортного потенциала. В России есть опыт разработки и освоения газовых энергетических турбин, большой научный и промышленный потенциал для разработки газовых энергетических технологий конкурентного мирового уровня. Предложено реализовать комплексную научно-технологическую инвестиционную программу (национальный проект) по данному направлению. Отмечено, что развитие отечественных газотурбинных энерготехнологий — один из важнейших приоритетов обеспечения энергобезопасности и научно-технологического развития Российской Федерации. Реализацию этого мультидисциплинарного в научном и прикладном плане проекта, координацию работ и кооперацию академической, отраслевой и вузовской науки с промышленностью предложено проводить под научно-методическим руководством РАН (ОЭММПУ РАН).

Ключевые слова: газовые энергетические турбины, современная и перспективная энергетика, энергоэффективность, энергобезопасность, фундаментальные исследования, комплексная инвестиционная научно-исследовательская программа (национальный проект).

Ссылка при цитировании:

Ю.К. Петреня. О программе разработки российских газотурбинных энерготехнологий // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 8–18. DOI: 10.18721/JEST.25101.

Yu.K. Petrenya

PJSC «Power machines», St. Petersburg, Russia

DEVELOPMENT PROGRAM OF RUSSIAN GAS TURBINE POWER TECHNOLOGIES

Gas plays a crucial role in the current and future fuel energy balance of Russia and many countries, including the United States and Europe. Energy efficiency is enhanced by using highly advanced technologies for gas turbine energy. Ensuring the competitiveness of the Russian energy sector involves using gas turbines and com-

* По материалам доклада «Развитие газотурбинных энергетических технологий в России» на Общем собрании РАН 13 декабря 2018 года.



bined-cycle plants. The promising market for these technologies is of great interest to the Russian industry, particularly, for increasing its export potential. Russia has experience in development and integration of gas energy turbines, a large scientific and industrial potential for devising new, globally competitive gas energy technologies. It was proposed to implement a comprehensive science and technology investment program (national project) in this area. It is noted that developing domestic gas-turbine power technologies is one of the most important priorities in ensuring energy security and scientific and technological development of the Russian Federation. It was proposed to coordinate the implementation of the project that is multidisciplinary from a scientific and applied standpoint and cooperation of academic, sectoral and university science with industry under the scientific and methodological guidance of the Russian Academy of Sciences (OEMMP RAS).

Keywords: gas energy turbines, modern and future energy, energy efficiency, energy security, basic research, a comprehensive investment research program (national project).

Citation:

Yu.K. Petrenya, Development program of Russian gas turbine power technologies, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 8–18, DOI: 10.18721/JEST.25101.

Газовая электрогенерация, энергобезопасность, перспективный рынок

Газотурбинные энергетические технологии — одна из важнейших составляющих современной и перспективной энергетики. Это определяется ролью, которую играет газ в топливном энергетическом балансе как России, так и ведущих стран Европы и США: в России доля газа составляет порядка 50 %, в США и Европе — соответственно более 40 и 20 %. Таким образом, эффективное использование газа в энергетическом оборудовании даже в настоящее время требует применения парогазового цикла, построенного на базе энергетических газовых турбин [1–6]**.

Линейный прогноз на 35 лет на базе достоверных данных за предыдущий период про-

должительностью 70 лет (с 1965 года) показывает, что доля газа в мировом топливном балансе к 2070 году достигнет величины порядка 30 % при одновременном росте новых генерирующих мощностей (рис. 1, табл. 1). Суммарная мощность газовой электрогенерации в мире к 2035 и 2070 годам вырастет соответственно примерно в 2 и 4 раза, что указывает на большой сегмент перспективного рынка для энергетического машиностроения. Для получения своей доли на этом рынке российская промышленность должна предлагать конкурентоспособное оборудование, в том числе энергетические газовые турбины.

Если в 1965 году общая мощность газовой генерации в мире была 0,11 ТВт, а в 2015 году — 1,29 ТВт, то в 2035 и в 2070 годах она составит соответственно 2,49 и 4,38 ТВт, то есть в мире образуется большой перспективный рынок для газотурбинных энергетических технологий [1–3, 7].

После осуществления программы ДПМ к настоящему времени 12 % энергетики России базируются на зарубежных газовых турбинах большой мощности и парогазовых установках на их основе, что создаёт существенные риски для энергобезопасности страны. Эта проблема существенно обостряется на фоне санкционной и запретительной политики западных стран, которая проявилась при поставках газовых турбин в Крым [8].

** См. также:

Энергетическая стратегия России до 2035 года. (Разработана во исполнение поручения Президента Российской Федерации от 6 июля 2013 г. № Пр-1471 о корректировке Энергетической стратегии России на период до 2030 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р и предусматривающей обновление каждые пять лет. Продление стратегического периода до 2035 года выполнено в соответствии с поручением Правительства Российской Федерации (протокол заседания Правительства РФ);

Стратегия научно-технологического развития России до 2035 года. Утверждена Указом Президента РФ от 01.12.2016 года № 642.

Доля в топливном балансе, %

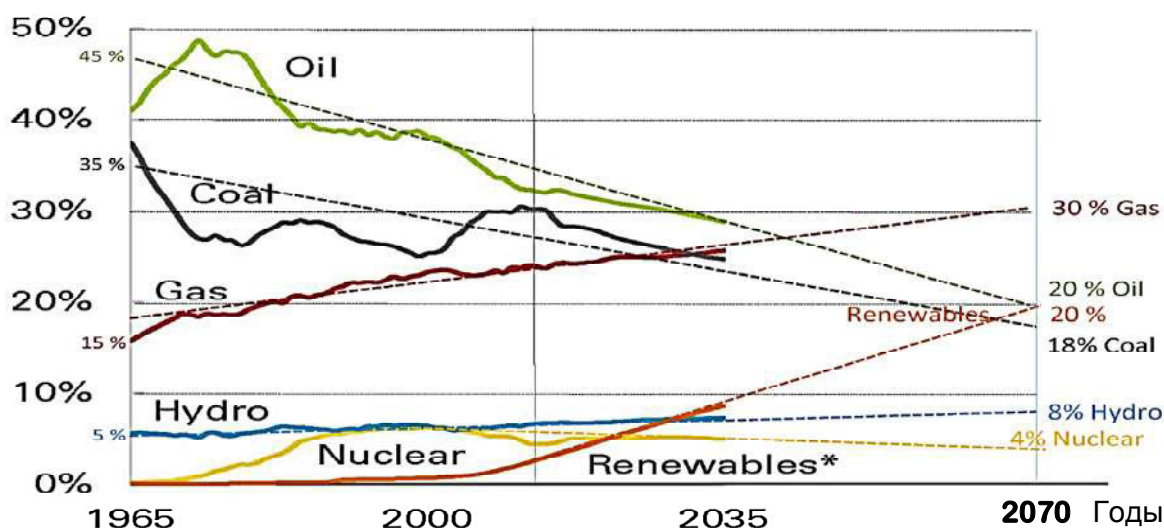


Рис. 1. Доля газа в мировом топливном энергетическом балансе

Fig. 1. Share of gas in global fuel energy balance

Таблица 1

Доля газа в мировом топливном энергетическом балансе и мощность генерации по годам

Table 1

Gas share in world fuel energy balance and generation capacity by years

Год	Доля газа в топливном балансе, %	Мощность газовой генерации, ТВт	Общая мощность, ТВт
1965	15	0,11	0,73
2015	23	1,29	5,6
2035*	26	2,49	9,6
2070**	30	4,38	14,6

* Прогноз IEA, ВР.

** Линейный прогноз.

Другой существенный риск для энергобезопасности России — технологическая монополизация рынка мощных газовых турбин. Оригинальными разработчиками и производителем

мощных газотурбинных установок (более 300 МВт) являются фактически только три компании — General Electric (Alstom стал частью General Electric), Siemens и Mitsubishi Heavy Industries [9–11].

Потенциально важна роль газотурбинных энергетических технологий в перспективной энергетике ближайших десятилетий, когда произойдет переход от моноцелевых монотопливных электростанций к многоцелевым многотопливным энергохимическим комплексам. Ключевым элементом таких энергохимических комплексов будут газовые энергетические турбины большой мощности с высоким уровнем температуры на входе в турбину.

Российские энергомашиностроение и энергетика должны располагать конкурентоспособными газовыми турбинами и парогазовыми установками, которые позволят решить проблемы энергоэффективности и энергобезопасности российской энергетики и обеспечить экспорт этих установок на мировой энергетический рынок.

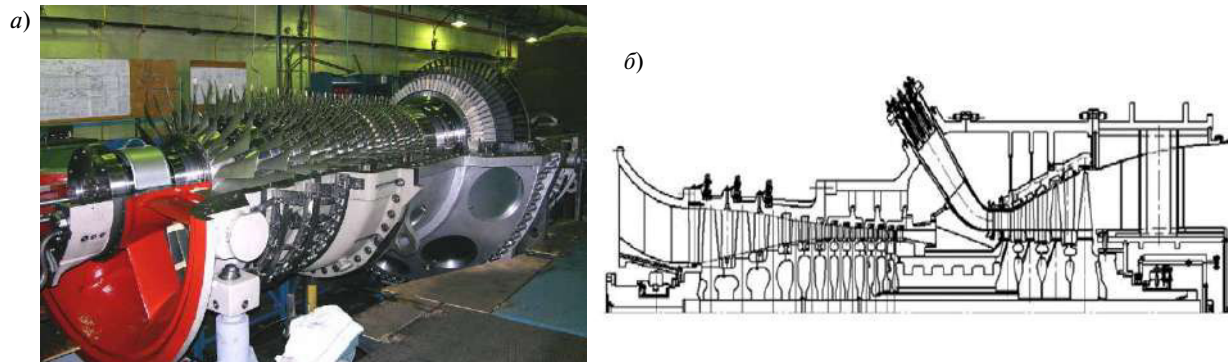


Рис. 2. Газовая энергетическая турбина ГТЭ-65 (а) и проект газовой турбины ГТЭ-300 ПАО «Силовые машины» (б)

Fig. 2. Gas turbine GTE-65 by Power Machines OJSC (a) and project of gas turbine GTE-300 by Power Machines OJSC (b).

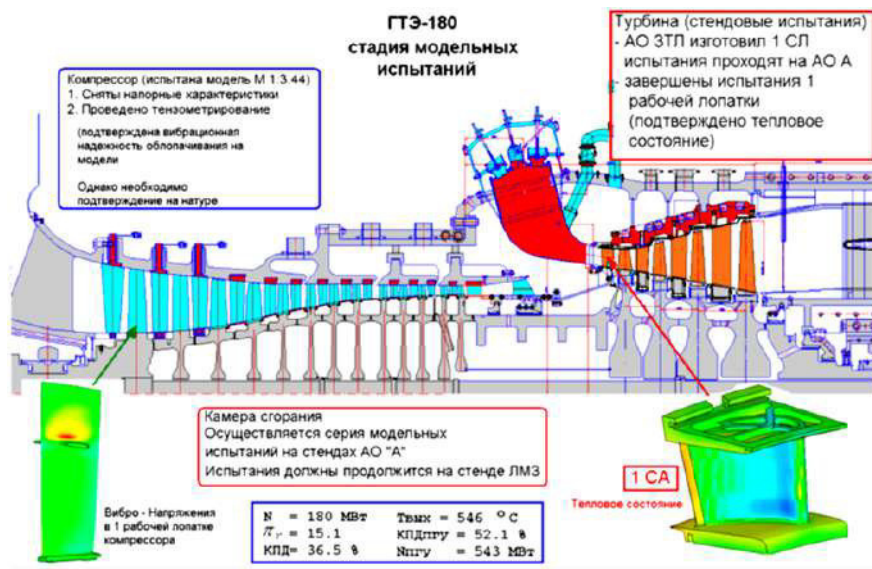


Рис. 3. Газовая энергетическая турбина ГТЭ-180 (совместный проект ЛМЗ и ОАО «Авиадвигатель»)
Fig. 3. Gas turbine GTE-180 (joint project of LMZ and Aviadvigatel OJSC)

Газотурбинные энерготехнологии

В России есть опыт разработки и освоения мощных газовых турбин. В 60–70-е годы прошлого века была разработана и освоена рекордная по мощности – 100 МВт – газовая турбина ГТ-100 ЛМЗ. В последние десятилетия был получен опыт производства лицензионных газовых турбин Е-класса мощностью 160 МВт, разработана и испытана в условиях станции газовая турбина ГТ-65, выполнены проекты турбин мощностью 180 МВт (ЛМЗ-ОАО «Авиадвигатель») и 170, 300 МВт (ПАО «Силовые машины») (рис. 2, 3) [12–15].

Последние пятьдесят лет в мире происходило постоянное развитие газовых энергетических турбин. Их единичная мощность выросла со 100 до более 500 МВт, коэффициент полезного действия парогазовых установок на их базе достиг 62 %. Классы газотурбинных энерготехнологий и температуры на входе в газовую турбину и на выходе газовой турбины приведены в табл. 1. Для J-класса температура на входе в газовую энергетическую турбину может достигать 1700 °C (табл. 2).

Таблица 2

Классы газотурбинных энерготехнологий

Table 2

Classes of gas turbine power technologies

Класс газотурбинной технологии	Температура на входе в газовую турбину, °C	Температура на выходе газовой турбины, °C	Класс параметров КУ, паровой турбины в составе ПГУ
E	≤ 1150	500–540	SC (<i>SuperCritical</i>)
F	1150–1300	600	USC (<i>UltraSuperCritical</i>)
H	1300–1500	640	A-USC (<i>Advanced UltraSuperCritical</i>)
J	1500–1700	680	A-USC (<i>Advanced UltraSuperCritical</i>)

Газовые турбины по совокупности решений, объединённых в систему, — один из самых сложных технических объектов, которые создало человечество. Входной барьер в газотурбинные технологии достаточно высок, так как необходимы крупные инвестиции в фундаментальные и прикладные исследования, в опытно-конструкторские работы на этапе разработки, должны быть в наличии школа проектирования высокого уровня, конструкторские наработки, серьёзная технологическая база, развитая сервисная служба.

**Комплексная инвестиционная
научно-исследовательская программа
(национальный проект)**

Вопрос о важности разработки отечественных мощных газовых турбин неоднократно ставился Российской академией наук. В 2014 году обращение на эту тему академика В.Е. Фортова, министра энергетики А.В. Новака и министра промышленности и торговли Д.В. Мантурова было направлено Президенту РФ В.В. Путину, который поддержал данную инициативу. Ряд обращений в Правительство РФ и ведомства с разъяснением важности для страны разработки и освоения газовых энергетических турбин были подготовлены и направлены академиком О.Н. Фаворским. Соответствующие рекомендации были разработа-

ны Комиссией по газовым турбинам РАН, которую возглавляет член-корреспондент РАН Г.Г. Ольховский. Необходимо также отметить недавние рекомендации на тему газовых энергетических турбин Совета РАН по приоритетному направлению научно-технологического развития Российской Федерации «Переход к экологически чистой энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии» под председательством академика В.Е. Фортова. В РАН были разработаны предложения по модернизации тепловой энергетики страны, в том числе по применению газотурбинной надстройки с паротурбинным блоком повышенной эффективности тепловой электростанции (патент на изобретение академика О.Н. Фаворского, члена-корреспондента РАН Ю.К. Петрени и др.).

Учитывая несомненную актуальность и важность для безопасности и экономики страны наличия компетенций по мощным газовым турбинам, предлагается сформировать и реализовать комплексную научно-техническую инвестиционную программу (национальный проект) по разработке и освоению отечественных газотурбинных энергетических технологий.

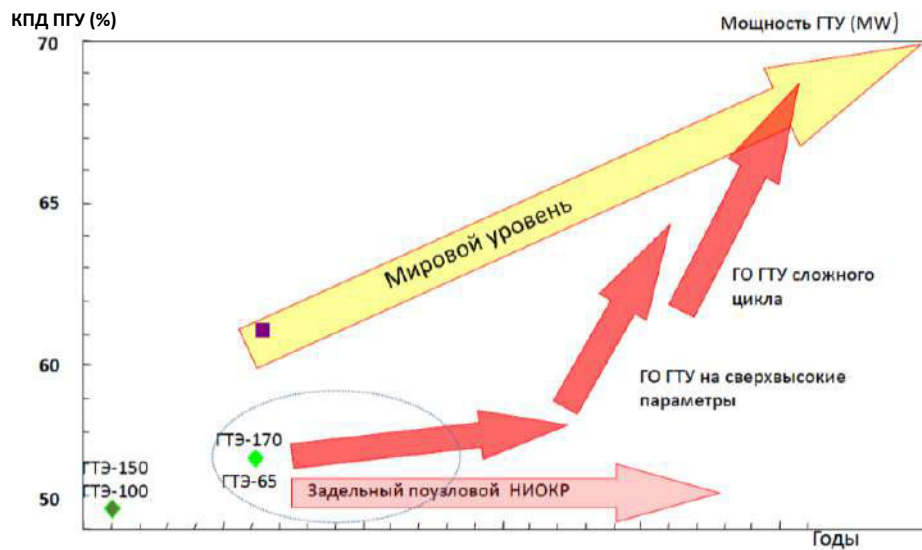


Рис. 4. Схема достижения перспективного мирового уровня газотурбинных энергетических технологий на базе опережающих фундаментальных и прикладных исследований

Fig. 4. Scheme for gas-turbine power technologies based on advanced fundamental and applied research to become globally competitive

В основе этого проекта должны лежать опережающие фундаментальные исследования и прикладные работы, позволяющие в сжатые сроки выйти на перспективный мировой уровень газотурбинных энергетических технологий (рис. 4). Основными областями необходимых фундаментальных исследований являются:

аэродинамика различных узлов газовой турбины, позволяющая на базе верифицированных кодов и программных комплексов полным образом описать аэродинамические условия в компрессоре, в камере сгорания и турбине, в системах охлаждения;

физико-химические и теплофизические процессы в камерах сгорания, в том числе при использовании низкокалорийного синтез-газа с добавлением водорода и применении мембранных технологий;

разработка перспективных материалов и функциональных покрытий для элементов горячего тракта газовых турбин на температуры до 1700 °С, в том числе керамических материалов и аддитивных технологий;

методы решения связанных задач и сквозного суперкомпьютерного проектирования,

обеспечивающего испытания и доводку газовой турбины большой мощности в виртуальном пространстве при меньших финансовых и временных затратах. Фундаментальные исследования по этим и другим необходимым направлениям могут быть выполнены силами академической и вузовской науки.

На следующем уровне детализации к областям фундаментальных исследований могут быть отнесены следующие направления работ (подготовлены с участием Института теплофизики СО РАН) [16–19].

Аэродинамика проточного тракта, обтекание компрессорных и турбинных лопаток, включая численное моделирование и оптимизацию трехмерной аэродинамики потока на основе верифицированных вычислительных кодов и программных комплексов, определение условий (и устранение) возникновения отрыва потока, нестационарных режимов, автоколебаний, снижение утечек воздуха через зазоры лопаток, аэродинамику, теплообмен и акустику входного аппарата (в том числе проблема обледенения); разработка и внедрение методов эффективного управления аэродинамикой по-

тока на основе адаптивного локального воздействия и обратной связи с использованием методов машинного обучения.

Системы охлаждения, в том числе оптимизация аэродинамики высокотемпературного потока и теплообмена, организация тепловой защиты с учетом трехмерности и нестационарности, а также эффективного теплоотвода с использованием микроканальных двухфазных течений.

Проблемы в камерах сгорания (аэродинамика, физико-химические процессы, все теплофизические аспекты, экология, эффективность):

проработка мероприятий по снижению вредных выбросов и повышению эффективности сжигания топлива, в т. ч. организация беспламенного горения, внедрение катализаторов, паровая газификация, достижение сверхадиабатных температур, рекуперация тепла. Проработка возможности организации горения синтез-газа (в том числе низкокалорийного). Проработка решений для реализации горения с добавлением водорода, горения топлива в условиях частичного отделения азо-

та из воздуха на входе в установку с использованием мембранных технологий;

оптимизации аэродинамики высокотемпературного потока и режимов горения с учетом особенностей химического реагирования, трехмерности и нестационарности. Разработка достоверных кинетических моделей химического реагирования при повышенном давлении и температуре;

организация горения при значительном обеднении смесей (Dry Lean Premixed Prevaporized) – снижение пиковых температур; анализ условий возникновения виброгорения и срыва; дежурное пламя и горение с избытком воздуха в основном канале (концепция TAPS I, II, III); проработка управления нестационарными режимами при управлении подачей топлива;

проработка других перспективных методов организации горения (Lean direct injection и др. Low-swirl burner) – снижение времени пребывания и выбросов NO_x для бедных смесей (рис. 5);

определение условий возникновения автоколебаний и термоакустического резонанса;

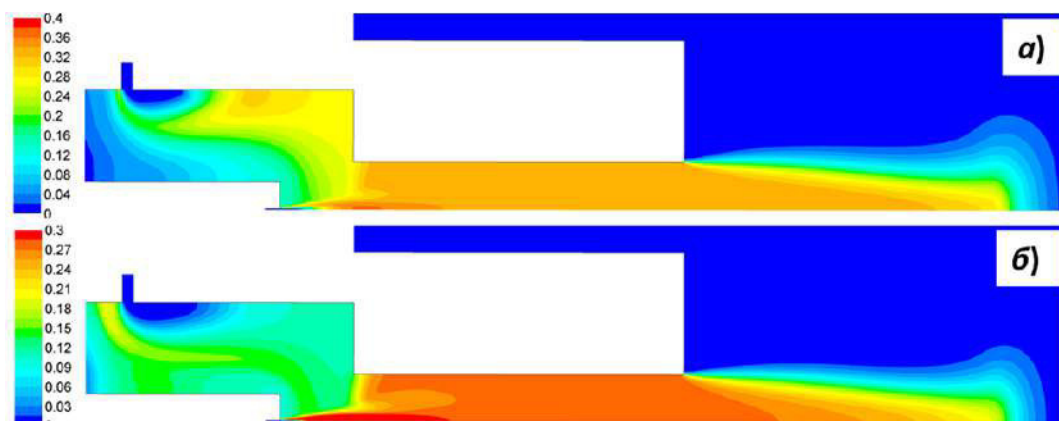


Рис. 5. Распределение объёмной доли CO (а) и H_2 (б) в факеле (данные Института теплофизики СО РАН, полученные в рамках программ фундаментальных исследований государственных академий наук, Президиума РАН, РФФИ, РНВ, ФЦП)

Fig. 5. Distribution of volume fractions of CO (a) and H_2 (b) in the flare (data from Institute of Thermophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, obtained within the framework of basic research programs of state academies of sciences of Presidium of Russian Academy of Sciences, RFBR, RSF, FTP)



разработка и внедрение методов эффективного управления смешением и горением на основе адаптивного локального воздействия и обратной связи с использованием методов машинного обучения.

Перспективные материалы для горячего тракта, керамика, аддитивные технологии:

исследование свойств (теплофизических) и фазовой стабильности перспективных конструкционных материалов при высоких температурах;

анализ эффективности использования функциональных (теплозащитных) покрытий;

исследования теплообмена в процессе нанесения термобарьерных покрытий на поверхность лопаток из потока паров металл-органических соединений (совместно с ИИХ СО РАН).

Сквозное суперкомпьютерное моделирование газовой турбины с целью уменьшения финансовых и временных затрат на проектирование:

разработка и внедрение верифицированных вычислительных кодов и программных комплексов для достоверного компьютерного моделирования термогазодинамики потока, теплообмена и горения с целью оптимизации работы газовых турбин и снижения вредных выбросов;

проработка решений для реализации комбинированных циклов (впрыск пара и др.) — оптимизация аэродинамики, теплообмена и горения, расширение и верификация расчетных кодов;

получение фундаментальных результатов в этих областях при применении современных экспериментальных методов лабораторных исследований, в том числе разработанных и освоенных в СО РАН, в Институте теплофизики РАН (в качестве примера можно упомянуть такие методы, как измерение смесеобразования в камерах сгорания при высокоскоростной регистрации (в том числе в ИК и УФ диапазонах), системы машинного зрения (2D и 3D с высоким временным разрешением), лазерные системы бесконтактной диагностики

потоков и процессов горения (ЛИФ, КАРС и т. д.), методы вычислительной томографии для задач аэрогидродинамики и другие методы).

Выполнение данного комплекса исследований требует широкого участия академических и отраслевых институтов, вузовской науки. В первую очередь к ним относятся такие институты, как ИВТАН, Институт теплофизики и ряд других институтов СО РАН, ИМаш РАН, ИНЭИ РАН, ЦИАМ, СПбПУ, МЭИ, МВТУ, УГАТУ (Уфимский авиационный технический университет), СГАУ (Самарский авиакосмический университет), ВТИ, НПО ЦКТИ имени И.И. Ползунова, ВИАМ, НПО ЦНИИТМаш, ЦНИИ КМ «Прометей» и др.

Необходимость проведения большого объема поузловых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и стендовых испытаний определяет потребность участия в данном проекте отраслевой науки и высокотехнологичных компаний энергомашиностроения и авиадвигателестроения. Большой потенциал для выполнения прикладных исследований и стендовых испытаний имеется в организациях ОДК (Объединённой двигателестроительной корпорации), ЦИАМ, ОАО «САТУРН», ОАО «Авиадвигатель», «РЭП-холдинг», ВТИ, НПО ЦКТИ имени И.И. Ползунова, ПАО «Силовые машины» и др. (рис. 6).

Особенности режимов эксплуатации мощных газовых турбин и требования к надёжности турбин должны быть учтены и обеспечены с помощью систем автоматического управления, мониторинга и диагностики, построенных на базе динамических математических моделей, специальных алгоритмов и программного обеспечения.

Обеспечение изготовления газовых турбин деталями и заготовками (такими, как лопатки, диски, ротора и т. п.) возможно на базе разработки и развития перспективных металлургических технологий в кооперации академической, вузовской и отраслевой науки с металлургическими компаниями [20, 21]. Данное

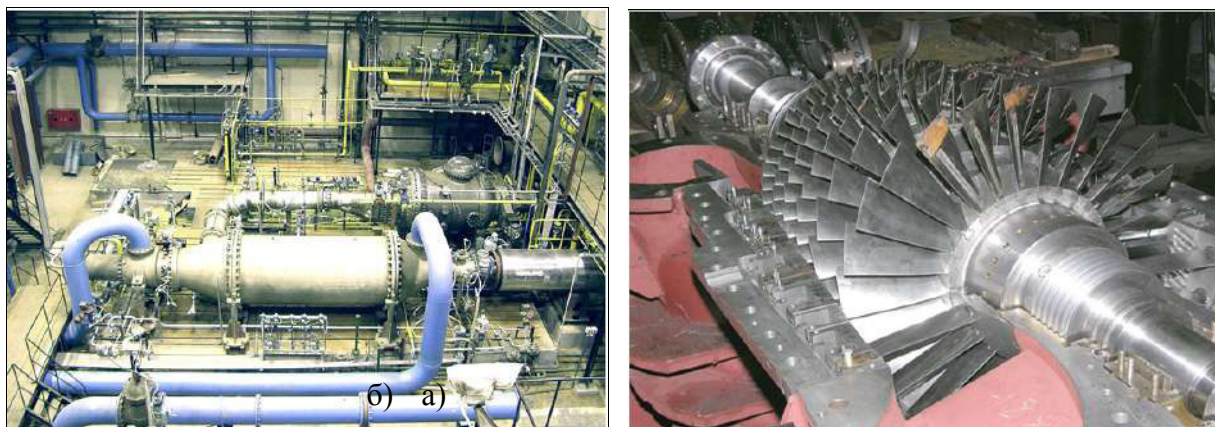


Рис. 6. Экспериментальные стенды для огневых испытаний камер сгорания (ПАО «Силловые машины») (а) и компрессоров (НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова) (б)

Fig. 6. Experimental stands for fire tests of combustion chambers of Power Machines OJSC (a) and compressors of I.I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment (b)

направление работ потребует участия как институтов, так и промышленных компаний. Это, в первую очередь, ВИАМ, НПО ЦНИИТМаш, ЦНИИ КМ «Прометей», ВИЛС, ОМЗ-Спецсталь, Петрозаводскмаш и другие организации.

Другие важные научные направления при создании перспективных газовых турбин связаны с проблемами обеспечения эксплуатации, сервиса и восстановительного ремонта. Успешное решение этих проблем также требует широкой кооперации научных, производственных и эксплуатирующих организаций.

Основными этапами освоения отечественных газотурбинных энерготехнологий должны быть следующие:

1-й этап — восстановление компетенций в Е-классе в течение 5-ти лет (к 2022–2023 гг.), включая разработку и серийное производство отечественных газовых турбин средней и большой мощности для обеспечения программы ДПМ-штрих. Предполагается финансирование этого этапа проекта из средств бюджета и из собственных средств ПАО «Силловые машины»;

2-й этап — разработка и освоение газовых турбин F/H-класса в течение 10-ти лет (к 2028 году);

3-й этап — разработка и освоение газовых турбин J-класса в течение 15-ти лет (к 2033 году)

Заключение

Комплексная научно-технологическая инвестиционная программа (национальный проект) по разработке перспективных газовых турбин отвечает интересам Российской Федерации. Она необходима для обеспечения конкурентоспособности и экспортного потенциала промышленности, решения текущих и перспективных задач энергетики XXI века

Уровень и значение этого Проекта для страны требуют его поддержки Правительством РФ, активного участия профильных министерств, промышленных партнёров и реального бюджетного финансирования.

Реализацию мультидисциплинарного в научном и прикладном плане Проекта, координацию работ и кооперацию академической, отраслевой и вузовской науки с промышленностью необходимо осуществлять под научно-методическим руководством РАН (ОЭММПУ РАН).

Развитие отечественных газотурбинных технологий является одним из важнейших приоритетов при обеспечении энергобезопасности и научно-технологического развития Российской Федерации.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Energy Agency. World Energy Outlook. 2018: [Электр. ресурс] <https://webstore.iea.org/world-energy-outlook-2018>
2. **Фортов В.Е., Попель О.Н.** Энергетика в современном мире. М.: Изд-во Интеллект, 2011. 168 с.
3. **Петреня Ю.К.** По законам физики и экономики. [Электр. ресурс] [https://ge.com>power/gas/gas-turbines](https://stimul.online>Интервью>По законам экономики и физики, 2018.4. Ольховский Г.Г., Тумановский А.Г. Теплоэнергетические технологии в период до 2030 г. // Известия РАН. Энергетика. 2008. № 6. С. 79–94.5. Фаворский О.Н., Полищук В.Л. Выбор тепловой схемы и профиля отечественной мощной энергетической ГТУ нового поколения и ПГУ на ее основе // Теплоэнергетика. 2010. № 2. С. 2.6. Иноземцев А.А., Хайрулин В.Т., Тихонов А.С., Самохвалов Н.Ю. Совершенствование методик проектирования современных газовых турбин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2014. № 5(47). Часть 1. С. 139–145.7. Федюк Е.Р. Научная школа С.А. Христиановича в сфере энергетики // Личность. Культура. Общество: Сборник научных статей. Новосибирск, 2010. С. 148–162.8. Schmalzer B.A. Gas Turbine Boom Begins: International Turbomachinery Handbook. 20089. Филиппов С.П., Дильман М.Д. ТЭЦ в России: необходимость технологического обновления // Теплоэнергетика. 2018. № 11. С. 1–18.10. Газовые энергетические турбины GE от 16 до 510 МВт. [Электрон. ресурс] <a href=)
11. Газовые турбины Siemens HL-класса – SGT5-8000HL, SGT5-9000HL и SGT6-9000HL. [Электр. ресурс] <https://politexpert.net/123615-rekord-proizvoditelnosti-siemens-predstavil-sverkhmoshnyy-u-gazovuyu-turbinu>
12. MHI The state-of-the-art J-series gas turbines with a turbine inlet temperature of 1,600 °C. [Электр. ресурс] https://mhi.com>products/energy/gas_turbine.html
13. **Крюгер В.Д., Сорочан И.П., Петреня Ю.К., Лебедев А.С., Симин Н.О., Векшин О.Д., Залетов И.В., Конашков В.А.** Энергетические газотурбинные установки производства ОАО «Силовые машины» // Газотурбинные технологии. 2009. № 3(74). С. 2–8.
14. **Лебедев А.С., Симин Н.О., Петреня Ю.К., Михайлов В.Е.** Проект энергетической газотурбинной установки ГТЭ-65 // Теплоэнергетика. 2008. № 1. С. 46–51.
15. **Кондратьев В.Н., Лебедев А.С., Симин Н.О., Сергеев А.Г.** Газовые турбины «Интертурбо» для блоков ПГУ в России // Электрические станции. 2011. № 7. С. 37–41.
16. **Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л.** Газотурбинные двигатели. Пермь: Изд-во ОАО «Авиадвигатель», 2006. 1204 с.
17. **Лобасов А.С., Абдуракипов С.С., Чикишев Л.М., Дулин В.М., Маркович Д.М.** Исследование формы пламени в нестационарном потоке закрученной турбулентной струи методом НСНО PLIF // Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54. № 6. С. 17–24.
18. **Чикишев Л.М., Дулин В.М., Гобызов О.А., Лобасов А.С., Маркович Д.М.** Исследование смесеобразования в модели камеры сгорания ГТУ с использованием панорамных оптических методов // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24. № 3. С. 357–364.
19. **Markovich D.M., Abdurakipov S.S., Chikishev L.M., Dulin V.M., Hanjalic K.** Comparative analysis of low- and high-swirl confined flames and jets by proper orthogonal and dynamic mode decompositions // Phys. Fluids. 2014. Vol. 26. 065109.
20. **Alekseenko S.V., Dulin V.M., Kozorezov Y.S., Markovich D.M., Shtork S.I., Tokarev M.P.** Flow structure of swirling turbulent propane flames // Flow. Turbul. Combust. 2011. Vol. 87. P. 569–595.
21. **Каблов Е.Н.** Материалы и химические технологии для авиационной техники. – Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520–530.
22. **Голубовский Е.Р., Светлов И.Л., Хвацкий К.К.** Длительная прочность никелевых сплавов для монокристаллических лопаток газотурбинных установок // Конверсия в машиностроении. 2005. № 3. С. 60–64.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПЕТРЕНЯ Юрий Кириллович – доктор физико-математических наук профессор член-корреспондент РАН заместитель генерального директора – технический директор ПАО «Силовые машины»
E-mail: soloveva_na2@power-m.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 30.01.2019

REFERENCES

- [1] International Energy Agency. World Energy Outlook. 2018. URL: <https://webstore.iea.org/world-energy-outlook-2018>
- [2] Fortov V.Ye., Popel O.N. Energetika v sovremennom mire. M.: Izd-vo Intellect, 2011. 168 s. (rus.)
- [3] Petrenya Yu.K. Po zakonam fiziki i ekonomiki. [Electron. resurs] // [https://stimul.online>Intervyu>Po zakonam ekonomiki i fiziki](https://stimul.online>Intervyu>Po-zakonam-ekonomiki-i-fiziki), 2018. (rus.)
- [4] Olkhovskiy G.G., Tumanovskiy A.G. Teploenergeticheskiye tekhnologii v period do 2030 g. *Izvestiya RAN. Energetika*. 2008. № 6. S. 79–94. (rus.)
- [5] Favorskiy O.N., Polishchuk V.L. Vybory teplovoy skhemy i profilya otechestvennoy moshchnoy energeticheskoy GTU novogo pokoleniya i PGU na yeye osnove. *Teploenergetika*. 2010. №2. S. 2. (rus.)
- [6] Inozemtsev A.A., Khayrulin V.T., Tikhonov A.S., Samokhvalov N.Yu. Sovershenstvovaniye metodik proyektirovaniya sovremennykh gazovykh turbin. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*. 2014. № 5(47). Chast 1. S. 139–145. (rus.)
- [7] Fedyuk Ye.R. Nauchnaya shkola S.A. Khristianovicha v sfere energetiki. *Lichnost. Kultura. Obshchestvo: Sbornik nauchnykh statey*. Novosibirsk, 2010. S. 148–162. (rus.)
- [8] Schmalzer B.A. Gas Turbine Boom Begins: International Turbomachinery Handbook. 2008.
- [9] Filippov S.P., Dilman M.D. TETs v Rossii: neobkhodimost tekhnologicheskogo obnoveniya. *Teploenergetika*. 2018. № 11. S. 1–18. (rus.)
- [10] Gazovyye energeticheskiye turbiny GE ot 16 do 510 MVt. [Electron. resurs] URL: <https://ge.com>power/gas/gas-turbines>
- [11] Gazovyye turbiny Siemens HL-klassa – SGT5-8000HL, SGT5-9000HL i SGT6-9000HL. URL: <https://politexpert.net/123615-rekord-proizvoditelnosti-siemens-predstavil-sverkhmoshnyuyu-gazovuyu-turbinu>
- [12] MHI The state-of-the-art J-series gas turbines with a turbine inlet temperature of 1,600 °C. URL: https://mhi.com>products/energy/gas_turbine.html
- [13] Kryuger V.D., Sorochan I.P., Petrenya Yu.K., Lebedev A.S., Simin N.O., Vekshin O.D., Zaletov I.V., Konashkov V.A. Energeticheskiye gazoturbinnyye ustanovki proizvodstva OAO «Silovyye mashiny». *Gazoturbinnyye tekhnologii*. 2009. № 3(74). S. 2–8. (rus.)
- [14] Lebedev A.S., Simin N.O., Petrenya Yu.K., Mikhaylov V.Ye. Proyekt energeticheskoy gazoturbinnoy ustanovki GTE-65. *Teploenergetika*. 2008. № 1. S. 46–51. (rus.)
- [15] Kondratyev V.N., Lebedev A.S., Simin N.O., Sergeyev A.G. Gazovyye turbiny «Interturbo» dlya blokov PGU v Rossii. *Elektricheskiye stantsii*. 2011. № 7. S. 37–41. (rus.)
- [16] Inozemtsev A.A., Sandratskiy V.L. Gazoturbinnyye dvigateli. Perm: Izd-vo OAO «Aviadvigatel», 2006. 1204 s. (rus.)
- [17] Lobasov A.S., Abdurakipov S.S., Chikishev L.M., Dulin V.M., Markovich D.M. Issledovaniye formy plameni v nestatsionarnom potoke zakruchennoy turbulentnoy strui metodom HCHO PLIF. *Fizika goreniya i vzryva*. 2018. T. 54. № 6. S. 17–24. (rus.)
- [18] Chikishev L.M., Dulin V.M., Gobyzyov O.A., Lobasov A.S., Markovich D.M. Issledovaniye smeseobrazovaniya v modeli kamery sgoraniya GTU s ispolzovaniyem panoramnykh opticheskikh metodov. *Teplofizika i Aeromekhanika*. 2017. T. 24. № 3. S. 357–364. (rus.)
- [19] Markovich D.M., Abdurakipov S.S., Chikishev L.M., Dulin V.M., Hanjalić K. Comparative analysis of low- and high-swirl confined flames and jets by proper orthogonal and dynamic mode decompositions. *Phys. Fluids*. 2014. Vol. 26. 065109.
- [20] Alekseenko S.V., Dulin V.M., Kozorezov Y.S., Markovich D.M., Shtork S.I., Tokarev M.P. Flow structure of swirling turbulent propane flames. *Flow. Turbul. Combust.* 2011. Vol. 87. P. 569–595.
- [21] Kablov Ye.N. Materialy i khimicheskiye tekhnologii dlya aviatsionnoy tekhniki. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*. 2012. T. 82, № 6. S. 520–530. (rus.)
- [22] Golubovskiy Ye.R., Svetlov I.L., Khvatkiy K.K. Dlitelnaya prochnost nikelovykh splavov dlya monokristallicheskikh lopatok gazoturbinnyykh ustanovok. *Konversiya v mashinostroyenii*. 2005. № 3. S. 60–64. (rus.)

THE AUTHORS

PETRENYA Yuri K. – PJSC «Power machines»
E-mail: soloveva_na2@power-m.ru

Received: 30.01.2019



DOI: 10.18721/JEST.25102
УДК 621.311.1.018.3

В.Н. Костин, В.А. Сериков

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ

В программном комплексе Multisim выполнено исследование режимов работы системы электропитания 6–10/0,4 кВ, включающей линейную и нелинейную (выпрямитель) нагрузки и конденсаторную батарею на стороне низшего напряжения. Выявлены зависимости величин высших гармоник тока, генерируемых нелинейной нагрузкой, от степени компенсации реактивной мощности и соотношения мощностей линейной и нелинейной нагрузок. Оценена величина суммарного тока, протекающего через конденсаторную батарею, в режимах близких к резонансным. Установлено, что в таких режимах в интервале коммутации тока вентилями появляются апериодическая и колебательная составляющие, а гармоники тока, генерируемые выпрямителем, существенно уменьшаются по сравнению с режимами отсутствия резонанса. Показано, что в резонансных и близких к ним режимах качество напряжения не соответствует нормам. Проведено сравнение результатов моделирования для трехфазной и упрощенной однофазной моделей.

Ключевые слова: высшие гармоники, конденсаторные батареи, компьютерное моделирование, компенсация реактивной мощности, резонансные режимы.

Ссылка при цитировании:

В.Н. Костин, В.А. Сериков. Компьютерное моделирование режимов работы систем электропитания с нелинейной нагрузкой // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 19–29. DOI: 10.18721/JEST.25102.

V.N. Kostin, V.A. Serikov

Saint-Petersburg mining university, St. Petersburg, Russia

COMPUTER SIMULATION OF OPERATING POWER SUPPLY MODES WITH NON LINEAR LOAD

Study on the operating modes of a power supply system: 6–10/0.4 kV, with linear and non-linear (rectifier) loads and a capacitor battery on the low-voltage side, was performed in the Multisim software package. We have found the dependences of the current's higher harmonics, generated by a nonlinear load, on the level of compensation of reactive power and the power ratio of linear and nonlinear loads. The magnitude of the total current flowing through a capacitor battery in near resonance modes is evaluated. It has been established that non-periodic and oscillatory components appear in such modes in the current switching interval by the diodes, and the magnitudes of the current harmonics generated by the rectifier are significantly reduced compared to the absence of resonance modes. It is shown that the quality of the voltage does not correspond to the norms in resonance and near-resonance modes. A comparison of simulation results has been made between three-phase and simplified single-phase models.

Keywords: harmonics, capacitor batteries, computer simulation, compensation of reactive power, resonance mode.

Citation:

V.N. Kostin, V.A. Serikov, Computer simulation of operating power supply modes with non linear load, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 19–29, DOI: 10.18721/JEST.25102.

Введение

Электромагнитная совместимость и качество электроэнергии в системах электроснабжения — важная проблема современной электроэнергетики. От ее решения зависит повышение эффективности использования электрической энергии и надежности электроснабжения потребителей.

Практика работы промышленных предприятий [3, 13, 15, 16], а в настоящее время и крупных административных зданий, офисов и бизнес-центров [11, 12, 20] показывает, что сети электроснабжения напряжением 0,4 кВ насыщены высшими гармониками вследствие широкого использования в промышленности и городских электрических сетях низкого напряжения полупроводниковых преобразователей, искажающих ток и напряжение в сети и негативно влияющих на работу всего электрооборудования системы электроснабжения, особенно на конденсаторы.

Батареи конденсаторов, используемые для компенсации реактивной мощности и работающие при несинусоидальном напряжении, в ряде случаев выходят из строя из-за токовой перегрузки высшими гармониками. Наибольшая перегрузка конденсаторов возникает, когда индуктивность сети и емкость батареи образуют резонансный контур для одной из высших гармоник тока.

Исследованию высших гармоник в системах электроснабжения посвящено много работ, в большинстве которых анализируются процессы растекания гармонических токов в упрощенной однофазной схеме, причем каждая высшая гармоника представляется источником тока бесконечной мощности, т. е. неизменной величиной [2, 6–8, 10]. В работах [4, 5, 9, 13] рассматриваются трехфазные схемы, однако и в них каждая гармоника моделируется тремя сдвинутыми по фазе источниками тока соответствующей частоты.

Авторам не известны работы, в которых бы рассматривались процессы формирования, изменения по величине и растекания токов выс-

ших гармоник в трехфазной системе электроснабжения с вентильным преобразователем — непосредственным источником этих гармоник.

Цель представляемой работы — получение основных количественных соотношений для гармонических токов с оценкой их негативного воздействия на оборудование системы электроснабжения с линейной и нелинейной (выпрямитель) нагрузками и конденсаторной батареей.

В качестве инструмента исследования принято компьютерное моделирование процессов в системе электроснабжения, представляемой как трехфазной, так и однофазной моделями.

Расчетные схемы

Рассмотрена схема электроснабжения, включающая трансформатор 6–10/0,4 кВ, работающий на линейную и нелинейную нагрузки и конденсаторную батарею для компенсации реактивной мощности линейной нагрузки. Исследование режима работы рассматриваемой системы электроснабжения выполнялось в программном комплексе промышленного стандарта Multisim, который обладает интерактивной схемотехнической средой для мгновенной визуализации и анализа режима электрических и электронных схем и интуитивно понятным интерфейсом.

Расчетные схемы в трехфазном и однофазном исполнении приведены на рис. 1. В схеме рис. 1, а трансформатор моделировался тремя фазными напряжениями V и активно-индуктивными сопротивлениями $L_T R_T$, линейная нагрузка — активно-индуктивными сопротивлениями $L_n R_n$, нелинейная нагрузка — мостовым диодным выпрямителем $D1–D6$ с сопротивлением нагрузки R_d и сглаживающим дросселем L_d , конденсаторная батарея — емкостями C_k .

В однофазной схеме [2, 6–8, 10] задавались величина тока n -й гармоники I_n , сопротивления фазы трансформатора $L_T R_T$ и линейной нагрузки $L_n R_n$, емкость фазы конденсаторной батареи C_k .

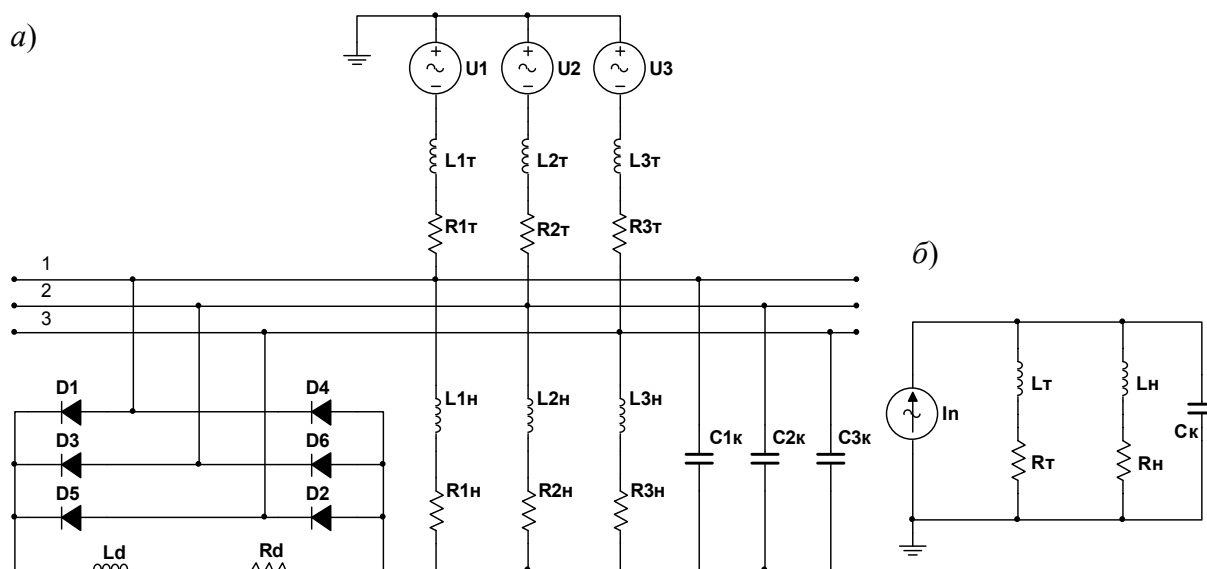


Рис. 1. Трехфазная (а) и однофазная (б) модели схемы электроснабжения в Multisim
Fig. 1. Three-phase (a) and single-phase (b) power supply circuit models in Multisim

Исследования проводились для типового ряда мощностей трансформаторов 6–10/0,4 кВ: 250, 400, ... 2500 кВ·А. Для разных трансформаторов результаты моделирования качественно не отличались. Некоторое количественное различие результатов было обусловлено изменением напряжения короткого замыкания U_k от 4,5 до 6 % при увеличении номинальной мощности трансформатора.

Ниже приводятся результаты моделирования для трансформатора номинальной мощности $S_{T\text{ном}} = 1000$ кВ·А ($U = 230$ В, $L_T = 28$ мкГн, $R_T = 2$ мОм). Для обобщенности результатов моделирования все регулируемые мощности представлены в относительных единицах по отношению к номинальной мощности трансформатора: мощность нелинейной нагрузки $P_d^* = P_d / S_{T\text{ном}}$; мощность линейной нагрузки $S_H^* = S_H / S_{T\text{ном}}$; мощность конденсаторной батареи $Q_K^* = Q_K / S_{T\text{ном}}$.

Гармоники тока, генерируемые выпрямителем

Основу вентильных преобразователей (выпрямители, инверторы, преобразователи частоты и др.) составляют полупроводниковые приборы (вентили), являющиеся нелинейны-

ми элементами. Переключения (коммутации) вентилей при нормальной работе преобразователя вызывают потребление из питающей сети несинусоидального тока, вследствие чего происходит искажение синусоидальности напряжения сети [17, 19].

При идеально сглаженном выпрямленном токе I_d на выходе выпрямителя форма фазного тока i на его входе близка к прямоугольной с интервалом проводимости 120° в течение одного полупериода промышленной частоты. Разложение такой зависимости в ряд Фурье дает выражение

$$i = \frac{2\sqrt{3}I_d}{\pi} \left[\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \dots \right], \quad (1)$$

из которого видно, что, кроме основной (первой) гармоники с частотой питающей сети ω , фазный ток содержит высшие гармоники порядка $n = 6k \pm 1$, где $k = 1, 2, \dots$ Такие гармоники называются каноническими.

Для инженерных расчетов, например по схеме рис. 1, б, амплитуда n -й гармоники в соответствии с выражением (1) может, как это

принято в [2, 3, 10] задаваться величиной $I_n = I_1/n$, где I_1 – амплитуда первой гармоники. Однако при увеличении нагрузки выпрямителя форма фазного тока становится ближе к трапецеидальной вследствие увеличения интервала коммутации тока. Следовательно, амплитуды высших гармоник тока меняются по величине.

Исследование влияния длительности γ интервала коммутации на величины амплитуд гармоник выполнено в [3], где на основании достаточно сложных формул построены зависимости $I_n = f(\gamma)$.

На практике, как правило, задается или известна нагрузка выпрямителя. Поэтому по схеме рис. 1, а выполнено исследование зависимости величин высших гармоник тока от нагрузки выпрямителя.

При изменении нагрузок P_d^* и S_n^* снимались осциллограммы фазного тока на входе выпрямителя с дальнейшим автоматическим разложением в программной среде Multisim кривой этого тока в ряд Фурье.

В результате компьютерного моделирования установлено, что при изменении нелинейной нагрузки трансформатора P_d^* от 0 до 1 относительные амплитуды гармоник $I_n^* = I_n/I_1$ практически линейно уменьшаются:

- 5-я гармоника на 10% (от 0,2 до 0,18);
- 7-я гармоника на 15 % (от 0,14 до 0,12);
- 11-я гармоника на 40 % (от 0,09 до 0,06);
- 13-я гармоника на 50% (от 0,077 до 0,034).

В указанном диапазоне изменения нелинейной нагрузки подключение линейной нагрузки S_n^* практически не изменяло величины высших гармоник. Незначительное отличие было обусловлено некоторым снижением напряжения на выходе трансформатора при подключении линейной нагрузки.

Таким образом, для получения более точных результатов моделирования процессов в схеме рис. 1, б следует учитывать зависимость амплитуды высших гармоник тока от нагрузки выпрямителя.

Влияние выпрямителя на качество напряжения питающей сети

Оценка влияния нелинейной нагрузки на качество напряжения питающей сети выполнялась по трехфазной схеме (рис. 1, а) при отключенной конденсаторной батарее C_k . Изменялись мощности нелинейной нагрузки (сопротивление R_d) и линейной нагрузки (параметры L_n, R_n). Оценивался суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U , автоматически определяемый в программной среде Multisim после разложения в ряд Фурье периодической кривой фазного напряжения на выходе трансформатора.

В соответствии с ГОСТ 32144-2013 значения K_U , усредненные на интервалах времени 10 мин., не должны превышать 8 % в течение 95 % времени за одну неделю и 12 % в течение 100 % времени также за одну неделю.

Результаты моделирования сведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние нелинейной нагрузки P_d^* на коэффициент K_U гармонических искажений напряжения на выходе трансформатора

Table 1

Influence of non-linear loads P_d^* at the value higher harmonic K_U of the low-voltage side of transformation

P_d^*	При отсутствии линейной нагрузки ($S_n = 0$)	При полной нагрузке трансформатора нелинейной и линейной нагрузками	
	$K_U, \%$	$S_n^*, \text{о.е.}$ (при $\cos \varphi_n = 0,85$)	$K_U, \%$
1	10,25	0	10,25
0,75	9,1	0,25	9,2
0,66	7,15	0,33	7,65
0,5	6,3	0,5	6,75
0,25	3,6	0,75	3,95

Как видно из табл. 1, при нагрузке трансформатора только нелинейной нагрузкой требования к качеству напряжения выполняются при нагрузке примерно до 70 %.



Таблица 2

Мощности Q_k конденсаторных батарей, вызывающие резонанс на гармониках n

Table 2

Capacitor Q_k batteries power causing resonance for harmonics n

$S_{\text{ТНОМ}}, \text{кВ}\cdot\text{А}$	$U_k, \%$	$Q_k^*, \text{о.е.}$					
		$n = 5$	$n = 7$	$n = 11$	$n = 13$	$n = 17$	$n = 19$
250 и 400	4,5	0,89	0,45	0,18	0,13	0,08	0,06
630 и 1000	5,5	0,73	0,37	0,15	0,11	0,06	0,05
1600 и 2500	6,0	0,67	0,34	0,14	0,10	0,06	0,05

Соотношение нелинейной и линейной нагрузок при полной загрузке трансформатора изменялось. Видно небольшое увеличение коэффициента K_U при введении линейной нагрузки, что, по-видимому, объясняется некоторым уменьшением первой гармоники напряжения при увеличении нагрузки трансформатора. Однако и в этом случае требования к качеству напряжения выполняются при величине нелинейной нагрузки, не превышающей 70 %.

Перегрузки конденсаторов от высших гармоник

Известно, что компенсация реактивной мощности позволяет снизить потери напряжения и мощности в системах электроснабжения. Чаще всего компенсация выполняется подключением параллельно линейной нагрузке конденсаторных батарей. Однако в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой такая компенсация создает ряд проблем [1, 18, 20]: искажение формы питающего напряжения; резонансные явления на частотах высших гармоник, приводящие к токовой перегрузке конденсаторов; дополнительные потери напряжения и мощности в трансформаторах, кабелях распределительной сети и электрических машинах; вибрацию электрических машин и др.

Далее основное внимание уделено оценке величин высших гармоник тока, анализу резонансных явлений на частотах высших гармоник и токовой перегрузке конденсаторных батарей.

По выражению

$$Q^* = \frac{100}{U_k[\%] \cdot n^2} \quad (2)$$

рассчитаны в относительных единицах мощности конденсаторных батарей, при которых возникает резонансный режим для канонических гармоник $n = 6k \pm 1$. Индуктивности системы, питающей трансформатор, и кабельных связей напряжением 0,4 кВ не учитывались. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Различие значений Q_k^* для приведенной шкалы номинальных мощностей трансформаторов обусловлено возрастающими с мощностью значениями напряжения короткого замыкания U_k .

Очевидно, что конденсаторные батареи, близкие по мощности к Q_k , указанным в табл. 2, нецелесообразно устанавливать для компенсации реактивной мощности. При необходимости же установки конденсаторной батареи, близкой по мощности к указанным в табл. 2 Q_k , следует использовать конденсаторные установки с защитными антирезонансными дросселями [14].

Следует отметить, что в рассматриваемой схеме электроснабжения в соответствии с табл. 2 резонансные явления на 5-й гармонике практически невозможны, поскольку мощность конденсаторных батарей, как правило, не принимается равной 67 % и более от номинальной мощности трансформатора. Резонанс на 7-й гармонике маловероятен, т. к. здесь «опасная» мощность батареи составляет от 34

до 45 % мощности трансформатора. А вот появление резонанса на 11-й и более высоких гармониках имеет большую вероятность, поскольку «опасная» мощность батареи здесь не превышает 20 % мощности трансформатора.

В результате компьютерного моделирования по схеме рис. 1, а установлено, что в режимах работы на нелинейную нагрузку, близких к резонансному, суммарный ток, протекающий через конденсаторы, может в два и более раза превышать их номинальный ток (коэффициент перегрузки $K_{пер} > 2$), а амплитуды токов высших гармоник могут превышать амплитуду тока основной гармоники.

В качестве примера на рис. 2 приведены осциллограмма тока через конденсаторы при резонансе на 11-й гармонике ($P_d^* = 0,25$; $S_n^* = 0,25$; $\cos\varphi = 0,85$; $Q_k^* = 0,15$) и диаграмма разложения в ряд Фурье тока в конденсаторной батарее. Видно, что амплитуда тока 11-й гармоники более чем в 1,5 раза превышает амплитуду тока основной гармоники.

В табл. 3 приведены результаты моделирования гармоник тока, генерируемых выпрямителем и протекающих через конденсаторную батарею при резонансе на 13-й гармонике ($P_d^* = 0,4$; $S_n^* = 0,3$; $\cos\varphi = 0,85$; $Q_k^* = 0,11$). Видно, что токовая перегрузка конденсаторов недопустима.

Результаты моделирования показали, что при значениях $Q_k^* < 0,1$ практически не удается уйти от резонансных явлений на частотах 13-й гармоники и выше. Такая ситуация может сло-

житься при выборе для компенсации реактивной мощности широко применяемых в системах электроснабжения ступенчато регулируемых конденсаторных батарей. При уменьшении линейной нагрузки, например в ночное время, часть ступеней батареи отключается и ее мощность уменьшается до величины, приводящей к резонансу на 13-й и более высоких гармониках. Как показали результаты моделирования, при уменьшении мощности конденсаторной батареи до $Q_k^* = 0,025-0,05$ суммарный ток через конденсаторы может в три и более раз превышать их номинальный ток ($K_{пер} > 3$). Очевидно, что в таких случаях необходимо применять конденсаторные батареи с антирезонансными дросселями [14].

Влияние резонанса на процесс коммутации тока, величины гармоник выпрямителя и качество напряжения

Результаты моделирования по трехфазной модели показали, что в резонансных и близких к ним режимах относительные амплитуды высших гармоник тока, генерируемых выпрямителем (см. табл. 3), заметно меньше величин $I_n^* = I_n / I_1$, получаемых по выражению (1), которые обычно принимают в технической литературе при расчетах гармоник тока в конденсаторах по однофазной схеме [2, 3, 10]. Такое уменьшение нельзя объяснить снижением амплитуды гармоник с увеличением нагрузки выпрямителя при отсутствии конденсаторных батарей.

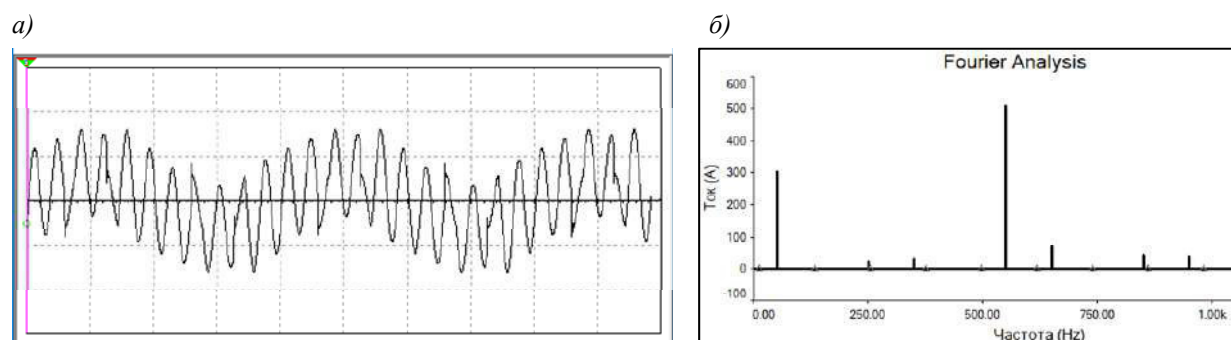


Рис. 2. Ток через конденсаторы при резонансе на 11-й гармонике (а) и его гармонический состав (б)
Fig. 2. Current through capacitors at resonance at the 11th harmonic (a) and its harmonic composition (b)



Таблица 3

Гармоники тока выпрямителя и тока конденсаторной батареи, мощность которой вызывает резонанс на 13-й гармонике*

Table 3

The currents harmonics of the rectifier and capacitor battery, whose power cause resonance at the 13th harmonic

n	Амплитуды гармоник тока выпрямителя		Амплитуды гармоник тока конденсаторной батареи		I_{Σ} , А	$K_{пер}$, о.е.
	А	о. е.**	А	о. е.**		
1	840	1	210	1	341	2,18
5	135	0,16	23	0,11		
7	76	0,09	30	0,14		
11	29	0,034	60	0,27		
13	25	0,03	400	1,9		

* $I_{\Sigma \text{ ном}} = 156 \text{ А}$

** За 1 о.е. принята величина 1-й гармоники

Для оценки влияния резонанса на величины гармоник тока, генерируемых выпрямителем, по результатам компьютерного моделирования (схема рис. 1, а) были построены

зависимости $I_n/I_1 = f(Q_k^*)$. На рис. 3 такая зависимость приведена для $P_d^* = 0,3$ в отсутствие линейной нагрузки ($S_n = 0$). Видно, что при резонансе на каждой гармонике тока наблюдается «провал» всех гармоник. Как показали результаты моделирования, линейная нагрузка ($S_n \neq 0$) незначительно уменьшает величину этих «провалов» и несколько сдвигает их вправо вследствие уменьшения эквивалентной индуктивности трансформатора и линейной нагрузки.

Уменьшение величин высших гармоник тока, генерируемых выпрямителем при резонансных режимах, связано, вероятно, с изменением формы тока в интервале его коммутации при переключении вентилей выпрямителя. На рис. 4 приведены осциллограммы переходных процессов в интервале проводимости одного вентиля моста в течение одного полупериода основной частоты. Включение очередного вентиля начинается при изменении на положительный знака линейного приложенного к нему напряжения (черные лучи осциллограммы а и верхних осциллограмм б и в).

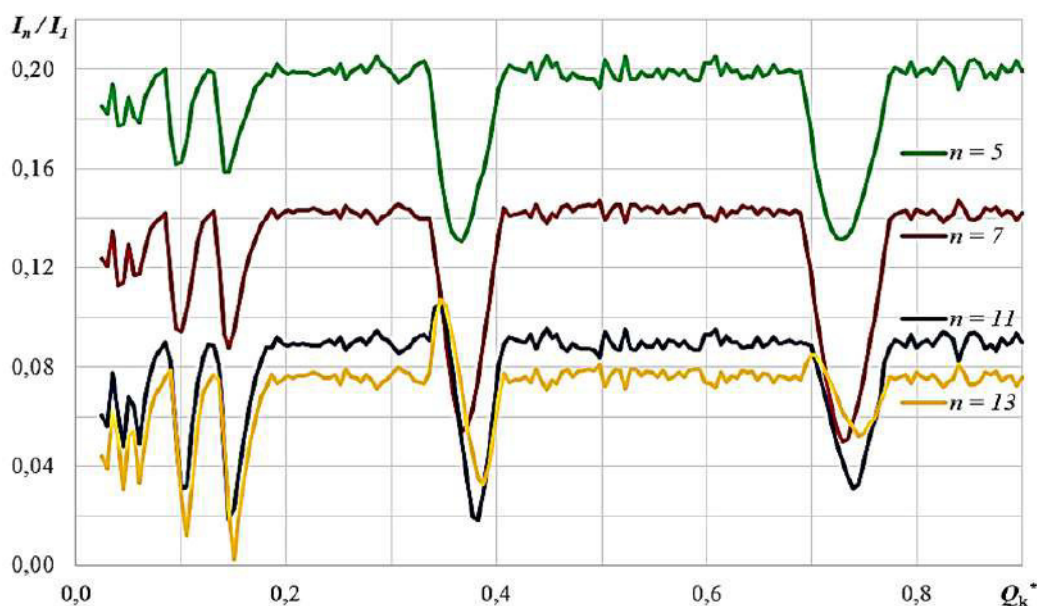


Рис. 3. Зависимости амплитуд гармоник тока от мощности батареи конденсаторов Q_k^*

Fig. 3. Dependencies of current harmonic amplitudes on batteries power

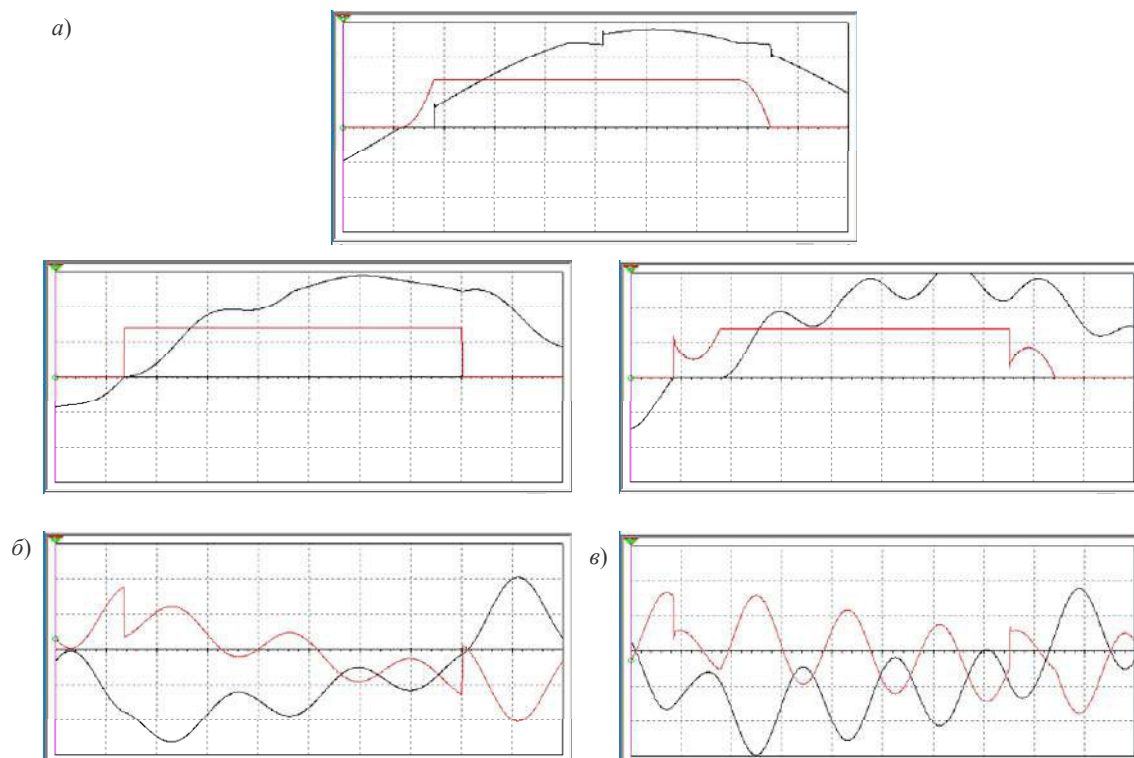


Рис. 4. Влияние мощности конденсаторной батареи на процесс коммутации тока:

$a - Q_k^* = 0; \gamma \approx 0,5$ мс; $b - Q_k^* = 0,25; \gamma \approx 0$ мкс; $v - Q_k^* = 0,15; \gamma \approx 1$ мс (резонанс на 11-й гармонике)

Fig. 4. The effect of capacitor bank power on the current switching process:

$a - Q_k^* = 0; \gamma \approx 0,5$ мс; $b - Q_k^* = 0,25; \gamma \approx 0$ мкс; $v - Q_k^* = 0,15; \gamma \approx 1$ мс (resonance on the 11th harmonic)

При отсутствии конденсаторной батареи форма тока близка к трапеции (осциллограмма a). Интервал коммутации тока I_d вентилями выпрямителя — $\gamma \approx 0,5$ мс. Длительность этого интервала при заданном токе I_d обусловлена величиной индуктивности L_T трансформатора [3]:

$$\cos \gamma = 1 - \frac{2\omega L_m I_d}{\sqrt{6}U}, \quad (3)$$

где $\omega = 2\pi f = 314$; U — фазное напряжение трансформатора.

При подключении батареи, но отсутствии резонанса интервал коммутации γ уменьшается практически до нулевого значения (см. верхнюю осциллограмму b). На нижней осциллограмме b красный луч соответствует фазному току конденсаторной батареи, а черный луч — напряжению на этой фазе. Видно,

что интервал коммутации γ здесь определяется лишь постоянной времени цепи конденсаторной батареи.

При резонансе и близких к нему режимах процесс коммутации затягивается до $\gamma \approx 1$ мс из-за колебания резонирующей гармоники (см. осциллограммы v), ток занимает большую, чем в предыдущих двух случаях, часть полупериода и его форма становится ближе к синусоидальной. Разложение такой формы тока в ряд Фурье показывает уменьшение величин высших гармоник, генерируемых выпрямителем, по сравнению с предыдущими случаями.

По результатам моделирования установлено, что линейная нагрузка не влияет на форму фазного тока на входе выпрямителя.

Следует отметить, что в режимах близких к резонансному заметно ухудшается качество



напряжения питающей сети. Так, при $P_d^* = 0,4$; $S_n^* = 0,3$; $\cos\varphi = 0,85$ и резонансах на 13-й, 11-й, 7-й и 5-й гармониках тока коэффициент несинусоидальности напряжения K_U на выходе трансформатора достигает соответственно 15, 18, 20 и 25 %. Следовательно, в резонансных и близких к ним режимах требования ГОСТ к качеству напряжения не выполняются.

Сравнение трехфазной и однофазной схем

При сопоставлении результатов компьютерного моделирования процессов в трехфазной и однофазной схемах (рис. 1) основное внимание было уделено величинам токов, протекающих через конденсаторы, при отсутствии резонанса, режимах близких к резонансу и в резонансных режимах.

Очевидным преимуществом моделирования в среде Multisim трехфазной схемы является возможность оценки суммарного тока I_{Σ} , протекающего через конденсаторную батарею, и его гармонических составляющих благодаря автоматическому разложению формы этого тока в ряд Фурье.

В однофазной схеме моделирование выполняется для отдельной высшей гармоники тока ($n = 5, 7, 11, 13 \dots$) или их суммы при параллельном включении источников тока I_n в схеме рис. 1, б. Однако суммарный ток через конденсаторы I_{Σ} здесь не определить ввиду невозможности моделирования в этой схеме первой гармоники тока, протекающей через конденсаторы.

В режимах между резонансами — при $Q_k^* \approx 0,55$ и $Q_k^* \approx 0,25$ (см. рис. 3) — однофазная схема с заданием n -й гармоники источником тока $I_n = I_1 / n$ и трехфазная схема по этой же гармонике дают хорошее совпадение результатов моделирования.

В режимах резонанса и близких к ним однофазная схема с заданием высшей гармоники источником тока $I_n = I_1 / n$ дает результат, в разы превышающий таковой для этой гармо-

ники в трехфазной схеме. Это объясняется неучетом «провала» гармоник в режимах резонанса и близких к ним. В частности, для случая рис. 4, в моделирование процессов в однофазной схеме с заданием 11-й гармоники источником тока $I_{11} = I_1 / 11$ и в трехфазной схеме дало трехкратное различие величин тока через конденсаторную батарею.

Таким образом, совпадение результатов моделирования высших гармоник тока через конденсаторную батарею в однофазной и трехфазной схемах зависит от того, насколько точно задана величина n -й гармоники в однофазной схеме по отношению к этой гармонике, генерируемой выпрямителем в трехфазной схеме.

Заключение

На основе компьютерного моделирования в программном комплексе Multisim получены основные количественные соотношения для гармонических токов в трехфазной модели системы электроснабжения с линейной и нелинейной (трехфазный мостовой выпрямитель) нагрузками и конденсаторной батареей.

В резонансных и близких к ним режимах: оценены возможные перегрузки конденсаторных батарей;

показано, что качество напряжения питающей сети не соответствует требованиям ГОСТ;

установлено, что в интервале коммутации тока вентилями появляются апериодическая и колебательная составляющие, а величины гармоник тока, генерируемых нелинейной нагрузкой, существенно уменьшаются по сравнению с режимами отсутствия резонанса.

Показано, что в резонансных и близких к ним режимах однофазная компьютерная модель дает существенно большее значение резонирующей гармоники тока через конденсаторную батарею, чем трехфазная модель, которая, по-видимому, более достоверно отражает реальную схему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арриллага Д., Бредли Д., Боджер П.М. Гармоники в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
2. Добуш В.С. Особенности возникновения высших гармоник в электрических сетях // Современная техника и технологии. 2015. № 5. [Электронный ресурс]. URL: <http://technology.snauka.ru/2015/05/6851> (дата обращения: 24.08.2018).
3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
4. Коваленко Д.В., Плотников Д.И., Шакенов Е.Е., Кулинич И.О. Негативное воздействие токов высших гармоник на элементы системы электроснабжения // Молодой ученый. 2016. № 28. С. 102–105.
5. Коваленко Д.В. Применение пассивных фильтров для компенсации высших гармоник тока в системах электроснабжения промышленных предприятий // Молодой ученый. 2016. № 19. С. 72–76.
6. Коваленко Д.В. Определение резонансной частоты системы электроснабжения при изменении степени компенсации реактивной мощности и наличии высших гармоник // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 8 (часть 1). С. 16–21.
7. Коваленко Д.В., Киселев Б.Ю., Плотников Д.И., Шакенов Е.Е., Кулинич И.О. Методика расчета пассивных фильтров, предназначенных для компенсации высших гармоник в системах электроснабжения промышленных предприятий // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 1 (55), часть 4. С. 82–86.
8. Коваленко Д.В., Файер Л.А., Киселев Б.Ю., Шепелев О.А., Смирнов П.С., Суровцев В.И. Моделирование резонанса токов на высших гармониках при нестационарном режиме работы системы электроснабжения // Омский научный вестник. 2018. № 2. С. 64–69.
9. Сбитнев Е.А., Осокин В.Л. Моделирование параметров электрической сети сельскохозяйственного предприятия в среде MATLAB // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 8 (154). С. 171–177.
10. Скамын А.Н., Шклярский А.Я. Компенсация реактивной мощности с учетом генерирования высших гармоник сторонними потребителями // Труды МНТК Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики. СПб.: Изд-во Горного университета, 2017. С. 211–215.
11. Темербаев С.А., Боярская Н.П., Довгун В.П., Колмакова В.О. Анализ качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2013. № 6, С. 107–120.
12. Тульский В.Н., Карташев И.И., Симуткин М.Г., Насыров Р.Р. Влияние высших гармоник тока на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В // Промышленная энергетика. 2013. № 5. С. 42–47.
13. Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. Киев: Наукова думка, 2005. 210 с.
14. Шишкин С. Защитные антирезонансные дроссели низковольтных конденсаторных батарей // Силовая электроника. 2007. № 4. [Электронный ресурс]. URL: http://www.power-e.ru/2007_4_18.php (дата обращения: 24.05.2018).
15. Шклярский Я.Э., Скамын А.Н. Проблемы высших гармоник в сетях промышленных предприятий // Электротехника и электромеханика. 2013. № 1. С. 69–71.
16. Шклярский Я.Э., Скамын А.Н. Вопросы компенсации реактивной мощности при наличии высших гармоник на коксохимическом производстве // Кокс и химия. 2016, № 4. С. 44–49.
17. Dugan R.C., McGranaghan M.F., Beaty H.W. Electrical Power Systems Quality. McGraw-Hill, 1996. 265 p.
18. Harmonic Disturbances in Networks and Their Treatment // Cahier Technique Schneider Electric, № 152. 25 p.
19. Russel B.D., Harvey S.M., Nilsson S.I. Substation electromagnetic interference. Part. 1 // IEEE Trans. on power apparatus and systems. 1994. № 7. P. 1863–1870.
20. Yacamini R. Power System Harmonics. Part 3. Problems caused by distorted supplies // Power Engineering Journal. Oct., 1995. P. 233–238.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОСТИН Владимир Николаевич — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского горного университета
 E-mail: kostin_vn@mail.ru
СЕРИКОВ Владимир Александрович — студент Санкт-Петербургского горного университета
 E-mail: serikov.va@bk.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 17.10.2018



REFERENCES

- [1] Arrillaga D., Bredli D., Bodzher P.M. *Garmoniki v elektricheskikh sistemakh*. M.: Energoatomizdat, 1990. 320 s.
- [2] Dobush V.S. Osobennosti vozniknoveniya vysshikh garmonik v elektricheskikh setyakh. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii*. 2015. № 5. [Elektronnyy resurs]. URL: <http://technology.snauka.ru/2015/05/6851> (data obrashcheniya: 24.08.2018). (rus.)
- [3] Zhezhelanko I.V. Vysshiye garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy. M.: Energoatomizdat, 2000. 331 s. (rus.)
- [4] Kovalenko D.V., Plotnikov D.I., Shakenov Ye.Ye., Kulinich I.O. Negativnoye vozdeystviye tokov vysshikh garmonik na elementy sistemy elektrosnabzheniya. *Molodoy uchenyy*. 2016. № 28. S. 102–105. (rus.)
- [5] Kovalenko D.V. Primeneniye passivnykh filtrov dlya kompensatsii vysshikh garmonik toka v sistemakh elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy. *Molodoy uchenyy*. 2016. № 19. S. 72–76. (rus.)
- [6] Kovalenko D.V. Opredeleniye rezonansnoy chastoty sistemy elektrosnabzheniya pri izmenenii stepeni kompensatsii reaktivnoy moshchnosti i nalichii vysshikh garmonik. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*. 2017. № 8 (chast 1). S. 16–21. (rus.)
- [7] Kovalenko D.V., Kiselev B.Yu., Plotnikov D.I., Shakenov Ye.Ye., Kulinich I.O. Metodika rascheta passivnykh filtrov, prednaznachennykh dlya kompensatsii vysshikh garmonik v sistemakh elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2017. № 1 (55), chast 4. S. 82–86. (rus.)
- [8] Kovalenko D.V., Fayer L.A., Kiselev B.Yu., Shepelev O.A., Smirnov P.S., Surovtsev V.I. Modelirovaniye rezonansa tokov na vysshikh garmonikakh pri nestatsionarnom rezhime raboty sistemy elektrosnabzheniya. *Omskiy nauchnyy vestnik*. 2018. № 2. S. 64–69. (rus.)
- [9] Sbitnev Ye.A., Osokin V.L. Modelirovaniye parametrov elektricheskoy seti selskokhozyaystvennogo predpriyatiya v srede MATLAB. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2017. № 8 (154). S. 171–177. (rus.)
- [10] Skamin A.N., Shklyarskiy A.Ya. Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti s uchetom generirovaniya vysshikh garmonik storonnimi potrebitelyami. *Trudy MNTK Innovatsii i perspektivy razvitiya gornogo mashinostroyeniya i elektromekhaniki*. SPb.: Izd-vo Gornogo universiteta. 2017. S. 211–215. (rus.)
- [11] Temerbayev S.A., Boyarskaya N.P., Dovgun V.P., Kolmakova V.O. Analiz kachestva elektroenergii v gorodskikh raspredelitelnykh setyakh 0,4 kV. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2013. № 6. C. 107–120. (rus.)
- [12] Tulskey V.N., Kartashev I.I., Simutkin M.G., Nasyrov R.R. Vliyaniye vysshikh garmonik toka na rezhimy raboty kabeley raspredelitel'noy seti 380 V. *Promyshlennaya energetika*. 2013. № 5. S. 42–47. (rus.)
- [13] Shidlovskiy A.K., Zharkin A.F. Vysshiye garmoniki v nizkovoltnykh elektricheskikh setyakh. Kiyev: Naukova dumka, 2005. 210 s.
- [14] Shishkin S. Zashchitnyye antirezonsantnyye drosseli nizkovoltnykh kondensatornykh batarey. *Silovaya elektronika*. 2007. № 4. [Elektronnyy resurs]. URL: http://www.power-e.ru/2007_4_18.php (data obrashcheniya: 24.05.2018). (rus.)
- [15] Shklyarskiy Ya.E., Skamin A.N. Problemy vysshikh garmonik v setyakh promyshlennykh predpriyatiy. *Yelektrotekhnika i yelektromekhanika*. 2013. № 1. S. 69–71. (rus.)
- [16] Shklyarskiy Ya.E., Skamin A.N. Voprosy kompensatsii reaktivnoy moshchnosti pri nalichii vysshikh garmonik na koksokhimicheskom proizvodstve. *Koks i khimiya*. 2016. № 4. S. 44–49. (rus.)
- [17] Dugan R.C., McGranaghan M.F., Beaty H.W. *Electrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill, 1996. 265 p.
- [18] Harmonic Disturbances in Networks and Their Treatment. *Cahier Technique Schneider Electric*, № 152. 25 p.
- [19] Russel B.D., Harvey S.M., Nilsson S.I. Substation electromagnetic interference. Part. 1. *IEEE Trans. on power apparatus and systems*. 1994. № 7. P. 1863–1870.
- [20] Yacamini R. Power System Harmonics. Part 3. Problems caused by distorted supplies. *Power Engineering Journal*. Oct., 1995. P. 233–238.

THE AUTHORS

KOSTIN Vladimir N. — Saint-Petersburg mining university

E-mail: kostin_vn@mail.ru

SERIKOV Vladimir A. — Saint-Petersburg mining university

E-mail: serikov.va@bk.ru

Received: 17.10.2018

DOI: 10.18721/JEST.25103
УДК 81.29.14

В.С. Ключаров, Н.К. Никулин, Е.В. Свичкарь

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(Национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЛЕКУЛЯРНО-ВЯЗКОСТНЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

В работе рассмотрены составляющие энергетических затрат высоковакуумных насосов, к которым относятся и молекулярно-вязкостные вакуумные насосы, являющиеся новой разработкой. Принцип действия молекулярно-вязкостных насосов позволяет им работать в широком диапазоне давлений, начиная с высокого вакуума и заканчивая низким. При повышении диапазона рабочих давлений, создаваемых насосом, как правило, происходит существенное увеличение мощности, потребляемой электродвигателем насоса. На данный момент не существует данных об энергетических затратах этих насосов. Анализ условий работы молекулярно-вязкостного вакуумного насоса в разных диапазонах давлений позволил выявить основные факторы, влияющие на изменение мощности, а также способы ее снижения, например за счет перераспределения нагрузки в ступенях многоступенчатых конструкций насосов, изменения длин ступеней, скоростей вращения роторов насоса. Снижение энергетических затрат насоса позволит уменьшить потребление электроэнергии, себестоимость насосов, повысить эффективность их работы.

Ключевые слова: молекулярно-вязкостный вакуумный насос, энергетическая характеристика, мощность, регулирование скорости двигателя.

Ссылка при цитировании:

В.С. Ключаров, Н.К. Никулин, Е.В. Свичкарь. Энергетические характеристики молекулярно-вязкостных вакуумных насосов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 30–39. DOI: 10.18721/JEST.25103.

V.S. Klyucharov, N.K. Nikulin, E.V. Svichkar

Bauman Moscow State technical university, Moscow, Russia

ENERGY CHARACTERISTICS OF MOLECULAR-VISCOUS VACUUM PUMPS

The paper discusses the components of energy costs for high-vacuum pumps, which also include molecular-viscous vacuum pumps, which are a new modern development. The principle of operation of molecular-viscous pumps allows them to operate in a wide pressure range, i.e., from high vacuum through to low. Due to changes in the range of operating pressures generated by the pump, there is a significant increase in the power of the pump motor (typically with an increase in pressure). At the moment there is no data about the energy consumption of these pumps. Analysis of the working conditions of the molecular-viscous vacuum pump in various ranges of pressures helped to identify the main factors influencing the change in the power and measures for decreasing it, for example, by redistribution of loads in the stages of multistage pumps, change of step lengths, rotation speeds of pump rotors. Reducing the energy costs of the pump will reduce the power consumption and cost of pumps, improving their operational efficiency.

Keywords: molecular-viscous vacuum pump, power characteristic, power, speed regulation of the engine.

Citation:

V.S. Klyucharov, N.K. Nikulin, E.V. Svichkar, Energy characteristics of molecular-viscous vacuum pumps, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 30–39, DOI: 10.18721/JEST.25103.



Актуальность совершенствования существующих и создания новых средств откачки

Одна из наиболее актуальных задач развития и совершенствования вакуумных систем — обеспечение безмасляности технологического процесса, что достигается использованием вакуумного оборудования, соответствующего данному условию. Поэтому постоянно совершенствуются существующие вакуумные насосы, которые являются одним из основных источников паров углеводородов, способных загрязнить откачиваемые объемы. Например, подшипниковые узлы турбомолекулярных насосов (ТМН), в которых использовались подшипники качения, работающие с жидкой смазкой, заменены на подшипниковые узлы с керамическими подшипниками на консистентной вакуумной смазке либо на газовые и магнитные опоры. Такое решение позволяет улучшать конструктивные параметры современных турбомолекулярных насосов [1–5]. Параллельно с совершенствованием конструкций вакуумных насосов добиваются улучшения и расширения диапазонов откачных параметров насосов. Для этого в комбинированные турбомолекулярные вакуумные насосы устанавливают дополнительные форвакуумные ступени, как правило, молекулярные, вихревые и молекулярно-вязкостные проточные части [6–13]. В результате в последних колесах турбомолекулярной проточной части снижена вероятность нарушения молекулярного режима течения газа, увеличены диапазон рабочих давлений всего насоса и давление газа в форвакуумной области, что позволяет снизить требования к форвакуумной системе откачки. Наиболее часто производители комбинированных ТМН используют молекулярные проточные части, которые могут работать не только в молекулярном, но и в молекулярно-вязкостном режимах течения газа [3–5, 6–13].

Создание новых типов вакуумных насосов, к которым можно отнести и молекулярно-вязкостные вакуумные насосы (МВВН) [7], со-

стоящие из молекулярно-вязкостных проточных частей, и совершенствование комбинированных ТМН на базе молекулярно-вязкостных проточных частей позволило увеличить быстроту действия не менее чем в два раза за счет наличия каналов на роторе и статоре, а также увеличить максимальное отношение давлений в молекулярно-вязкостном режиме. При использовании молекулярно-вязкостных проточных частей величина радиального зазора увеличена до $0,15 \cdot 10^{-3}$ м для ротора диаметром $60 \cdot 10^{-3}$ м [1, 3] без изменения откачных характеристик проточной части насоса.

Таким образом, создание новых и совершенствование существующих средств откачки позволяют расширять диапазоны рабочих параметров насосов, обеспечивать безмасляность откачки, упрощать условия эксплуатации и требования, предъявляемые к производству насосов. Для доработки существующих конструкций насосов и создания новых насосов необходимо разрабатывать новые методы расчета основных параметров насосов и экспериментально подтверждать полученные данные.

Энергетические характеристики вакуумных насосов

Одним из важных параметров вакуумных насосов является его энергетическая характеристика [14], определяющая изменение мощности двигателя насоса в зависимости от времени выхода на режим, геометрических и скоростных параметров насоса. Правильный выбор указанных параметров при проектировании вакуумного насоса позволяет понизить мощность, потребляемую электродвигателем и энергозатраты всей вакуумной системы, а тем самым не только уменьшить стоимость системы, но и работать в условиях ограниченного энергопотребления (например в космических аппаратах).

Работа МВВН в диапазоне давлений от 10 до 10^5 Па при окружной скорости на роторе $150–180$ м/с приводит к чрезвычайно большим затратам мощности (рис. 1).

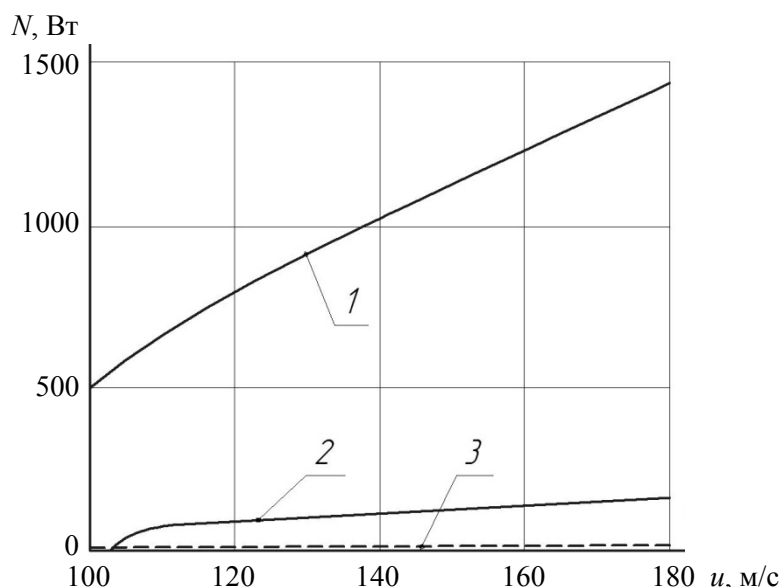


Рис. 1. Зависимость мощности, потребляемой ступенью МВВН, от окружной скорости движения ротора при давлении в ступени 10^5 (1), 10^4 (2) и 10^3 (3) Па

Fig. 1. The dependence of the power consumed by the stage MWN on the circumferential speed of the rotor at a pressure of 10^5 (1), 10^4 (2) и 10^3 (3)

Для уменьшения потребляемой мощности необходимо перераспределять скорости движения ступеней, уменьшая их по мере увеличения давления, что достигается применением ступеней с различными величинами диаметров. Основная нагрузка приходится на последние ступени при давлении 10^4 Па. Поэтому необходимо минимизировать окружную скорость движения поверхности ротора последней ступени с уменьшением ее диаметра, т.е. с уменьшением ее быстроты действия.

К тому же, согласно данным работы [15] на изменение потребляемой мощности влияет длина ступени. По рис. 2 видно, что отношение давлений зависит от длины проточной части насоса и диаметра ротора, т.к. величина диаметра определяет окружную скорость ротора. В результате с увеличением длины проточной части возрастает мощность насоса, затрачиваемая на сжатие газа.

В работе [14] отмечается необходимость применения энергосберегающих технологий

для повышения энергоэффективности вакуумных насосов в связи с ростом стоимости энергоносителей. Определение энергетических характеристик кулачково-зубчатых вакуумных насосов осуществляется теоретически по индикаторной диаграмме. Сведений об экспериментальном исследовании авторы не приводят.

Ведущие производители турбомолекулярных и диффузионных вакуумных насосов, относящихся, как и МВВН, к перекачивающим насосам, не публикуют полные данные по энергетическим характеристикам своих изделий. Данные о мощности по каталогам могут не включать максимальную выходную мощность, а для близких по параметрам насосов одного производителя могут указываться одинаковые показатели выходной электрической мощности. При этом в рамках класса вакуумных насосов мощности, приводимые в каталогах различных производителей, близки, в связи с чем можно говорить о сравнимости энергетических характеристик.

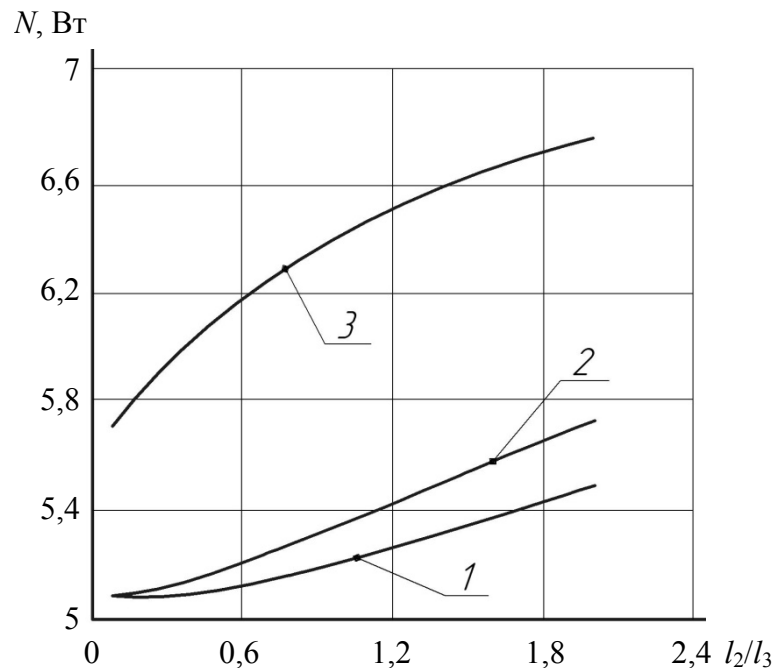


Рис. 2. График зависимостей потребляемой мощности МВВН от отношения l_2/l_3 при разных длинах первой ступени: 1 – $l_1 = 50$ мм; 2 – $l_1 = 100$ мм; 3 – $l_1 = 200$ мм

Fig. 2. Chart of dependency of power consumption MWN from the relationship l_2/l_3 at different lengths of the first stage: 1 – $l_1 = 50$ mm; 2 – $l_1 = 100$ mm; 3 – $l_1 = 200$ mm

Основная цель нашей работы состоит в теоретическом и экспериментальном исследовании энергетических характеристик молекулярно-вязкостных вакуумных насосов и определении возможности снижения мощности, требуемой для работы насоса.

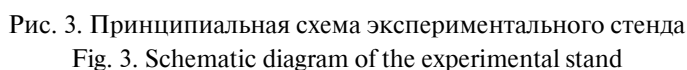
Описание экспериментального стенда для определения энергетических характеристик МВВН

Для исследования откачных параметров молекулярно-вязкостных вакуумных насосов с различными проточными частями в широком диапазоне давлений разработан экспериментальный стенд [1], схема которого представлена на рис. 3.

Вакуумная установка состоит из напускной камеры CV1 и измерительной камеры CV2, изготовленных из нержавеющей стали с полированными внутренними поверхностями.

Между ними установлена диафрагма D известной проводимости для определения быстроты действия МВВН.

В качестве локализованного источника напуска газа в камеру CV1 служит игольчатый натекаль VF, позволяющий регулировать газовые потоки. Равномерное распределение напускаемого потока по входному сечению обеспечивается кольцевой системой напуска, разработанной и исследованной на кафедре «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ имени Н.Э. Баумана, или сеточным сепаратором. Такая система осуществляет подачу газовых потоков одновременно в нескольких точках поперечного сечения вакуумной камеры, при этом потоки равномерно распределены по поперечному сечению и равны между собой. Напускаемые потоки измеряются регулятором расхода газа РРГ-12.



Электрическая энергия, забираемая двигателем из сети, сначала преобразуется в энергию вращающегося магнитного поля, которое в основном сосредоточено в воздушном зазоре машины. Основная часть энергии магнитного поля преобразуется в механическую энергию на валу двигателя и идет на выполнение работы; оставшаяся, существенно меньшая часть энергии преобразуется в электрическую энергию, передаваемую в обмотку ротора, как во вторичную обмотку трансформатора, и идет на нагрев ротора. Она необходима для создания тока ротора, который участвует в формировании момента, развиваемого двигателем. На рис. 4 изображена энергетическая диаграмма асинхронного двигателя.

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p_n}, \quad (1)$$

Синхронную угловую скорость в научнотехнической литературе также обозначают как ω_1 . Разность между ней и текущим значением угловой скорости ротора ω , отнесенная к скорости ω (ω_1), называется скольжением

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1}. \quad (2)$$

$$N_{\text{Mex}} = M \omega = N_{\text{3M}}(1-s). \quad (3)$$

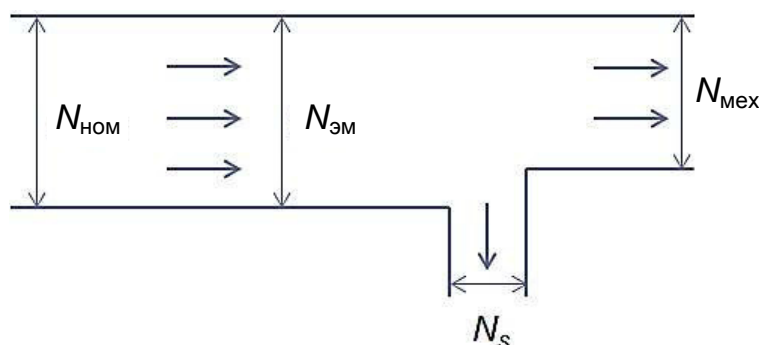


Рис. 4. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя
Fig. 4. The energy diagram of the induction motor

Мощность электромагнитного поля:

$$N_{ЭМ} = M \omega_0. \quad (4)$$

Электрическая мощность, передаваемая в ротор:

$$N_s = M \omega_0 s. \quad (5)$$

Разность

$$N_{ЭМ} - N_{мех} = N_{ЭМ} s \quad (6)$$

дает тепловые потери в цепи ротора, которые пропорциональны скольжению. Максимальное значение КПД при этом составит

$$\eta = \frac{N_{мех}}{N_{ЭМ}} = \frac{N_{ЭМ}(1-s)}{N_{ЭМ}} = 1-s. \quad (7)$$

Определение мощности молекулярно-вязкостного вакуумного насоса

Поскольку величина максимального отношения давлений зависит от окружной скорости ротора, рабочая частота ротора МВВН определяется требуемыми откачными параметрами насоса. При диаметре ротора $58 \cdot 10^{-3}$ м максимальное отношение давлений для исследуемого насоса обеспечивается при окружной скорости ротора от 80 м/с (частота вращения ротора 26340 об/мин) до 274 м/с (частота вращения ротора 90000 об/мин) [8].

Так как колеса насоса работают в газовой среде (особенно при пуске насоса), необходимо увеличить его мощность на 10–15 % для увеличения момента трогания и сокращения

времени выхода ротора на рабочее число оборотов. В результате расчетная механическая мощность молекулярно-вязкостного вакуумного насоса определяется зависимостью

$$N = 1,1(N_{сж} + N_{гтр} + N_{п} + N_{ин} + N_{во}) \text{ Вт}, \quad (8)$$

где составляющие мощности, затрачиваются на сжатие газа в проточной части насоса ($N_{сж}$), на газодинамическое трение ($N_{гтр}$), на преодоление трения в подшипниковом узле ($N_{п}$), на преодоление сил инерции ($N_{ин}$) и для питания вспомогательного оборудования ($N_{во}$).

Мощность $N_{сж}$ определяется зависимостью

$$N_{сж} = L_{из} G = 2,3 s_n p_{вс} \lg \left(\frac{p_n}{p_{вс}} \right), \quad (9)$$

где G – массовый расход газа, кг/с; $L_{из}$ – изотермическая работа, Дж/кг; s_n – быстрота действия насоса, м³/с; $p_{вс}$ – минимальное рабочее давление всасывания, Па; R – газовая постоянная, Дж/(кг·К); T – температура газа, К; p_n – давление нагнетания газа, Па.

При нагнетании газа в атмосферу мощность $N_{сж}$ увеличивается (рис. 5) по отношению к мощности ТМН, давление нагнетания которого соответствует 1 Па. Так как МВВН работает в основном в диапазоне давлений от 1 до 10^5 Па, необходимо учитывать увеличение мощности $N_{сж}$ и $N_{гтр}$ за счет увеличения концентрации газа (сплошная среда) и влияния трения газа о поверхность каналов проточной части насоса.

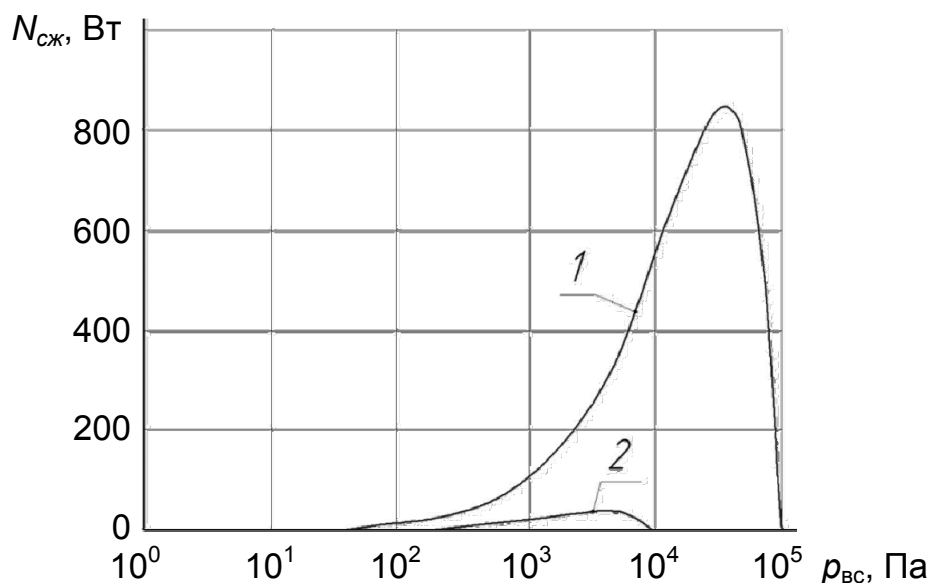


Рис. 5. Зависимость изотермической работы от давления всасывания при величинах давления нагнетания 10^5 (1) и 10^4 (2) Па

Fig. 5. The dependence of the isothermal operation of the suction pressure at values of the discharge pressure 10^5 (1) and 10^4 (2) Pa

В зависимости от типа подшипникового узла мощность, затрачиваемая на преодоление трения в нем [16], составляет от 50 до 150 Вт. Мощность, затрачиваемая на преодоление трения в подшипниковом узле, выражается зависимостью

$$N_{\pi} = \frac{10^{-7} M n}{9550}, \quad (10)$$

где M – момент трения в подшипнике, определяемый при высокой частоте вращения по следующей формуле:

$$M = 10^{-7} (vn)^{\frac{2}{3}} f_o D_{срп}^3. \quad (11)$$

Здесь v – кинематическая вязкость смазочного материала подшипника, $\text{мм}^2/\text{с}$; f_o – коэффициент, зависящий от типа подшипника и условий смазки; $D_{срп}$ – средний диаметр подшипника, м.

Мощность, затрачиваемая на преодоление сил инерции, определяется зависимостью

$$N_{ин} = \frac{\pi I n^2}{1800 t \eta_{мех}}, \quad (12)$$

где I – момент инерции ротора относительно оси вращения, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; n – частота вращения ротора, $\text{об}/\text{мин}$; t – время разгона ротора до рабочих чисел оборотов, с; $\eta_{мех}$ – механический КПД.

Регулирование частоты вращения в асинхронном электродвигателе может осуществляться путем варьирования большего числа параметров (рис. 6).

Так как в качестве электропривода МВВН используется асинхронный высокочастотный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, его подключение к насосу осуществляется через муфту. При этом регулирование параметров двигателя выполняется преобразователем частоты (рис. 7). При экспериментальном определении механической мощности в исследуемом диапазоне частот вращения невозможно установить между насосом и двигателем дополнительные устройства (такие, как торсионный вал), поэтому вместо механической мощности производится замер электрической мощности.



Рис. 6. Способы регулирования скорости асинхронного двигателя

Fig. 6. Methods of asynchronous motor speed control



Рис. 7. Схема подключения электродвигателя к МВВН

Fig. 7. Wiring diagram of motor to MVVN

Заключение

В проведенном исследовании определены основные факторы, влияющие на величину мощности насоса и составляющие суммарной мощности.

Установлено, что часть расходуемой мощности (потребляемая на трение в подшипниковом узле, инерционный разгон вращающихся масс и питание вспомогательного оборудования) определяется конструкцией насоса и практически не изменяется в широком диапазоне давлений. Мощность, затрачиваемая на газодинамическое трение и сжатие газа в проточной части МВВН, для молекулярного режима незначительна, однако в молекулярно-вязкостном и вязкостном ре-

жимах течения газа она существенно возрастает.

Так как МВВН является новым типом вакуумных насосов, необходимо провести экспериментальное исследование энергетических характеристик насоса на разных режимах работы и в широком диапазоне давлений.

Основное направление исследований по снижению энергетических затрат привода МВВН — определение того, как изменяется мощность, требуемая для сжатия газа в молекулярно-вязкостном и вязкостном режимах течения газа, при перераспределении нагрузки в ступенях многоступенчатых МВВН, изменении длин проточных частей, изменении скоростей вращения роторов насоса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свичкарь Е.В., Никулин Н.К., Демихов К.Е. Перспективы развития комбинированных турбомолекулярных вакуумных насосов // Инженерный

журнал: наука и инновации. [Электронное научно-техническое издание]. 2013. № 5 (17). С. 1–15.

2. **Демихов К.Е.** Современные направления развития высоковакуумных механических насосов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2014. № 5. С. 3–11.
3. **Никулин Н.К.** Комбинированные ТМН. Вакуумная техника, материалы и технология» // Материалы IV Международной научно-технической конференции. Москва: Изд-во НОБЕЛЛА, 2009. С. 43–48.
4. **Хаблянян М.Х., Саксаганский Г.Л., Бурмистров А.В. [и др.].** Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация. Ч. 2 Вакуумные насосы / КНИТУ, 2016, 300 с.
5. **Демихов К.Е.** Оптимизация высоковакуумных механических насосов. LAP (Lambert Academic Publishing), 2013. 312 с.
6. **Giors S.** Solved and unsolved gas dynamics problems for turbomolecular drag pumps: an industrial overview // 64th IUVSTA Workshop on Practical Applications and Methods of Gas Dynamics for Vacuum Science and Technology. 2011. P. 1–26. [Эл. ресурс]. Режим доступа: <http://www.itp.kit.edu> (дата обращения: 25.09.2018).
7. **Skovorodko P.A.** Some features of the flow in the Holweck pump / Institute of Thermophysics [Электр. ресурс]. Режим доступа: <http://arxiv.org> (дата обращения: 10.10.2015).
8. **Skovorodko P.A.** Continuum model for Couette–Poiseuille flow in a drag molecular pump // Institute of Thermophysics. [Эл. ресурс]. Режим доступа: <http://arxiv.org> (дата обращения 10.10.2015).
9. **Демихов К.Е., Очков А.А.** Универсальная математическая модель процесса откачки газа молекулярным вакуумным насосом // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2017. № 5. С. 134–138
10. **Демихов К.Е., Очков А.А., Цекадзе Г.Т.** Метод расчета оптимальных параметров комбинированного молекулярного вакуумного насоса // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2017. № 5. С. 98–99.
11. **Tsui Y.-Y., Kung C.-P., Cheng H.-P.** Analysis of the flow in the grooves of a molecular pump // Numerical Heat Transfer, Part A. 2001. 40:73 – 88. P. 73–88.
12. **Sharipov F.** Rarefied gas dynamics and its applications to vacuum technology // Prepared for Vacuum in Accelerators: Specialized Course of Conference: C06–05–16.1. P.1 – 13. [Эл. ресурс]. Режим доступа: <http://fisica.ufpr.br/> (дата обращения: 25.09.2018).
13. **Arpa R., Telib H., Cozza I.F., Campagna L., Emelli E.** A kinetic approach in modeling compact Siegbahn molecular stages: physical and numerical aspects // 64th IUVSTA Workshop on Practical Applications and Methods of Gas Dynamics for Vacuum Science and Technology. 2011. P. 1–21.
14. **Бурмистров А.В., Райков А.А., Саликеев С.И.** Энергетические характеристики безмасляного кулачкового-зубчатого вакуумного насоса // Вестник Казанского технологического университета. 2012. № 8 (15). С. 257–258.
15. **Антипов И.А.** Исследование энергетических характеристик многоступенчатого молекулярно-вязкостного вакуумного насоса // Сборник трудов I Всероссийской студенческой научно–практической конференции «Вакуумная, компрессорная техника и пневмоагрегаты». Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. С. 182–186.
16. **Демихов К.Е., Панфилов Ю.В. [и др.].** Вакуумная техника: Справочник. /Ред. Демихов К.Е., Панфилов Ю.В. Москва: Машиностроение, 2009. 590 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КЛЮЧАРОВ Владимир Сергеевич – инженер Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)

E-mail: klyucharov@gmail.com

НИКУЛИН Николай Константинович – кандидат технических наук доцент Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)

E-mail: nikulinnk@gmail.com

СВИЧКАРЬ Елена Владимировна – кандидат технических наук доцент Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)

E-mail: svic@bk.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 21.09.2018



REFERENCES

- [1] **Svichkar Ye.V., Nikulin N.K., Demikhov K.Ye.** Perspektivy razvitiya kombinirovannykh turbomolekulyarnykh vakuumnykh nasosov. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. Elektronnoye nauchno-tekhnicheskoye izdaniye*. 2013. № 5(17). S. 1–15. (rus.)
- [2] **Demikhov K.E.** Current trends of high-vacuum mechanical pump. *Herald of the Bauman Moscow state technical university. Mechanical Engineering*. 2014. № 5. P. 3–11.
- [3] **Nikulin N.K.** Kombinirovannyye TMN. *Vakuumnaya tekhnika, materialy i tekhnologiya*. *Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Moskva: Izd-vo NOVELLA, 2009. S. 43–48. (rus.)
- [4] **Khablanyan M.Kh., Saksaganskiy G.L., Burmistrov A.V. [i dr.,].** Vakuumnaya tekhnika. Oborudovaniye, proyektirovaniye, tekhnologii, ekspluatatsiya. Ch. 2 Vakuumnyye nasosy / KNITU. 2016. 300 s. (rus.)
- [5] **Demikhov K.Ye.** Optimizatsiya vysokovakuumnykh mekhanicheskikh nasosov. LAMBERT Academic Publishing. 2013. 312 s. (rus.)
- [6] **Giors S.** Solved and unsolved gas dynamics problems for turbomolecular drag pumps: an industrial overview. *64th IUVSTA Workshop on Practical Applications and Methods of Gas Dynamics for Vacuum Science and Technology*. 2011. P. 1–26. [El. resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.itep.kit.edu> (data obrashcheniya: 25.09.2018).
- [7] **Skovorodko P.A.** Some features of the flow in the Holweck pump / Institute of Thermophysics. [El. resurs]. Rezhim dostupa: <http://arxiv.org> (data obrashcheniya: 10.10.2015). (rus.)
- [8] **Skovorodko P.A.** Continuum model for Couette–Poiseuille flow in a drag molecular pump / Institute of Thermophysics. [El. resurs]. Rezhim dostupa: <http://arxiv.org> (data obrashcheniya 10.10.2015). (rus.)
- [9] **Demikhov K.E., Ochkov A.A.** Universalnaya matematicheskaya model protsessa otkachki gaza molekulyarnym vakuumnym nasosom. *Herald of the Bauman Moscow state technical university. Mechanical Engineering*. 2017. № 5. S. 134–138 (rus.)
- [10] **Demikhov K.E., Ochkov A.A., Tsekadze G.T.** Metod rascheta optimalnykh parametrov kombinirovannogo molekulyarnogo vakuumnogo nasosa. *Herald of the Bauman Moscow state technical university. Mechanical Engineering*. 2017. № 5. S. 98–99. (rus.)
- [11] **Tsui Y.-Y., Kung C.-P., Cheng H.-P.** Analysis of the flow in the grooves of a molecular pump. *Numerical Heat Transfer, Part A*. 2001. 40:73 – 88. P. 73–88.
- [12] **Sharipov F.** Rarefied gas dynamics and its applications to vacuum technology. *Prepared for Vacuum in Accelerators: Specialized Course of Conference: C06–05–16.1*. P. 1–13. Rezhim dostupa: <http://fisica.ufpr.br/> (data obrashcheniya: 25.09.2018).
- [13] **Arpa R., Telib H., Cozza I.F., Campagna L., Emelli E.** A kinetic approach in modeling compact Siegbahn molecular stages: physical and numerical aspects. *64th IUVSTA Workshop on Practical Applications and Methods of Gas Dynamics for Vacuum Science and Technology*. 2011. P. 1–21.
- [14] **Burmistrov A.V., Raykov A.A., Salikeyev S.I.** Energeticheskiye kharakteristiki bezmaslyanogo kulachkovo-zubchatogo vakuumnogo nasosa. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2012. № 8 (15). S. 257–258. (rus.)
- [15] **Antipov I.A.** Issledovaniye energeticheskikh kharakteristik mnogostupenchatogo molekulyarnov-yazkostnogo vakuumnogo nasosa. *Sbornik trudov I Vserossiyskoy studencheskoy nauchno–prakticheskoy konferentsii «Vakuumnaya, kompressornaya tekhnika i pnevmoagregaty»*. Moskva: Izd-vo MGTU im. N.E.Baumana, 2008. S. 182–186. (rus.)
- [16] **Demikhov K.E., Panfilov Yu.V. [i dr.,].** Vakuumnaya tekhnika: Spravochnik / Red. Demikhov K.Ye., Panfilov Yu.V. Moskva: Mashinostroyeniye, 2009, 590 s. (rus.)

THE AUTHORS

KLYUCHAROV Vladimir S. — Bauman Moscow State technical university

E-mail: klyucharov@gmail.com

NIKULIN Nikolay K. — Bauman Moscow State technical university

E-mail: nikulinnk@gmail.com

SVICHKAR Elena V. — Bauman Moscow State Technical University.

E-mail: svic@bk.ru

Received: 21.09.2018

DOI: 10.18721/JEST.25104
УДК 620.9

Б.К. Джаманбалин¹, В.А. Кокшаров²

1 – Костанайский социально-технический университет имени академика Зулкарнай Алдамжар,
г. Костанай, Казахстан

2 – Уральский государственный университет путей и сообщения, г. Екатеринбург, Россия

ЭКСПЕРТНЫЕ ОЦЕНКИ ГЛАВНЫХ ПРОБЛЕМ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ КАЗАХСТАНА

Разработан методологический подход к выявлению главных проблем развития отрасли электроэнергетики Казахстана, отличающийся новыми принципами, трехступенчатой схемой отбора проблем и процедурой их многомерного ранжирования, что позволяет установить приоритеты развития отрасли в увязке с ключевыми целями страны. Предложенный методологический подход, возможно, позволит использовать идеи и некоторые его части не только в электроэнергетике, но и в ряде других сложных или комплексных секторах экономики. К предложенным авторами ранее дополнительным элементам планирования стратегии развития энергопредприятия (учет главных проблем страны; оптимизация финансово-организационных форм предприятий отрасли) добавлен новый элемент – учет главных интересов региона при существенных изменениях на энергопредприятиях. Разработана методика такого учета с построением когнитивных карт. В качестве главного конечного параметра региона принят уровень жизни населения. Предложен алгоритм установления наличия или отсутствия связей каждой проблемы электроэнергетики с целями отрасли и страны. Это необходимо для выбора пути устранения проблемы.

Ключевые слова: отрасли, ранжирование проблем, цели страны, цели отрасли, индекс конкурентоспособности.

Ссылка при цитировании:

Б.К. Джаманбалин, В.А. Кокшаров. Экспертные оценки главных проблем развития электроэнергетики Казахстана // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 40–46. DOI: 10.18721/JEST.25104.

B.K. Jamanbalin¹, V.A. Koksharov²

1 – Kostanay social and technical university named after academician Z. Aldamzhar,
g. Kostanay, Kazakhstan

2 – Ural State university of railway transport, g. Ekaterinburg, Russia

EXPERT EVALUATIONS OF MAIN PROBLEMS IN DEVELOPMENT OF ELECTRIC ENERGY IN KAZAKHSTAN

The article reviews the problems associated with development of the electric power industry in Kazakhstan. We have devised a methodological approach to identifying the main problems of the industry's development, a three-stage scheme for solving problems and multidimensional ranging procedures, allowing to establish the priorities for the development of the industry in conjunction with the key goals of the country. The proposed methodological approach to choosing the main problems of the branch, that is, the electric power industry, should perhaps make it possible to use ideas and some parts of this approach in other areas or complex sectors of the economy. A new element, which is taking into account the main interests of the region during significant changes in energy enterprises, was added to the supplementary elements of the planning scheme for the development strategy of energy companies that we previously proposed (consideration of the country's main problems; optimization of financial and organizational forms of enterprises in the industry). A method for such accounting has been developed, based on construction of cognitive maps. The standard of living of the region's population is taken as the main final parameter of the region. An algorithm is proposed for confirming the presence or absence of links between the politicians and the goals of the industry and the country. The task of the algorithm is to determine whether the given problem is associated with the above indicators. The solution for this task determines the method chosen for solving problem in the algorithm for identifying the main problems of the industry. In this study we have reviewed the development of branches of electronics in Kazakhstan. The goal of the study is in developing the theoretical and methodological



guidelines and practical recommendations for identifying priority problems in the power industry for formulating strategic plans for development of the power industry in the country. The following tasks were set and solved to achieve the goal: 1. to develop a methodology for identifying the main economic problems of the power industry in terms of competitiveness; 2. to investigate the existing methodological approaches and propose an original approach to identifying the main problems in the development of the country's electric power industry; 3. to propose a methodology for ranking the priority problems of the industry, based on taking into account the connections of organizational and financial form of enterprises with the growth of innovation, the scale of investment and the level of competitiveness; 4. to develop a toolkit for assessing the impact of the industry's priority problems on the security level of a country and the life of the population.

Keywords: problems of industry; ranking problems; objectives of country; objectives of industry; index of competitiveness.

Citation:

B.K. Jamanbalin, V.A. Koksharov, Expert evaluations of main problems in development of electric energy in Kazakhstan, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 40–46, DOI: 10.18721/JEST.25104.

В работах [1–4] авторов предложен методологический подход к выделению и ранжированию проблем отрасли на стадии разработки отраслевых программ стратегического развития. В настоящее время выделение главных проблем отрасли основывается исключительно на экспертных мнениях, организации рабочих совещательных групп на уровне, например, правительства регионов и страны в целом, а также на анализе отчетов работы отдельных крупных предприятий министерств, отвечающих за работу топливно-энергетической сферы, и выявлении тенденций изменения отдельных показателей. Все эти используемые методы выделения главных проблем можно отнести к наименее объективным, крайне поверхностным и ненадежным. Между тем от качества данного этапа стратегической деятельности зависит как правильное распределение финансовых и других ресурсов, всегда ограниченных, так и результаты развития отрасли и страны в целом.

Сложность задачи усугубляется еще и многочисленностью проблем отрасли на данном периоде ее развития. В качестве примера приведем небольшую выборку из перечня проблем отрасли электроэнергетики Казахстана:

необходимость повышения энергоэффективности и экологичности производства за счет модернизации мощностей;

снижение собираемости платежей из-за увеличения стоимости электроэнергии;

большой износ энергетических мощностей; отсутствие частных инвестиций в отрасль; необходимость органичного встраивания альтернативных, относительно недорогих источников генерации в существующую систему энергоснабжения;

рост затрат на модернизацию энергетических мощностей и развитие новых сетей;

отсутствие стимулов у энергопроизводителей к нововведениям;

увеличение и усложнение энергопотоков;

практически отсутствие внедрения высокотехнологичных решений в отрасли;

рост требований к энергоэффективности и «экологической чистоте» производства;

сокращение конкурентной среды среди энергопроизводящих организаций, «разделивших» между собой потребителей оптового рынка (до 50 % поставок электрической энергии Казахстана сосредоточено сейчас на трех электростанциях);

отсутствие стимулов у сетевых предприятий к внедрению новой техники;

необходимость совершенствования системы тарифов на оптовом рынке с учетом упорядочения системы тарифов на розничном рынке;

перекрестное социальное субсидирование (покрытие затрат по снабжению населения электроэнергией за счет более высоких, чем этого требуют расчеты, тарифов для промышленных потребителей).

Мы разработали методологический подход к выявлению главных проблем развития от-

расли электроэнергетики, отличающийся новыми принципами, трехступенчатой схемой отбора проблем и процедурой их многомерного ранжирования, что позволяет установить приоритеты развития отрасли в увязке с ключевыми целями страны.

Анализ экспертных оценок выявления главных проблем электроэнергетики привел к следующим результатам.

Алгоритм подтверждения наличия или отсутствия связей каждой проблемы электроэнергетики с целями отрасли и страны

Экономическая теория [5–10] подсказывает, что в общем случае степени участия государства и частного сектора в управлении влияют главным образом всего на четыре показателя: на созданную в отрасли и стране конкурентную среду (в дальнейшем обозначена как фактор *S*), конкурентоспособность предприятий отрасли (*K*), инновативность отрасли, т. е. направленность отрасли в целом на инновационное технологическое развитие и её «технологическая готовность» (*H*), масштабность инвестиций (*I*). А супер-целями страны являются обеспечение безопасности страны (*B*) и обеспечение роста жизненного уровня населения (*J*).

Алгоритм используется на предварительной стадии выбора приоритетов. Задача алгоритма — определить, связана ли данная проблема с вышеуказанными шестью показателями или такой связи нет, т. е. получение дуальной оценки — либо положительной, либо отрицательной. От решения данной задачи зависит дальнейший путь проблемы в алгоритме выделения главных проблем отрасли. При шести привлеченных экспертах (в качестве экспертов принимали участие преподаватели Костанайского социально-технического университета — один профессор, доктор экономических наук, и пять доцентов, кандидатов экономических наук) имеем результат, приведенный в табл. 1. Здесь жирным шрифтом выделена полученная от экспертов цифровая информация.

Таблица 1

Результаты опроса шести экспертов по проблеме № 1, расчеты и выводы

Table 1

Results of a survey of six experts on the issue number 1, calculations and conclusions

Эксперты	Показатели-цели					
	<i>K</i>	<i>S</i>	<i>H</i>	<i>I</i>	<i>B</i>	<i>J</i>
А	1	1	0,5	0,5	1	0,5
Б	0	0	0,5	1	0,5	0,5
В	0,5	0,5	1	1	1	1
Г	1	0	1	0	1	1
Д	1	1	0,5	1	1	1
Е	1	1	0,5	1	1	1
Сумма оценок по столбцу	4,5	3,5	4	4,5	5,5	5
Суммы оценок в нормированной шкале (0 – 1)	0,751	0,584	0,667	0,751	0,918	0,834
Итоговая Вербальная оценка	да	нет	нет	да	да	да
Знак в таблице	+	–	–	+	+	+

Основные идеи алгоритма:

1) по каждому показателю-цели эксперт может дать одну из трех оценок — 0 (нет связи), 1 (по его мнению, есть связь), 0,5 (неопределенное мнение); таким образом, при шести экспертах имеем возможную сумму оценок по каждому показателю-цели от 0 до 6;

2) при переходе к нормированной шкале имеем возможную сумму оценок по каждому показателю-цели от 0 до 1;

3) в теории корреляции принято и доказано, что значимая связь в нормированной шкале соответствует значению коэффициента парной корреляции примерно от 0,7 и выше в зависимости от числа наблюдений (в нашем случае — в зависимости от числа экспертов). Отсюда получаем границу значимости оценок: ~ 0,7 (точнее — от 0,668 до 0,751; см. табл. 2).



Таблица 2

**Шкалы суммарных экспертных оценок
и граница значимости**

Table 2

Scales of total expert assessments and significance limit

Возможная сумма оценок по столбцу	То же в нормированной шкале (0–1)	Значимость связи
0	0	«Нет» (незначимая связь)
1	0,167	
2	0,334	
3	0,5	
4	0,667	
4,5	0,751	«Да» (значимая связь)
5	0,834	
6	1	

Предполагаемые эффекты от применения данного методологического подхода обусловлены следующим:

1) увязкой операции ранжирования проблем отрасли с целями страны, которые тоже представляют собой неравноценное, ранжированное множество. Без такой увязки, т. е. при изолированном ранжировании проблем, эта процедура теряет во многом обоснованность, носит в некотором смысле случайный характер и может не только не улучшить цели верхнего по отношению к отрасли уровня управления (страной), но и отдалить достижение этих целей. Поскольку в предложенном методологическом подходе при разработке стратегии развития электроэнергетики делается упор на учет целей страны, это может послужить объединяющим моментом при составлении (и так называемой «актуализации») региональных энергетических программ за счет принятия единого решения относительно приоритетов действий и на этой основе ускорить движение к достижению целей страны;

2) объективным выбором главных проблем отрасли, который, скорее всего, должен при-

водить к уменьшению общего объема необходимых инвестиций на развитие отрасли, поскольку при использовании предлагаемого методологического подхода не будет ошибочного распыления средств на проблемы второстепенные или не являющиеся первоочередными;

3) поскольку одна из целей страны – рост ее конкурентоспособности, которая, помимо прочего, оценивается и глобальным мировым рейтингом, повышение этого рейтинга может вести к увеличению иностранных инвестиций, затем – к росту внутреннего валового продукта, улучшению других целей страны и т. п.;

4) разработанные детальные и четко структурированные алгоритмы расчетов и принятия промежуточных и окончательных решений по выделению главных проблем отрасли позволят использовать ИТ-технологии и на этой основе облегчить и упростить процесс составления стратегических отраслевых программ развития, избавить разработчиков программ от рутинной части работы, сделать этот процесс менее времязатратным;

5) методологический подход предполагает в качестве первого шага составление по возможности максимально полного перечня проблем отрасли с использованием максимально полного списка информационных источников, что позволит избежать «пропусков» при анализе проблем на последующих шагах;

6) использование ИТ-технологии при разработке стратегических программ отрасли должно повысить, помимо прочего, культуру управления в части подготовки ответственных решений;

7) предложенный методологический подход выбора главных проблем электроэнергетики, возможно, позволит использовать идеи и некоторые части этого подхода и в ряде других сложных или комплексных секторах экономики.

Источники возникновения проблем электроэнергетики можно сгруппировать в ряд классов.

Первый класс — «постоянно действующие источники» проблем отрасли (электроэнергетика), которые связаны с присущими именно ей технологическими, организационными, финансовыми и другими особенностями. К ним можно отнести следующие:

а) высокотехнологичность. Электроэнергетика продолжает относиться к сложным и высокотехнологическим отраслям, где постоянно существует необходимость внедрять все более новое и более технологичное энергогенерирующее, энергопередающее и энергопотребляющее оборудование, поскольку КПД оборудования еще весьма далеки до идеальных, высоки потери электроэнергии в сетях и при электропотреблении. В электроэнергетике уже многих стран существует супертехнологичная выработка энергии на атомных станциях, а также широко развивается выработка электроэнергии с помощью нетрадиционных источников энергии и возобновляемых источников;

б) сложность, всеобщность и постоянство зависимостей всех прочих отраслей и всего хозяйства страны от электроэнергетики;

в) комбинированность производства. Это еще больше усложняет производственный процесс, поскольку на многих энергогенерирующих объектах вырабатывается не только электроэнергия, но и теплоэнергия и еще один продукт — химочищенная вода.

Второй класс источников проблем — «временные, т.е. преходящие источники проблем». К ним можно отнести:

а) сложности создания конкурентной среды в отрасли;

б) трудности повышения конкурентоспособности энергогенерирующих и энергосетевых предприятий;

в) сложности создания стартапов для внедрения новой техники, как правило, из-за масштабности и инвестиционности требуемого для экспериментов оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джаманбалин Б.К., Клюев Ю.Б. Методологический подход к выбору главных проблем отрасли // Известия Уральского государственного экономического университета. 2016. № 5 (67). С. 123–131.
2. Клюев Ю.Б., Джаманбалин Б.К. Совершенствование методов выделения главных проблем развития электроэнергетики страны // Вестник УГТУ-УПИ. Серия: Экономика и управление. 2009. № 1. С. 12–23.
3. Клюев Ю.Б., Джаманбалин Б.К. Выбор организационно-финансовой формы предприятий электроэнергетики // Вестник УГТУ-УПИ. Серия: Экономика и управление, 2010. № 6. С. 12–23.
4. Клюев Ю.Б., Джаманбалин Б.К. Анализ влияния изменений на энергопредприятии на конечные показатели функционирования региона // Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление. 2011. № 5. С. 32–43.
5. Видеолекции. Зарубежный опыт государственного прогнозирования и планирования: прогнозирование и планирование. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gtmarket.ru/ratings/global-competitiveness-index/info>
6. Государственное регулирование рыночной экономики / Под ред. В.И. Кушлина, Н.А. Волгина. М.: Экономика, 2001. 229 с.
7. Корняков В. Государственно-корпоративное направление развития экономики. // Экономист. 2000. № 5. С. 74–80.
8. Правительство готовит планы по импортозамещению ИТ-продукции в сфере ОПК, 16 апреля 2014. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.russiaelectronics.ru/leader-r/news/russianmaret/doc>
9. Кузык Б.Н., Кушлин В.И., Яковец Ю.В. Прогнозирование, стратегическое и национальное программирование. М.: Экономика, 2011. 604 с.
10. Ревенков А. Планирование в системе государственного регулирования экономики // Экономист. 2001. № 8. С. 17–21.
11. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. М.: Радио и связь, 1981.
12. Орлов А.И. Теория принятия решений. М.: Март, 2004.
13. Тейл Г. Экономические прогнозы и принятие решений. М.: Статистика, 1971.



14. Теория прогнозирования и принятия решений / Под ред. С.А. Саркисяна. М.: Высшая школа, 1977.
15. Райфа Х. Анализ решений (введение в проблему выбора в условиях неопределенности). М.: Наука, 1977.
16. Цисарь И.Ф., Нейман В.Г. Компьютерное моделирование экономики. М.: Диалог-МИФИ, 2002.
17. Мелентьев Л.А. Оптимизация развития и управления больших систем энергетики. М.: Высшая школа, 1982.
18. Дубов Ю.А., Травкин С.И., Якимец В.Н. Многокритериальные методы формирования и выбора систем. М.: Наука, 1986.
19. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982.
20. Kendall M.G. Rank Correlation Methods. London: Griffin and Co., 1955.
21. Миркин Б.Г. Проблема группового выбора. М.: Наука, 1974.
22. Черчмен У., Акофф Р., Арноф Л. Введение в исследование операций. М.: Наука, 1968.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ДЖАМАНБАЛИН Берик Кадиргалиевич — преподаватель Костанайского социально-технического университета имени академика Зулкарнай Алдамжар

E-mail: pkkst@mail.ru

КОКШАРОВ Владимир Алексеевич — доктор экономических наук профессор Уральского государственного университета путей и сообщения

E-mail: vakoksharov@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 25.01.2019

REFERENCES

- [1] Dzhamanbalin B.K., Klyuyev Yu.B. Metodologicheskii podkhod k vyboru glavnykh problem otrasli. *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta*. 2016. № 5 (67). S. 123–131. (rus.)
- [2] Klyuyev Yu.B., Dzhamanbalin B.K. Sovershenstvovaniye metodov vydeleniya glavnykh problem razvitiya elektroenergetiki strany. *Vestnik UGTU-UIP. Seriya: Ekonomika i upravleniye*. 2009. № 1. S. 12–23. (rus.)
- [3] Klyuyev Yu.B., Dzhamanbalin B.K. Vybor organizatsionno-finansovoy formy predpriyatiy elektroenergetiki. *Vestnik UGTU-UIP. Seriya: Ekonomika i upravleniye*. 2010. № 6. S. 12–23. (rus.)
- [4] Klyuyev Yu.B., Dzhamanbalin B.K. Analiz vliyaniya izmeneniy na energopredpriyatii na konechnyye pokazateli funktsionirovaniya regiona. *Vestnik URFU. Seriya: Ekonomika i upravleniye*. 2011. № 5. S. 32–43. (rus.)
- [5] Videolektsii. Zarubezhnyy opyt gosudarstvennogo prognozirovaniya i planirovaniya: prognozirovaniye i planirovaniye. [Elektronnyy resurs]. URL: <http://www.gtmarket.ru/ratings/global-competitiveness-index/info>
- [6] Gosudarstvennoye regulirovaniye rynochnoy ekonomiki. / Pod red. V.I. Kushlina, N.A. Volgina. M.: Ekonomika, 2001. 229 s. (rus.)
- [7] Korniyakov V. Gosudarstvenno-korporativnoye napravleniye razvitiya ekonomiki. *Ekonomist*. 2000. № 5. S. 74–80. (rus.)
- [8] Pravitelstvo gotovit plany po importozameshcheniyu IT-produktsii v sfere OPK, 16 aprelya 2014. [Elektronnyy resurs]. URL: <http://www.russi.anelectronics.ru/leader-r/news/russianmaret/doc> (rus.)
- [9] Kuzyk B.N., Kushlin V.I., Yakovets Yu.V. Prognozirovaniye, strategicheskoye i natsionalnoye programirovaniye. M.: Ekonomika, 2011. 604 s. (rus.)
- [10] Revenkov A. Planirovaniye v sisteme gosudarstvennogo regulirovaniya ekonomiki. *Ekonomist*. 2001. № 8. S. 17–21. (rus.)
- [11] Kini R.L., Rayfa Kh. Prinyatiye resheniy pri mnogikh kriteriyakh: predpochteniya i zameshcheniya. M.: Radio i svyaz, 1981. (rus.)
- [12] Orlov A.I. Teoriya prinyatiya resheniy. M.: Mart, 2004. (rus.)
- [13] Teyl G. Ekonomicheskiye prognozy i prinyatiye resheniy. M.: Statistika, 1971. (rus.)

- [14] Teoriya prognozirovaniya i prinyatiya resheniy / Pod red. S.A. Sarkisyana. M.: Vysshaya shkola, 1977. (rus.)
- [15] **Rayfa Kh.** Analiz resheniy (vvedeniye v problemu vybora v usloviyakh neopredelennosti). M.: Nauka, 1977. (rus.)
- [16] **Tsisar I.F., Neyman V.G.** Kompyuternoye modelirovaniye ekonomiki. M.: Dialog-MIFI, 2002. (rus.)
- [17] **Melentyev L.A.** Optimizatsiya razvitiya i upravleniya bolshikh sistem energetiki. M.: Vysshaya shkola, 1982. (rus.)
- [18] **Dubov Yu.A., Travkin S.I., Yakimets V.N.** Mnogokriterialnyye metody formirovaniya i vybora sistem. M.: Nauka, 1986. (rus.)
- [19] **Podinovskiy V.V., Nogin V.D.** Pareto-optimalnyye resheniya mnogokriterialnykh zadach. M.: Nauka, 1982. (rus.)
- [20] **Kendall M.G.** Rank Correlation Methods. London: Griffin and Co., 1955.
- [21] **Mirkin B.G.** Problema gruppovogo vybora. M.: Nauka, 1974. (rus.)
- [22] **Cherchmen U., Akoff R., Arnof L.** Vvedeniye v issledovaniye operatsiy. M.: Nauka, 1968. (rus.)

THE AUTHORS

JAMANBALIN Berik K. — *Kostanay Social and technical university named after Z. Aldamzhar*

E-mail: pkkstu@mail.ru

KOKSHAROV Vladimir A. — *Ural state university of railway transport.*

E-mail: vakoksharov@mail.ru

Received: 25.01.2019



DOI: 10.18721/JEST.25105
УДК 621.43

В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, А.Н. Козлов

Вятская государственная сельскохозяйственная академия, г. Киров, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ САЖЕОБРАЗОВАНИЯ В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЯ

Сажа — главная составляющая твердых частиц, содержащихся в отработавших газах дизелей; образуется из продуктов термического разложения углеводородного топлива. Предложена математическая модель для прогнозирования дымности отработавших газов дизелей на различных нагрузочных и скоростных режимах. По результатам численного моделирования получено текущее содержание компонентов газовой смеси в реакционной зоне в зависимости от угла поворота коленчатого вала и определены такие показатели сажесодержания в объеме цилиндра, как минимальный средний диаметр частиц, максимальная масса сажи, угол, соответствующий максимальному содержанию сажи, суммарная масса частиц сажи в цилиндре и суммарное сажевыделение. Проведены лабораторно-стендовые исследования дизеля 2Ч 10,5/12,0 с определением индикаторного давления, индикаторной температуры газов в цилиндре, скорости тепловыделения и показателей токсичности и дымности отработавших газов. Результаты моделирования дымности отработавших газов дизеля подтверждены экспериментальными измерениями на различных режимах работы.

Ключевые слова: сажа, дымность, дизель, отработавшие газы, тепловыделение.

Ссылка при цитировании:

В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, А.Н. Козлов. Моделирование сажеобразования в цилиндре дизеля // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 47–59. DOI: 10.18721/JEST.25105.

V.A. Likhanov, O.P. Lopatin, A.N. Kozlov

Vyatka state agricultural academy, Kirov, Russia

MODELING SOOT FORMATION IN CYLINDER OF DIESEL ENGINE

Soot is the main component of the solid particles contained in exhaust gases of diesel engines, which is formed from the products of thermal decomposition of hydrocarbon fuel. A mathematical model for predicting the fluidity of exhaust gases of diesel engines at different load and speed modes of operation is proposed. The current content of the gas mixture components in the reaction zone, depending on the angle of rotation of the crankshaft, was obtained by numerical simulation. Such indicators of soot content in the cylinder volume as the minimum average diameter of the particles, the maximum soot mass, the angle of the maximum soot content, the total mass of soot particles in the cylinder and the total soot release were determined. Laboratory and bench studies of diesel 2F 10.5/12.0 have been carried out, determining indicator pressure, indicator temperature of the gases in the cylinder, heat release rate and indicators of toxicity and smoke exhaust gases. The results of simulation of smokiness of the diesel exhaust gases are confirmed by experimental measurements in different operating modes.

Keywords: soot, smoke, diesel, exhaust gases, heat generation.

Citation:

V.A. Likhanov, O.P. Lopatin, A.N. Kozlov, Modeling soot formation in cylinder of diesel engine, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 47–59, DOI: 10.18721/JEST.25105.

Введение

Дизель — широко используемый двигатель, поскольку имеет высокую эффективность преобразования топливной энергии. Истощение невозобновляемых ископаемых ресурсов и загрязнение воздуха, вызывающее негативные последствия для здоровья человека, — две проблемы, стоящие перед всеми странами. С развитием автомобилизации они стали ещё более серьезными. В мире проводится множество исследований, направленных на повышение эффективности работы двигателей внутреннего сгорания и снижение вредных выбросов [1, 2].

Сажа — главная составляющая твердых частиц, содержащихся в отработавших газах (ОГ) дизелей; она образуется из продуктов термического разложения углеводородного топлива. Мельчайшие частицы сажи долгое время могут находиться в воздухе, вызывая смог и ухудшая видимость. Твердые частицы создают широкий спектр пагубных последствий для здоровья человека. Они способны, проникая глубоко в легкие, вызывать респираторные и сердечно-сосудистые заболевания [3].

Хотя транспорт — ключевое звено в мировой экономике, он также является одним из основных факторов, влияющих на потребление энергии и выбросы загрязняющих веществ. Необходимо контролировать или ограничивать выбросы сажи для смягчения проблемы загрязнения, особенно в контексте двигателей внутреннего сгорания, применительно к которым законодательно ужесточаются правила по ограничению массы и количества частиц сажи. Это требует тщательного изучения процессов образования и горения частиц сажи в цилиндре дизеля. Поскольку процесс сажевыделения неразрывно связан с такими внутрицилиндровыми процессами, как тепловыделение, испарение и сгорание топлива, то для повышения точности численного моделирования необходимо совершенствовать знания об этих процессах [4, 5].

Методика и расчетные исследования

На базе кафедры тепловых двигателей автомобилей и тракторов проводились стендовые исследования дизеля 2Ч 10,5/12,0.

Основные характеристики и параметры режима работы этого дизеля следующие:

Тип дизеля	С воздушным охлаждением и полусферической камерой сгорания
Число цилиндров	2
Рабочий объем	2080 см ³
Номинальная частота вращения коленчатого вала	1800 мин ⁻¹
Диаметр поршня	10,5 см
Ход поршня	12,0 см
Степень сжатия	16,5
Установочный угол опережения впрыска топлива	30 град. до ВМТ
Номинальная мощность	18,4 кВт
Среднее эффективное давление	0,588 МПа
Удельный эффективный расход топлива	241,8 г/кВт·ч
Эффективный КПД	0,351

Двигатель, установленный на стенде, был оборудован датчиками давления PS-01 в цилиндре и положения маховика относительно верхней мертвой точки (ВМТ). Сигнал с датчиков через усилитель и аналогово-цифровой преобразователь La-2USB12 поступал на персональный компьютер. С помощью стандартных средств обработки циклического цифрового сигнала, реализованных в пакете базовых инженерных вычислительных программ, было выполнено наложение сигнала датчика давления в цилиндре дизеля (по соответствующим отметкам ВМТ) в многоцикловую матрицу [6].

По частоте дискретизации датчика определялась скорость вращения коленчатого вала дизеля в момент индицирования. Данные сопоставлялись с результатами измерения электронным цифровым тахометром ТЦ-1 во время стендовых испытаний. С помощью программного блока определялось максимальное значение функции давления в цилиндре (рис. 1) и его положение относительно ВМТ.

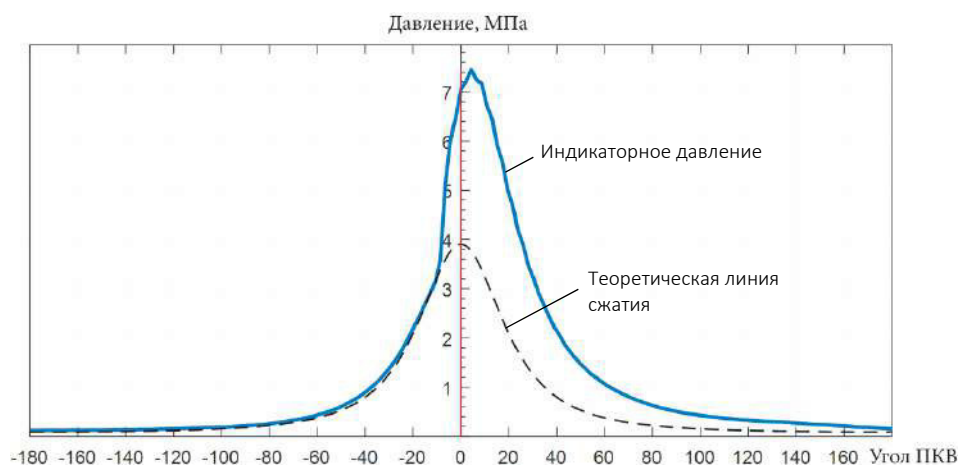


Рис. 1. Индикаторное давление в цилиндре дизеля 2Ч10,5/12,0 на номинальном режиме в зависимости от угла поворота коленчатого вала (ПКВ)

Fig. 1. Indicator pressure in the diesel cylinder 2F 10.5/12.0 at nominal mode depending on the angle of rotation of the crankshaft (RCS)

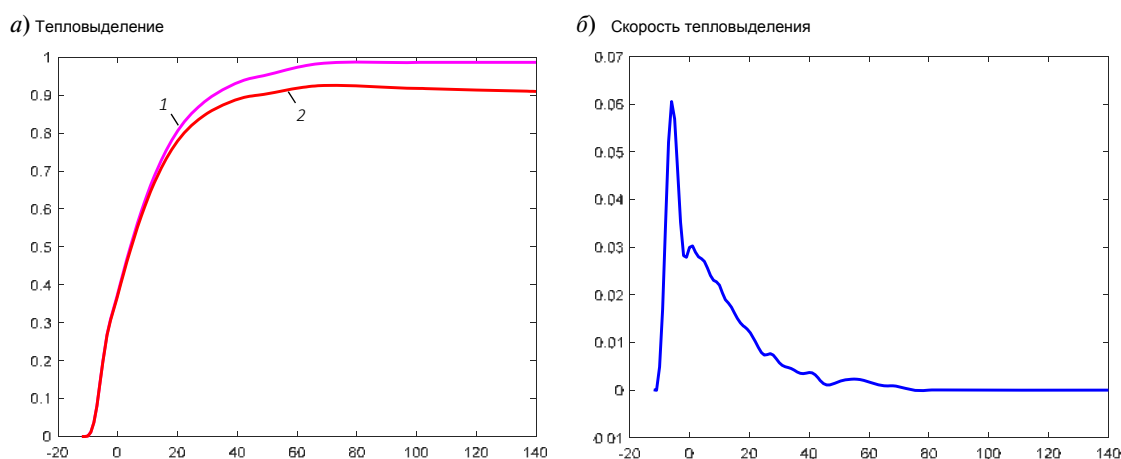


Рис. 2. Интегральная характеристика активного (1) и полного (2) тепловыделения (а) и дифференциальная характеристика тепловыделения в цилиндре дизеля (б)

Fig. 2. An integral characteristic of active (1) and complete (2) heat dissipation (a) and differential characteristics of heat generation in the cylinder of a diesel engine (b)

Расчет индикаторной температуры газов в цилиндре, скорости тепловыделения, скорости отвода тепла производился по методике ЦНИДИ. Исходными данными для расчета служили энергетическая характеристика, расход топлива и коэффициент избытка воздуха, измерение которого производилось с помощью счетчика РГ-250, установленного перед впускным коллектором дизеля, и электронно-

го цифрового тахометра ТЭМП-4. Расход топлива измерялся электронным расходомером топлива АИР-50 [7].

Вычисление интегральной и дифференциальной характеристик тепловыделения, индикаторной температуры газов в цилиндре и скорости отвода тепла производилось по алгоритмам, реализованным в отдельных подпрограммах. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

В точках пересечения дифференциальной характеристики и нулевой ординаты определены углы ПКВ, при которых начинается и заканчивается процесс сгорания. По результатам расчета конечное полное тепловыделение составило $X = 0,98$; активное тепловыделение в момент открытия выпускного клапана — $X_a = 0,91$. Угол начала сгорания составил 9,4 градуса ПКВ, а продолжительность сгорания — 84 градуса ПКВ. Период задержки воспламенения с учетом установочного угла начала подачи топлива (30 градусов ПКВ до ВМТ) составил 20,6 градуса. Скорость тепловыделения имеет два выраженных максимума, что соответствует современной теории процесса сгорания топлива в дизеле (рис. 2).

Для моделирования процессов образования сажи в цилиндре дизеля была использована двухзонная модель, согласно которой камера сгорания условно разбивалась на две зоны: образования сажи (глубокий пиролиз топлива) и выгорания. Геометрически зона выгорания сажи охватывает топливный факел снаружи, а зона образования сажи находится в высокотемпературных предпламенных участках с локальным коэффициентом избытка воздуха менее 0,7 (рис. 3) [8].

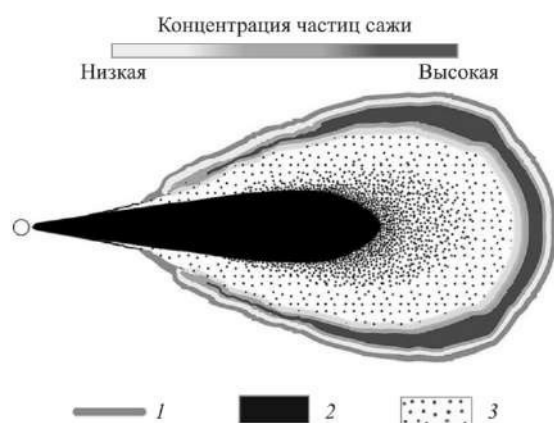


Рис. 3. Модель топливной струи: 1 — диффузионное пламя; 2 — жидкое топливо; 3 — пары топлива с каплями [9]

Fig. 3. Fuel jet model: 1 — diffusion flame; 2 — liquid fuel; 3 — fuel vapors with droplets [9]

В зоне пиролиза углеводородов топлива преимущественно происходил процесс нуклеации сажи и гетерогенный рост поверхности частиц. В зоне горения идут процессы коагуляции и газификации частиц сажи. Для каждой из зон определялся локальный газовый состав и осредненные температуры участков.

Изначально принято, что в зоне пиролиза топлива содержится некоторое количество остаточных газов, испаренное топливо и воздух, состоящий из кислорода, азота, углекислого газа и паров воды. Состав газов в зоне горения определялся по полуэмпирической модели Н.Ф. Разлейцева [10]. Текущее значение температуры T_v воздуха, не участвующего в сгорании топлива, рассчитывалось по уравнению адиабаты. Температура продуктов сгорания $T_{пс}$ определялась для каждого момента цикла из уравнения баланса энтальпий с учетом потерь теплоты на недогорание топлива и диссоциацию продуктов сгорания, а также радиационных тепловых потерь из зоны реакции. В качестве определяющей температуры процесса образования сажи была принята средняя интегральная температура фронта пламени, усредненная в диапазоне от температуры воздуха до температуры продуктов сгорания по константе скорости гетерогенного процесса поверхностного роста частиц сажи при линейном профиле температур по фронту пламени (рис. 4).

В предпламенной реакционной зоне частица сажи зарождается из молекулярных предшественников, среди которых ключевым является ацетилен. После зарождения частиц и возникновения твердой фазы начинается рост частиц за счет гетерогенных реакций и коалесценции частиц. Предложено несколько механизмов (вариантов) процесса гетерогенного роста массы дисперсного углерода. Наибольшее распространение получил механизм НАСА (HydrogenAbstractionCarbonAddition), хотя в литературе были предложены и другие пути, такие, как механизм винилдобавления водорода (HAVA), механизм роста через конъюгированные полиеновые радикалы, фенильный механизм и др.

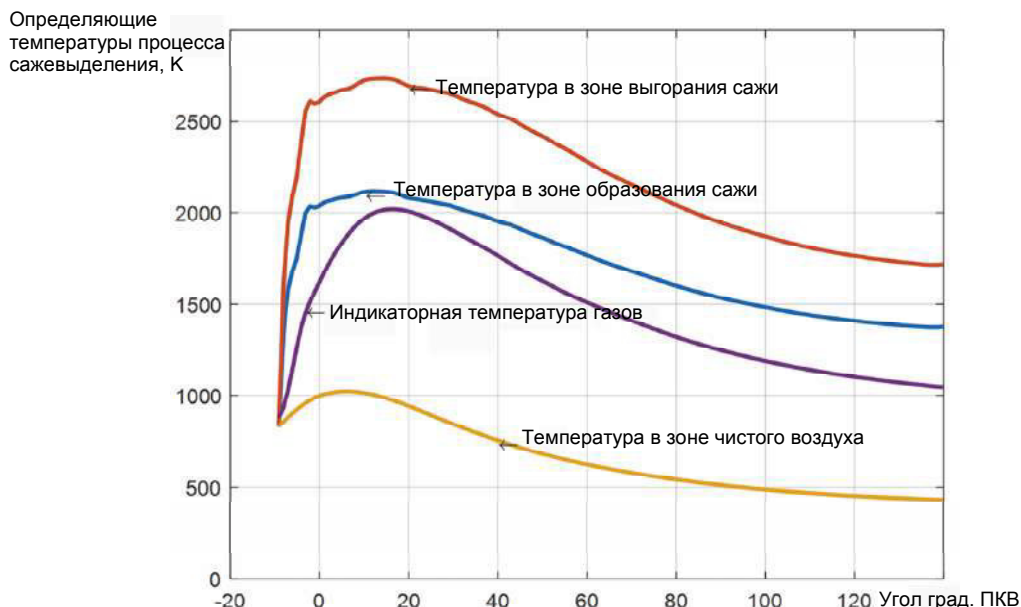


Рис. 4. Определяющие температуры процесса сажевыделения

Fig. 4. Determining the temperature of the process of soot

Маршрут механизма НАСА наиболее широко используется при моделировании образования сажи. Ключевую роль в кинетическом механизме играет ограниченное число компонентов (Н, О₂, С₂Н₂, ПАУ). Установлено, что именно ацетиленовые и пропаргиловые соединения оказывают большее влияние на конечный выход сажи, по-

этому большинство исследователей используют ацетилен в качестве основного предшественника сажи. В работе [8] предложен кинетический механизм образования сажи в цилиндре дизеля, состоящий из относительно небольшого количества реакций, что позволяет существенно сократить время вычислений (см. табл.).

Механизм образования сажи в дизелях при работе на дизельном топливе [8]

The mechanism of soot formation in diesel engines when working on diesel fuel [8]

Номер реакции	Реакция	lgA	B	E
<i>Термический крекинг углеводородов топлива</i>				
1	$(C_{14}H_{30})_n \rightarrow 2C_3H_6 + 3,5C_2H_4 + CH_4$	14	0	272
2	$(C_{14}H_{30})_n \rightarrow (C_{14}H_{30})_n$	14	0	272
3	$(C_6H_4CH_3CH_3)A \rightarrow C_6H_5CH_3 + 0,5C_2H_2 + 0,5H_2$	13,5	0	255
4	$C_3H_6 \rightarrow C_2H_4 + 0,5C_2H_2 + 0,5H_2$	13	0	304
5	$C_2H_4 \rightarrow C_2H_2 + H_2$	11,5	0	265
6	$CH_4 \rightarrow 0,5C_2H_4 + H_2$	13,5	0	398
7	$C_6H_5CH_3 \rightarrow 0,5C_2H_4 + 0,5H_2 + C_6H_5$	13,5	0	362
8	$C_6H_5 \rightarrow C_6H_3 + H_2$	13,5	0	190
<i>Механизм начальной стадии образования сажи</i>				
9	$C_2H_2 \rightarrow C_2H + H$	13,5	0	473
10	$C_2H_2 + C_2H_2 \rightarrow C_4H_3 + H$	13	0	190
11	$C_2H_2 + H \rightarrow C_2H + H_2$	14,18	0	79,6
12	$C_2H + H + M \rightarrow C_2H_2 + M$	16,86	0,573	-81,5

Продолжение таблицы

Номер реакции	Реакция	lgA	B	E
13	$C_2H_2 + C_2H \rightarrow C_4H_2 + H$	13,6	0	0
48	$H + H + M \rightarrow H_2 + M$	16,99	-0,6	0
14	$C_4H_3 \rightarrow C_4H_2 + H$	11,07	0	190
15	$C_4H_2 + M \rightarrow C_4H + H + M$	17,54	0	335
16	$C_4H + C_2H_2 \rightarrow C_6H_3$	11,81	0	27,2
17	$C_6H_3 \rightarrow C_6H_2 + H$	13,5	0	190
18	$C_4H + C_2H_2 \rightarrow C_6H_2 + H$	13,6	0	0
19	$C_6H_2 + M \rightarrow C_6H + H + M$	16,7	0	335
20	$C_6H + C_2H_2 \rightarrow C_8H_3$	11,81	0	27,2
21	$C_8H_3 \rightarrow C_8H_2 + H$	13,5	0	190
22	$C_6H + C_2H_2 \rightarrow C_8H_2 + H$	12,78	0	27,2
23	$C_8H_2 + M \rightarrow C_8H + H + M$	16,7	0	335
24	$C_8H + C_2H_2 \rightarrow C_{10}H_3$	11,81	0	27,2
25	$C_{10}H_3 \rightarrow C_{10}H_2 + H$	13,5	0	190
26	$C_8H + C_2H_2 \rightarrow C_{10}H_2 + H$	12,78	0	27,2
27	$C_{10}H_2 + M \rightarrow C_{10}H + H + M$	16,7	0	335
<i>Образование зародышей</i>				
28	$C_{10}H_2 + C_2H \rightarrow C_{12}H_2 + H$	12	0	0
29	$C_{10}H + C_2H_2 \rightarrow C_{12}H_2 + H$	12,78	0	27,2
<i>Гетерогенные реакции на поверхности частиц</i>				
30	$C_{12}H_2 + C_2H_2 \rightarrow C_{12}H_2 + H_2 + C_2$	13,2	0	131
31	$C_{12}H_2 + C_2H \rightarrow C_{12}H_2 + H + C_2$	11,56	0,5	0
32	$C_{12}H_2 + C_4H_2 \rightarrow C_{12}H_2 + H_2 + 2C_2$	11,41	0,5	0
33	$C_{12}H_2 + C_4H \rightarrow C_{12}H_2 + H + 2C_2$	11,41	0,5	0
34	$C_{12}H_2 + C_6H_2 \rightarrow C_{12}H_2 + H_2 + 3C_2$	11,33	0,5	0
35	$C_{12}H_2 + C_6H \rightarrow C_{12}H_2 + H + 3C_2$	11,33	0,5	0
36	$C_{12}H_2 + C_8H_2 \rightarrow C_{12}H_2 + H_2 + 4C_2$	11,27	0,5	0
37	$C_{12}H_2 + C_8H \rightarrow C_{12}H_2 + H + 4C_2$	11,27	0,5	0
38	$C_{12}H_2 + C_{10}H_2 \rightarrow C_{12}H_2 + H_2 + 5C_2$	11,22	0,5	0
39	$C_{12}H_2 + C_{10}H \rightarrow C_{12}H_2 + H + 5C_2$	11,22	0,5	0
<i>Гибель зародышей на частицах сажи</i>				
40	$C_{12}H_2 + C_{12}H_2 \rightarrow C_{12}H_2 + H_2 + 6C_2$	11,19	0,5	0
<i>Коагуляция частиц сажи</i>				
52	$C_{12}H_2 + C_{12}H_2 \rightarrow C_{12}H_2$	12,92	0,5	0
<i>Окисление и газификация частиц сажи</i>				
41	$(C_{12}H_2 + 0,5 C_2) + O_2 \rightarrow CO_2 + C_{12}H_2$	3,463	0	0
42	$(C_{12}H_2 + 0,5 C_2) + 0,5 O_2 \rightarrow CO + C_{12}H_2$	3,463	0	0
43	$(C_{12}H_2 + 0,5 C_2) + CO_2 \rightarrow 2 CO + C_{12}H_2$	3,463	0	0
44	$(C_{12}H_2 + 0,5 C_2) + H_2O \rightarrow CO + H_2 + C_{12}H_2$	3,463	0	0
<i>Окисление углеводородов и реакции равновесия</i>				
45	$C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2CO + H_2$	9,221	1	163,2
49	$2CO + H_2 \rightarrow C_2H_2 + O_2$	—	—	—
46	$H_2 + 0,5 O_2 \rightarrow H_2O$	14,56	0	28,7



Окончание таблицы

Номер реакции	Реакция	lgA	B	E
50	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 0,5 \text{O}_2$	—	—	—
47	$\text{CO} + 0,5 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	10,212	—	118,4
51	$\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + 0,5 \text{O}_2$	—	—	—
53	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	13,5	0	0
54	$\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	—	—	—
55	$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$	13,5	0	0
56	$2\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	—	—	—
57	$\text{CH}_4 + \text{CH}_4 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + 3\text{H}_2$	13,5	0	0
58	$\text{C}_2\text{H}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CH}_4$	—	—	—

В данной модели компонент C_{12}H_2 представляет частицу сажи, которая рассматривается в качестве «крупной молекулы».

Для определения концентрации компонентов газовой смеси в реакционной зоне был использован метод решения прямой задачи химической кинетики. Скорость изменения концентрации i -го компонента газовой смеси в предпламенной зоне может быть выражена уравнением

$$\frac{dM_i}{d\varphi} = \left(\frac{dM_i}{d\varphi} \right)_{\sigma} + \left(\frac{dM_i}{d\varphi} \right)_k + \left(\frac{dM_i}{d\varphi} \right)_{\chi}, \quad (1)$$

где φ — угол поворота коленчатого вала дизеля, град. ПКВ; $dM_i/d\varphi$ — суммарная скорость изменения концентрации i -го компонента газовой смеси; $(dM_i/d\varphi)_{\sigma}$ — скорость изменения концентрации i -го компонента, связанного с подводом испаренного топлива; $(dM_i/d\varphi)_k$ — скорость изменения концентрации i -го компонента вследствие предпламенных химических превращений топлива; $(dM_i/d\varphi)_{\chi}$ — скорость изменения концентрации i -го компонента в процессе основного горения.

Количество dM_i молей i -го вещества, выводимого из зоны пиролиза, зависит от его объемной концентрации и пропорционально доле выгорающего топлива, моль/град ПКВ:

$$\frac{dM_i}{d\varphi} = M_i \frac{dx/d\varphi}{\sigma_u - x} = M_i B,$$

где x — интегральная функция тепловыделения; σ_u — интегральный закон испарения топлива в камере сгорания.

Скорости химических превращений реагентов газовой смеси определяются по уравнению

$$\left(\frac{dM_i}{d\varphi} \right)_k = V_p \sum_j W_j,$$

где V_p — объем реакционной зоны; W_j — скорость j -й химической реакции кинетического механизма.

Скорости реакций рассчитываются по известным зависимостям с использованием справочных данных, приведенных в таблице.

Объем реакционной зоны определяется из расчета суммарного числа молей:

$$V_p = 83,14 \cdot \sum R_i T_i \frac{1}{P},$$

где R_i — количество молей i -го компонента газа в расчете на кг ДТ; T_i — температура в реакционной зоне; P — текущее давление в цилиндре.

Для определения массы сажи в цилиндре необходимо решить уравнение (1) относительно частиц C_2 . Учитывая реакций 30–44 таблицы уравнение (1) может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} \frac{dM_{\text{C}_2}}{d\varphi} = & M_{\text{C}_2\text{H}} A + \frac{1}{6nV_p} [K_{30}[\text{C}_2\text{H}_2] + \\ & + K_{31}[\text{C}_2\text{H}] + 2(K_{32}[\text{C}_4\text{H}_2] + K_{33}[\text{C}_4\text{H}]) + \\ & + 3(K_{34}[\text{C}_6\text{H}_2] + K_{35}[\text{C}_6\text{H}]) + \\ & + 4(K_{36}[\text{C}_8\text{H}_2] + K_{37}[\text{C}_8\text{H}]) + \\ & + 5(K_{38}[\text{C}_{10}\text{H}_2] + K_{39}[\text{C}_{10}\text{H}]) + \\ & + 6K_{40}[\text{C}_{12}\text{H}_2] - 0,5(K_{41} + K_{42} + K_{43} + \\ & + K_{44})] - M_{\text{C}_2} B, \end{aligned} \quad (2)$$

где M_{C_2} — количество частиц C_2 на поверхности частиц, моль/кг; $M_{\text{C}_2\text{H}}$ — начальное содержание C_2 ; n — частота вращения коленчатого вала дизеля; A — относительная функция подвода

компонента газа в реакционную зону в процессе испарения топлива.

Для определения совокупной массы частиц сажи в зоне термического крекинга необходимо количество сажи умножить на молярную массу C_2 :

$$N_{\text{обр}} = 24 M_{C_2}.$$

Число N_c атомов углерода в частице сажи с её диаметром связано соотношением

$$D_c = 0,2715 \cdot 10^{-9} \sqrt[3]{N_c}.$$

Поскольку в условиях дизеля сорбционные реакции на поверхности частицы сажи протекают практически мгновенно, химический процесс горения углеродных частиц лимитируется скоростью диффузии, которая зависит от условий протекания рабочего процесса. Это значит, что скорость выгорания сажи определяется концентрацией основных окислительных компонентов в газовом потоке.

Скорость газификации твердого углерода в зоне выгорания сажи определяется по уравнению [9]

$$\frac{dN_{\text{сг}}}{d\varphi} = - \frac{N_c F_y J_c}{4 \cdot 6n}, \quad (5)$$

где J_c — суммарный поток углерода, $\text{г}/(\text{м}^2 \text{ с})$; F_y — удельная поверхность частиц сажи, $\text{г}/\text{м}^2$.

Величина J_c рассчитывается по выражениям для всех реакций газификации свободным, оставшимся от сгорания топлива кислородом воздуха, углекислым газом и парами воды частиц сажи. Состав продуктов сгорания и величина потока углерода рассчитываются по отдельным подпрограммам (рис. 5).

С началом активного тепловыделения концентрация кислорода в локальной зоне горения постепенно падает и достигает минимальных значений после второго максимума скорости тепловыделения. Дальнейший рост концентрации кислорода связан с его диффузией в зону горения, вызванной ростом температуры газов и окончанием фазы диффузионного сгорания. Снижение концентраций углекислого газа и воды в зоне горения вызвано их отводом в зону продуктов сгорания и расходом на окисление сажи [11, 12].

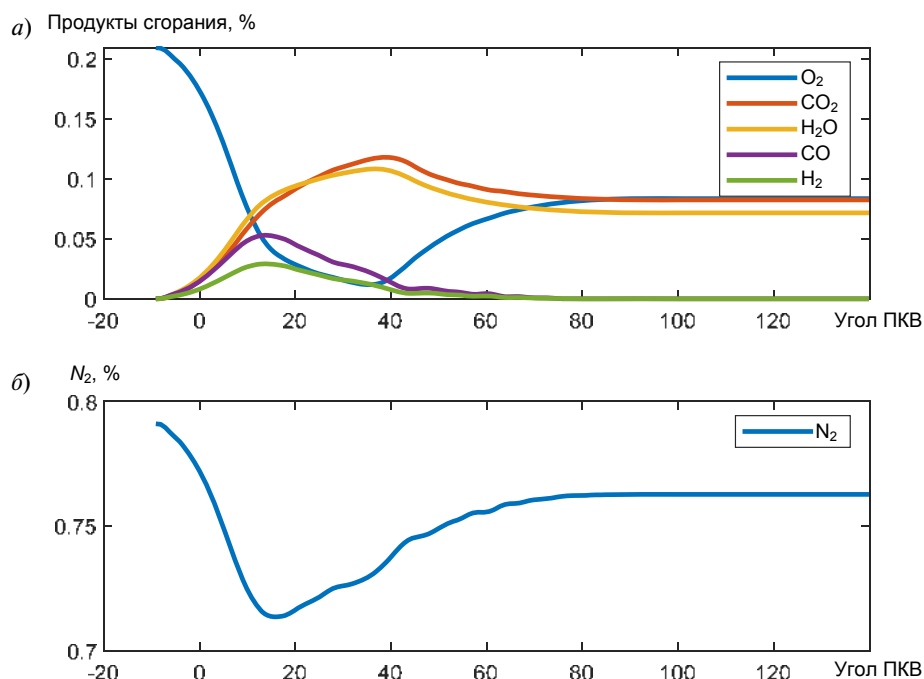


Рис. 5. Состав газов в зоне выгорания частицы сажи
Fig. 5. Composition of gases in the burn-up zone of soot particles

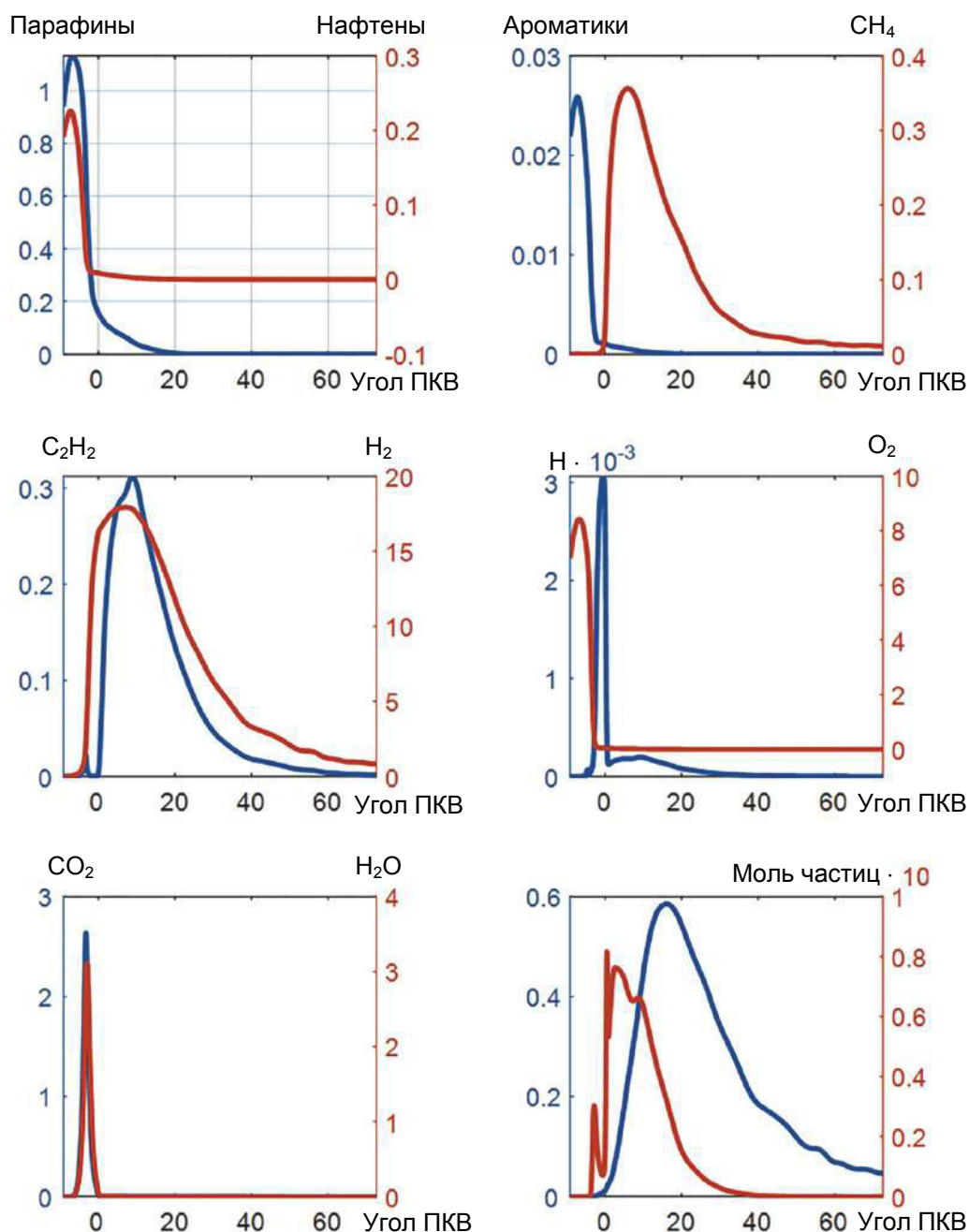


Рис. 6. Содержание, моль/кг, компонентов газовой смеси в предпламенной зоне
 Fig. 6. The content, mol/kg, of components of the gas mixture in predpremerly area

Результаты и обсуждение

В результате численного решения системы уравнений получаем текущее содержание компонентов газовой смеси в реакционной зоне (рис. 6).

Концентрация кислорода, поступающего вместе с воздухом в реакционную зону, очень

быстро падает после начала активного тепло-выделения. Вместе с этим на короткое время растет содержание продуктов полного сгорания углеводородов топлива. Затем начинается рост содержания продуктов глубокого пиролиза в реакционной зоне — ацетилена и метана. Подходящий в зону реакции кислород быстро

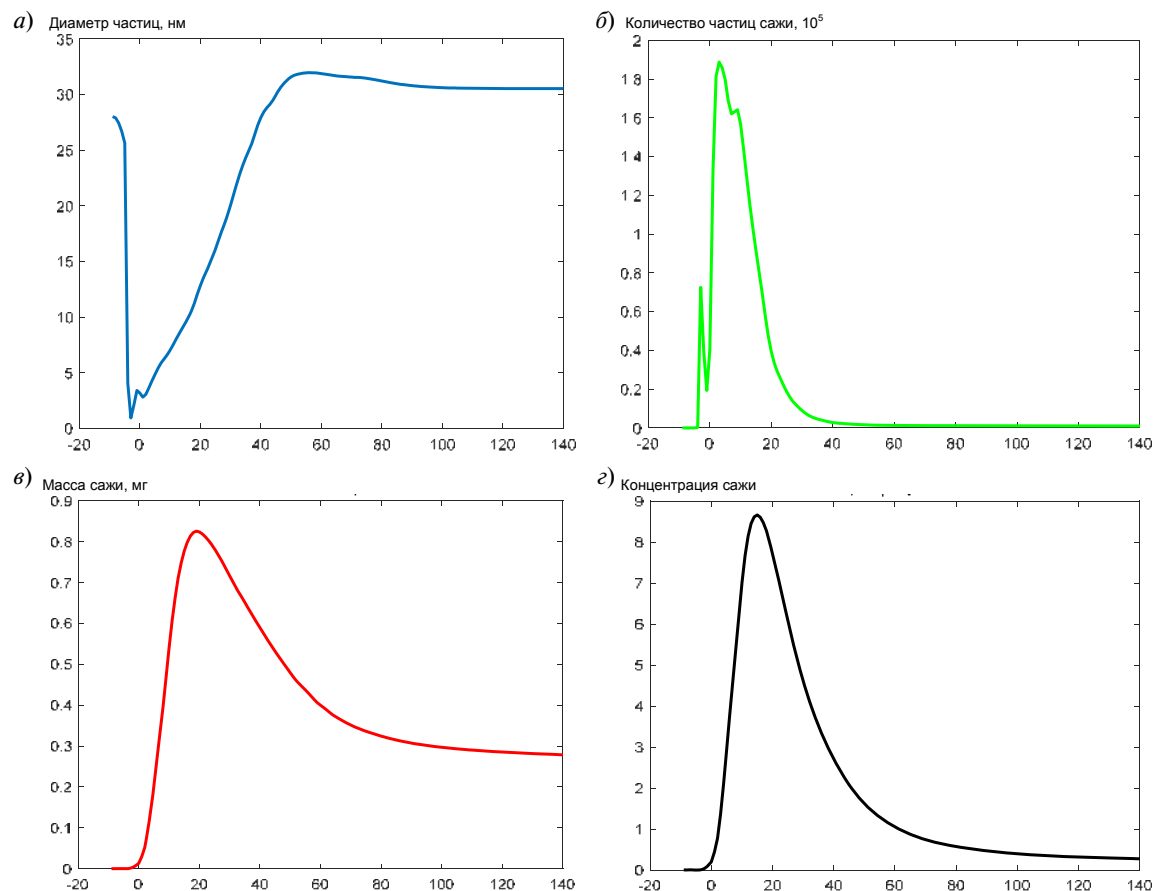


Рис. 7. Показатели сажесодержания в цилиндре дизеля в зависимости от угла ПКВ
Fig. 7. Indicators of soot content in the diesel cylinder depending on the angle of the RCS

расходуется на реакции окисления и выводится с продуктами сгорания, поэтому его концентрация квазистационарна. Ускоренный гетерогенный рост сажи происходит при высокой температуре в реакционной зоне и достаточной концентрации углеводородного «сырья», в том числе молекул ацетилена. Падение массы сажи, выраженное в молях частиц C_2 , связано с выходом частиц сажи из реакционной зоны [13].

Частицы сажи в предпламенной зоне формируются с некоторой задержкой после начала тепловыделения при гомогенном горении топлива. При этом проявляется первый пик концентрации частиц. Как видно по результатам численного моделирования, большая часть частиц образуется при диффузионном сгорании

топлива. Частицы сажи продолжают образование до момента окончания подвода испаренного топлива в реакционную зону. Скорость образования частиц замедляется с увеличением скорости расходования зародышей сажи на гетерогенный рост дисперсного углерода на поверхности. Уменьшение количества частиц в зоне образования связано с процессом коагуляции и отводом частиц из зоны реакции [14].

Суммарные показатели сажесодержания в объеме цилиндра представлены на рис. 7. По результатам численного моделирования установлено, что минимальный средний диаметр частиц в цилиндре составляет 0,8 нм при угле 3,3 град. ПКВ до ВМТ. Максимальное количество частиц составило $2 \cdot 10^{15}$ при 0,5 градусов ПКВ. Максимальная масса сажи в цилиндре



превысила 0,82 мг. Угол, соответствующий максимальному содержанию сажи, — 19,2 град. ПКВ. В дальнейшем скорость газификации превысила скорость гетерогенного роста частиц сажи, и масса дисперсного углерода начала снижаться. Вместе с тем падала температура процесса выгорания, однако диффузия окислителя из участков камеры сгорания, не охваченных пламенем, поддерживала процесс интенсивной газификации. В результате суммарная масса частиц сажи в цилиндре упала до 0,279 мг при открытии выпускного клапана. При этом интенсивность процесса газификации существенно сократилась и не играла большой роли в суммарном сажевыделении. Учитывая падение температуры продуктов сгорания в выпускной системе дизеля, можно принять массу сажи при открытии выпускного клапана равной массе сажи при измерении в ОГ дизеля. При этом концентрация сажи в ОГ изменяется, поскольку изменяются параметры состояния газа [15].

Максимальная расчетная концентрация сажи в цилиндре достигается при 15 град. ПКВ после ВМТ и составляет 8,7 г/м³. В ОГ концентрация падает до 0,348 г/м³, что соответствует 4,8 ед. по шкале Bosch. Средний расчетный диаметр частиц сажи при открытии выпускного клапана составляет 30,5 нм. Расчетное количество частиц сажи средним диаметром 30,5 нм и плотностью 1,9 г/см³ при открытии выпускного клапана составляет $9,84 \cdot 10^{12}$ шт.

Заключение

По результатам численного моделирования получено содержание компонентов газовой смеси в реакционной зоне в зависимости от угла поворота коленчатого вала и определены такие показатели сажесодержания в объеме цилиндра, как минимальный средний диаметр частиц, максимальная масса сажи, угол, соответствующий максимальному содержанию сажи, суммарная масса частиц сажи в цилиндре и суммарное сажевыделение.

Рассчитанная динамика показателей сажевыделения в целом соответствует современным представлениям о механизме и основных этапах процессов образования и выгорания сажи в дизеле. Результаты моделирования дымности ОГ дизеля подтверждаются экспериментальными измерениями на различных режимах работы дизеля. Следовательно, представленная модель может быть использована для прогнозирования дымности ОГ дизелей при различных нагрузочных и скоростных режимах работы.

Авторы выражают глубокую благодарность за помощь и участие в выполнении отдельных этапов работы по моделированию сажеобразования в тепловых двигателях академику РАН, научному руководителю Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого **Юрию Сергеевичу Васильеву**.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Васильев Ю.С.** Избранные сочинения. Экология. Охрана окружающей среды: сборник статей. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. университета, 2017. 220 с.
2. **Frances C. Moore.** Climate change and air pollution: exploring the synergies and potential for mitigation in industrializing countries // Sustainability. 2009. №1. P. 43–54.
3. **Sanli H., Canakci M., Alptekin E. [et al.]**. Effects of Waste Frying Oil Based Methyl and Ethyl Ester Biodiesel Fuels on the Performance, Combustion and Emission Characteristics of a di Diesel Engine // Fuel. 2015. Vol. 159. P. 179–187.
4. **Arent D.J., Wise A., Gelman R.** The status and prospects of renewable energy for combating global warming // Energy Economics. 2011. Vol. 33. Issue 4. P. 584–593.
5. **Titak W., Szwaja S., Lukacs K. [et al.]**. Alcohol-Diesel Fuel Combustion in the Compression Ignition Engine // Fuel. 2015. Vol. 154. P. 196–206.
6. **Козлов А.Н., Арасланов М.И.** Определение оптимальных установочных углов опережения

впрыскивания топлива дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и рапсовом масле // Аграрный научный журнал. 2014. № 6. С. 47–49.

7. **Лиханов В.А., Лопатин О.П.** Снижение токсичности отработавших газов автомобильного дизеля конвертацией на спирто-топливные эмульсии // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. №10. С. 54–59.

8. **Кожин Д.В.** Физико-химические основы математического моделирования процесса образования и выгорания сажи в дизельных ДВС: Монография. Йошкар-Ола: Изд-во Поволжского государственного технологического университета, 2015. 176 с.

9. **Агафонов Г.Л., Власов П.А., Рябиков О.Б.** Численное моделирование снижения образования твердых частиц сажи в камере сгорания дизелях // Горение и взрыв. 2017. Т. 10. № 3. С. 15–21.

10. **Разлейцев Н.Ф.** Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях. Харьков: Вища школа, 1980. 169 с.

11. **Kopeika A.K., Golovko V.V., Zolotko A.N. [et al.].** Influence of Biofuel Additions on the Ignition Delay of Single Diesel Fuel Drops // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2015. Vol. 88. № 4. P. 948–957.

12. **Mwangi J.K., Lee W.J., Chang Y.C. [et al.].** An Overview: Energy Saving and Pollution Reduction by Using Green Fuel Blends in Diesel Engines // Applied Energy. 2015. Vol. 159. С. 214–236.

13. **Lif A., Holmberg K.** Water-in-diesel emulsions and related systems // Advances in Colloid and Interface Science. 2006. Vol. 123. № 126. P. 231–239.

14. **Likhanov V.A., Lopatin O.P.** Use of Natural Gas, Methanol, and Ethanol Fuel Emulsions as Environmentally Friendly Energy Carriers for Mobile Heat Power Plants // Thermal Engineering. 2017. Vol. 64. № 12. P. 935–944.

15. **Torres-Jimenez E., Jerman M.S., Gregorc A. [et al.].** Physical and Chemical Properties of Ethanol-Diesel Fuel Blends // Fuel. 2011. Vol. 90. № 2. С. 795–802.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛИХАНОВ Виталий Анатольевич — доктор технических наук профессор Вятской государственной сельскохозяйственной академии

E-mail: lihanov.va@mail.ru

ЛОПАТИН Олег Петрович — кандидат технических наук доцент Вятской государственной сельскохозяйственной академии

E-mail: nirs_vsaa@mail.ru

КОЗЛОВ Андрей Николаевич — ассистент Вятской государственной сельскохозяйственной академии

E-mail: dnka59@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 21.01.2019

REFERENCES

[1] **Vasilyev Yu.S.** Izbrannyye sochineniya. Ekologiya. Okhrana okruzhayushchey sredy: sbornik statey. Sankt-Peterburg: Izd-vo Politekh. Universiteta, 2017. 220 s. (rus.)

[2] **Frances C. Moore** Climate change and air pollution: exploring the synergies and potential for mitigation in industrializing countries. *Sustainability*. 2009. № 1. P. 43–54. (rus.)

[3] **Sanli H., Canakci M., Alptekin E. [et al.].** Effects of Waste Frying Oil Based Methyl and Ethyl Ester Biodiesel Fuels on the Performance, Combustion and Emission Characteristics of a di Diesel Engine. *Fuel*. 2015. Vol. 159. P. 179–187.

[4] **Arent D.J., Wise A., Gelman R.** The status and prospects of renewable energy for combating global warming. *Energy Economics*. 2011. Vol. 33. Issue 4. P. 584–593.

[5] **Titak W., Szwaja S., Lukacs K. [et al.].** Alcohol-Diesel Fuel Combustion in the Compression Ignition Engine. *Fuel*. 2015. Vol. 154. P. 196–206.

[6] **Kozlov A.N., Araslanov M.I.** Opredeleniye optimalnykh ustanovochnykh uglov operezheniya vpryskivaniya topliva dizelya 2Ch 10,5/12,0 pri rabote na etanole i rapsovom masle. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal*. 2014. № 6. С. 47–49. (rus.)



- [7] **Likhanov V.A., Lopatin O.P.** Snizheniye toksichnosti otrabotavshikh gazov avtomobilnogo dizel-ya konvertatsiyey na spirto-toplivnyye emulsii. *Ekologiya i promyshlennost Rossii*. 2018. T. 22. №10. S. 54–59.
- [8] **Kozhin D.V.** Fiziko-khimicheskiye osnovy matematicheskogo modelirovaniya protsessa obrazovaniya i vygoraniya sazhi v dizelnykh DVS: monografiya. Yoshkar-Ola: Izd-vo Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta, 2015. 176 s. (rus.)
- [9] **Agafonov G.L., Vlasov P.A., Ryabikov O.B.** Chislennoye modelirovaniye snizheniya obrazovaniya tverdykh chastits sazhi v kamere sgoraniya dizelyakh. *Gorenije i vzryv*. 2017. T. 10. № 3. S. 15–21. (rus.)
- [10] **Razleytsev N.F.** Modelirovaniye i optimizatsiya protsessa sgoraniya v dizelyakh. Kharkov: Vishcha shkola, 1980. 169 s. (rus.)
- [11] **Kopeika A.K., Golovko V.V., Zolotko A.N.[et al.].** Influence of Biofuel Additions on the Ignition Delay of Single Diesel Fuel Drops. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2015. Vol. 88. № 4. P. 948–957.
- [12] **Mwangi J.K., Lee W.J., Chang Y.C. [et al.].** An Overview: Energy Saving and Pollution Reduction by Using Green Fuel Blends in Diesel Engines. *Applied Energy*. 2015. Vol. 159. S. 214–236.
- [13] **Lif A., Holmberg K.** Water-in-diesel emulsions and related systems. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2006. Vol. 123. № 126. P. 231–239.
- [14] **Likhanov V.A., Lopatin O.P.** Use of Natural Gas, Methanol, and Ethanol Fuel Emulsions as Environmentally Friendly Energy Carriers for Mobile Heat Power Plants. *Thermal Engineering*. 2017. Vol. 64. № 12. P. 935–944.
- [15] **Torres-Jimenez E., Jerman M.S., Gregorc A. [et al.].** Physical and Chemical Properties of Ethanol-Diesel Fuel Blends. *Fuel*. 2011. Vol. 90. № 2. S. 795–802.

THE AUTHORS

LIKHANOV Vitalii A. — *Vyatka state agricultural academy*

E-mail: lihanov.va@mail.ru

LOPATIN Oleg P. — *Vyatka state agricultural academy*

E-mail: nirs_vsaa@mail.ru

KOZLOV Andreii N. — *Vyatka state agricultural academy*

E-mail: dnka59@mail.ru

Received: 21.01.2019

DOI: 10.18721/JEST.25106
УДК 621.313.322

О.О. Переслыцких, А.Н. Беляев

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

УСТОЙЧИВОСТЬ СВЕРХДАЛЬНИХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С УПРАВЛЯЕМОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

Работа посвящена исследованию сверхдальних линий электропередачи сверхвысокого напряжения с установкой управляемых шунтирующих реакторов для компенсации параметров линии и синхронных компенсаторов небольшой мощности для повышения статической устойчивости. Рассмотрены режимы работы линии длиной 4000 км. Проанализировано влияние мест установки и мощности синхронных компенсаторов на предел передаваемой мощности. Показано, что координированное управление средствами поперечной компенсации на сверхдальних линиях электропередачи позволяет существенно увеличить предел передаваемой мощности и уровень их статической устойчивости.

Ключевые слова: сверхдальние линии электропередачи, статическая устойчивость, установившиеся режимы, устройство поперечной компенсации, управляемый шунтирующий реактор, синхронный компенсатор.

Ссылка при цитировании:

О.О. Переслыцких, А.Н. Беляев. Устойчивость сверхдальних линий электропередачи с управляемой поперечной компенсацией // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 60–70. DOI: 10.18721/JEST.25106.

O.O. Pereslytskikh, A.N. Belyaev

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

STABILITY OF ULTRA-LONG TRANSMISSION LINES WITH CONTROLLED SHUNT COMPENSATION

The paper is dedicated to investigation of ultra-high voltage long-distance transmission lines with controlled shunt reactors installed to compensate for line parameters and with synchronous condensers to increase small signal stability. The operating conditions of a 4000 km line are considered. The effect of installation sites and capacity of synchronous condensers on transmission limits is analyzed. It is shown that using coordinated control of means of shunt compensation on ultra-long transmission lines allows to significantly increase not only the limit of transmission power, but also the level of small signal stability for these lines.

Keywords: ultra-long distance AC transmission system, shunt compensation, operating conditions, small signal stability, controlled shunt reactor, static var compensator, synchronous condenser.

Citation:

O.O. Pereslytskikh, A.N. Belyaev, Stability of ultra-long transmission lines with controlled shunt compensation, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 60–70, DOI: 10.18721/JEST.25106.



Введение

По мере увеличения длины линий электропередачи и объединения энергетических систем возникают проблемы с реализацией режимов передачи мощностей как по условию устойчивой работы, так и из-за недопустимого повышения напряжения в промежуточных точках линии [1, 2].

В Китае остро встал вопрос о расширении генерации электрической энергии. К 2020 году планируется увеличить установленную мощность с 1000 до 1900 ГВт, из которых 160 ГВт будут вырабатываться ветряными и 30 ГВт солнечными электростанциями. Однако вклад угольных станций останется высоким [3]. При этом две трети угольных запасов расположены на севере и северо-западе Китая, тогда как основная часть потребителей электроэнергии находится вдоль побережья (рис. 1). Поэтому в равной степени рассматриваются варианты строительства линий постоянного (± 800 и 1100 кВ) и переменного (1000 и 1200 кВ) тока [4].

Как известно, на передачах постоянного тока не требуется установка устройств компенсации реактивной мощности на линиях. Однако для обеспечения преобразования переменного тока в постоянный и обратно с обеих сторон необходимы регулируемые источники реактивной мощности [5]. Кроме того, затраты на установку и обслуживание преобразовательных устройств оказываются сравнимыми с затратами на сооружение линий. Постепенное развитие промышленности в Китае предполагает появление крупных кластеров потребителей не только вдоль побережья, но и внутри страны. В этом случае появится необходимость и в значительном отборе мощности вдоль линий, поэтому вариант строительства линий переменного тока становится более предпочтительным.

Для увеличения предельной передаваемой мощности и улучшения условий статической устойчивости было предложено использовать синхронные компенсаторы (СК) небольшой мощности в дополнение к управляемым шунтирующим реакторам (УШР). Синхронный

компенсатор, установленный на линии, в нормальном режиме не потребляет и не выдает реактивную мощность. Поэтому значение его номинальной мощности составляет порядка 3–5 % от мощности генератора [6].

Совместное применение синхронных компенсаторов ограниченной мощности и мощных управляемых шунтирующих реакторов позволяет снять какие-либо ограничения на длину линии переменного тока. Стоит отметить, что выполнение схемы с параллельной работой двух управляемых компенсирующих устройств – СК и УШР – имеет ряд преимуществ. Во-первых, оба устройства являются стандартными при сравнительно малой стоимости установки и небольшой номинальной мощности СК, а их совместная работа позволяет не только сохранить достоинства каждого элемента в отдельности, но и частично устранить их недостатки. Во-вторых, подобное решение позволяет существенно расширить диапазон возможных режимов дальних электропередач переменного тока и сделать управление этими режимами гибким [7, 8].

Основной целью нашей работы является исследование применения управляемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности для улучшения характеристик установившихся режимов и повышения уровня статической устойчивости сверхдальних линий электропередачи переменного тока длиной до 4000 км.

При этом решаются следующие задачи:

1) анализ установившихся режимов линии электропередачи переменного тока; определение предельных передаваемых мощностей; выбор и оптимизация мест установки и минимально необходимых объемов устройств управляемой поперечной компенсации;

2) исследование статической устойчивости линии электропередачи в широком диапазоне режимов: от холостого хода до режима передачи натуральной мощности; анализ совместной работы статических тиристорных и синхронных компенсаторов (СТК/СК) в составе различных схем компенсации параметров линий;

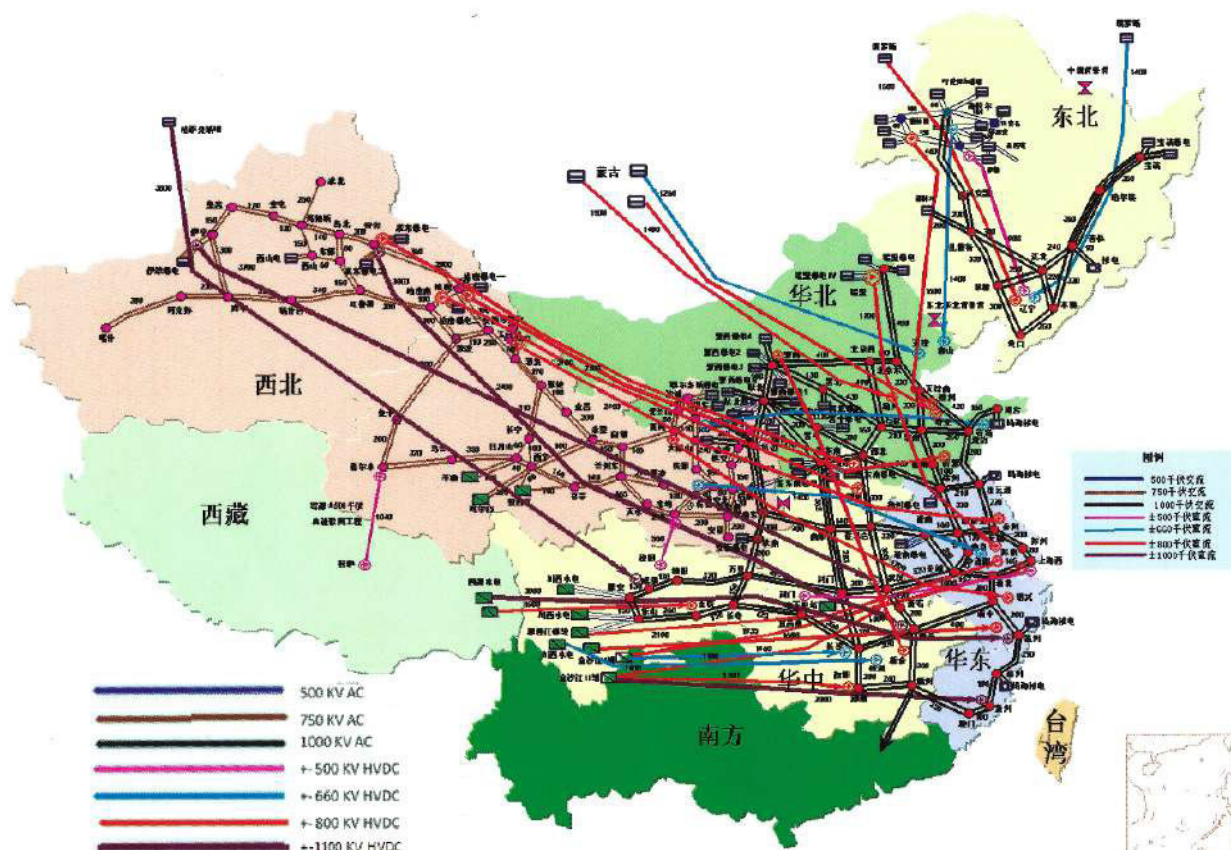


Рис. 1. План развития сетей сверхвысокого напряжения в Китае на 2020 год

Fig. 1. Development of ultra-high voltage networks in China to 2020

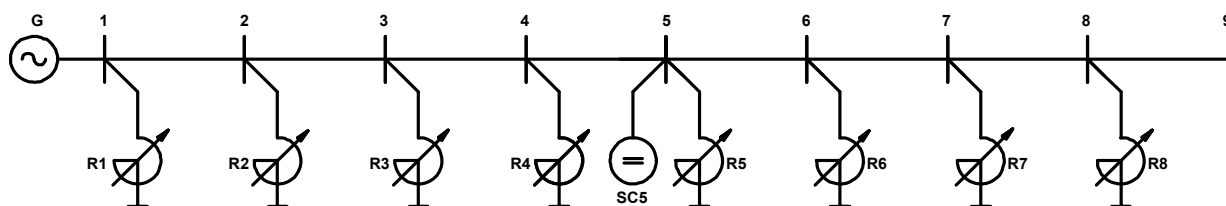


Рис. 2. Упрощенная схема электропередачи с одним синхронным компенсатором

Fig. 2. Simplified diagram of transmission system with one synchronous condenser

3) определение требований к структуре автоматических регуляторов устройств поперечной компенсации, установленных в промежуточных точках электропередачи, совместная координация настроек регуляторов в рассматриваемой системе для обеспечения максимального демпфирования колебаний.

Анализ режимов и устойчивости линии электропередачи длиной 4000 км с одним синхронным компенсатором

Рассмотрим линию длиной 4000 км, разбитую на восемь участков по 500 км каждый (рис. 2). Расчетная схема представляет собой эквивалентный генератор, работающий параллельно с приемной системой неограниченной



мощности через дальнюю линию электропередачи переменного тока класса 1150 кВ, моделируемую цепочной схемой. Натуральная мощность такой линии при использовании компактной конструкции составляет 7340 МВА. Каждый участок цепочной схемы эквивалентруется стандартной П-схемой замещения. В узлах 1–8 расположены управляемые устройства компенсации реактивной мощности (УШР или СТК; R1–R8), способные как потреблять, так и выдавать реактивную мощность в сеть. В узле 5 также находится синхронный компенсатор небольшой мощности (SC5), предназначенный для демпфирования колебаний. В нормальном режиме работы его реактивная мощность равна нулю.

Синхронные машины моделируются полными уравнениями Парка–Горева без учета быстропереходных процессов в статорных контурах. Статические устройства компенсации реактивной мощности задаются переменными проводимостями без учета процессов в стали. Генератор и синхронный компенсатор оснащены системой АРВ сильного действия с каналами по отклонению напряжения и частоты, а также их производным. В статических устройствах компенсации принята система регулирования с обратными связями по напряжению, частоте и ее производной. В общей сложности количество настраиваемых параметров равно 32 (по четыре в генераторе отправной станции и синхронном компенсаторе и по три в каждом из восьми СТК [9]).

Порядок анализа устойчивости следующий. Задается активная мощность генератора, по которой с помощью угловых характеристик определяются потоки реактивной мощности вдоль линии; из баланса по реактивной мощности находятся проводимости СТК в узлах 1–8 схемы. Далее задаются границы изменения напряжения в узлах схемы, по которым определяются новые значения проводимостей,

обеспечивающие требуемые напряжения. Найденные проводимости подставляются в полную динамическую модель электропередачи, с помощью которой рассчитываются переходные процессы и определяются собственные значения матрицы переменных состояния. Далее с помощью *метода сдвига собственных значений* [6, 10] проводится оптимизация настроек систем регулирования всех элементов электропередачи (генератор, восемь СТК и синхронный компенсатор) при желаемой степени затухания α_0 , которая по умолчанию принята равной -3 с^{-1} .

С помощью рассматриваемого метода оптимизации находили такое максимальное значение передаваемой мощности, при котором система все еще является статически устойчивой. В табл. 1 представлены результаты: i – номер узла (см. рис. 1); U_i – напряжения в узлах 1–9; B_i – проводимости СТК в узлах 1–8. В режиме передачи мощности $P = 1,02$ о.е. суммарный угол на передаче равен $231,69^\circ$. Доминирующие корни характеристического полинома в этом режиме:

$$\begin{aligned} &-4,4953 \pm j19,898; -3,3387; -3,0775 \pm j1,902; \\ &-3,0456 \pm j0,0469; -2,9805 \pm j0,1936; \\ &-1; -0,8397; -0,1198. \end{aligned}$$

Основная часть корней, определяющих колебательную устойчивость, имеет степень затухания $\alpha_0 = -3 \text{ с}^{-1}$, что означает затухание переходного процесса примерно за 1 секунду.

Реактивная мощность, потребляемая на холостом ходу, равна зарядной мощности линии (2600 МВар/участок); выберем ее за номинальную мощность СТК. В режиме передачи мощности выше натуральной выдаваемая СТК реактивная мощность не должна быть больше номинальной. Также в рабочих режимах должен соблюдаться запас по статической устойчивости не меньше 20 %. Во всех представленных опытах напряжения на промежуточных подстанциях приняты равными номинальному.

Таблица 1

Оптимальная настройка регуляторов на предельную передаваемую мощность $P = 1,02$ о.е.

Table 1

Optimal settings of control systems for power transmission limit $P = 1.02$ p.u.

Номер узла i	U_i , о.е.	B_i , о.е.	Настройки коэффициентов регулирования СТК $_i$ (K_{Ri}), генератора (K_G) и синхронного компрессора (K_{SC})			
			по каналу отклонения напряжения	по каналу производной напряжения	по каналу отклонения частоты	по каналу производной от частоты
1	1,001	-0,0194	$K_{G_0u} = -6,658$ $K_{R1_0u} = -99,766$	$K_{G_1u} = -9,281$ —	$K_{G_0\omega} = 0,019$ $K_{R1_0\omega} = 4,05$	$K_{G_1\omega} = -0,131$ $K_{R1_1\omega} = -1,379$
2	1	0,0236	$K_{R2_0u} = -99,701$	—	$K_{R2_0\omega} = 3,267$	$K_{R2_1\omega} = 1,816$
3	1,001	0,0223	$K_{R3_0u} = -99,811$	—	$K_{R3_0\omega} = 3,365$	$K_{R3_1\omega} = 1,883$
4	1	0,0012	$K_{R4_0u} = -72,344$	—	$K_{R4_0\omega} = 3,174$	$K_{R4_1\omega} = 0,999$
5	1,001	-0,0018	$K_{R5_0u} = -10,199$ $K_{SC_0u} = -5,314$	— $K_{SC_1u} = -0,1$	$K_{R5_0\omega} = 2,074$ $K_{SC_0\omega} = -0,019$	$K_{R5_1\omega} = 0,328$ $K_{SC_1\omega} = 1,408$
6	1,001	-0,0018	$K_{R6_0u} = -46,925$	—	$K_{R6_0\omega} = 2,212$	$K_{R6_1\omega} = -1,353$
7	1	-0,0258	$K_{R7_0u} = -84,797$	—	$K_{R7_0\omega} = 3,042$	$K_{R7_1\omega} = -1,246$
8	1	-0,032	$K_{R6_0u} = -46,034$	—	$K_{R6_0\omega} = 2,214$	$K_{R6_1\omega} = -1,643$
9	1	—	—	—	—	—

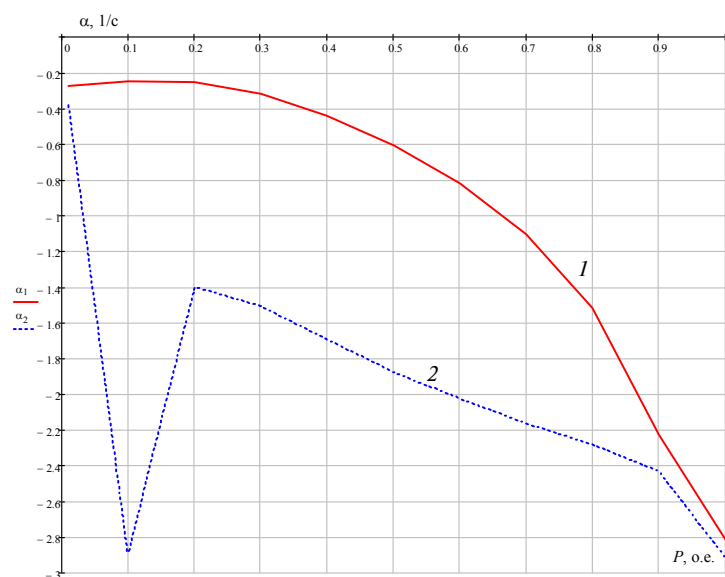

Рис. 3. Изменение степени затухания доминирующего корня при настройке на передачу по линии мощности $P = 1.02$ о.е. (α_1) и настройке на два режима 0,1 и 1,0 о.е. (α_2)

Fig. 3. Change in damping degree for dominant eigenvalue when tuning for power transmission of $P = 1.02$ p.u. (α_1) and for two operations of 0.1 and 1.0 p.u. (α_2)

Покажем, что данная настройка является унифицированной во всех режимах передачи мощности ниже максимальной. Изменение степени затухания доминирующего корня показано на рис. 3 (кривая 1).

Применение функции оптимизации `fmincon` в MATLAB предполагает задание ограничений

на величину искомых параметров. В частности, коэффициенты по отклонению напряжения СТК K_{R_0u} в предыдущих расчетах варьировались в диапазоне от -100 до -5 . Из табл. 1 видно, что на нескольких СТК величины этих коэффициентов приближаются к своим предельным значениям.



С учетом расширения диапазона изменения настроечных параметров проведем оптимизацию по двум режимам — малой нагрузки (0,1 о.е.) и натуральной мощности (1 о.е.). Результаты представлены на рис. 3 (кривая 2). Корни характеристического полинома для трех режимов электропередачи в зависимости от передаваемой мощности P следующие:

при $P = 0$ о.е.

$$\begin{aligned} & -4,2436 \pm j19,804; -4,0551; \\ & -2,9528 \pm j0,0672; -2,8616; -1; \\ & -0,84043; -0,6084; -0,381 \pm j2,8152; \end{aligned}$$

при $P = 0,1$ о.е.

$$\begin{aligned} & -4,2082 \pm j19,808; -3,4521; \\ & -2,9613 \pm j2,2418; -2,927 \pm j0,7448; \\ & -2,9044 \pm j1,6285; -2,8619; \\ & -1; -0,8405; -0,4932; \end{aligned}$$

при $P = 1,0$ о.е.

$$\begin{aligned} & -4,4663; -3,0185 \pm j20,798; \\ & -3,0131 \pm j1,4325; -2,9786 \pm j1,094; \\ & -2,8631; -1; -0,84063; -0,17988. \end{aligned}$$

Корни 1–3 на рис. 4 отвечают за колебательную устойчивость, корень 4 — за апериодическую. Как видно (см. рис. 3), устойчивость во всех режимах улучшилась, но при этом степень затухания в режиме холостого

хода все равно осталась низкой. Вместе с тем некоторое перераспределение управляющих воздействий между АРВ СГ/СК и систем регулирования СТК привело к тому, что все коэффициенты регулирования находятся в приемлемом диапазоне значений.

Повышение предела передаваемой мощности за счет увеличения числа и мощности синхронных компенсаторов

Увеличим количество синхронных компенсаторов до трех, установив их в точках 3, 5 и 7 (см. рис. 2). Проведем оптимизацию параметров регуляторов (общее их число в данном случае равно 40) и найдем предельный режим. Результаты представлены в табл. 2. Предел передаваемой мощности повысился до 1,08 о.е., т. е. прирост составил чуть более 5 %. На рис. 5 представлен переходный процесс при малом набросе мощности (0,005 о.е.), при котором устойчивость сохраняется.

В режиме передачи мощности $P = 1,08$ о.е. угол по электропередаче равен $\delta = 243,3^\circ$, а доминирующие корни характеристического полинома следующие:

$$\begin{aligned} & -3,8037 \pm j18,782; -3,3619; -3,015 \pm j0,4241; \\ & -2,9933 \pm j0,9625; -2,9919 \pm j0,7659; -2,8624; \\ & -1; -0,8432; -0,2299. \end{aligned}$$

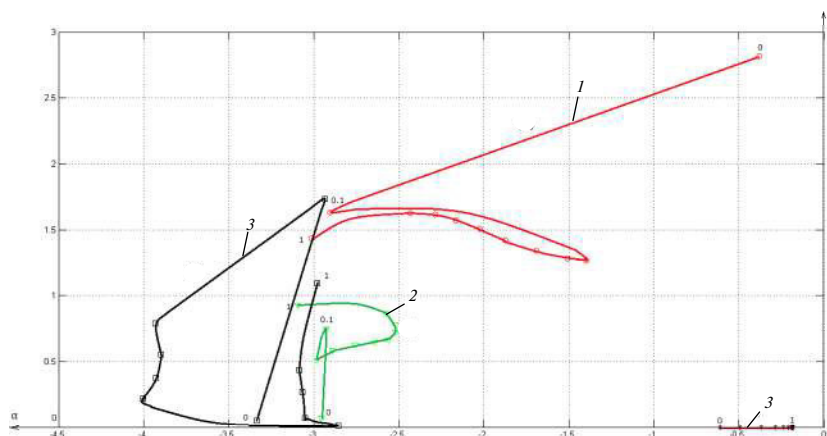


Рис. 4. Изменение доминирующих корней при настройке на два режима по передаваемой мощности

Fig. 4. Change of dominant eigenvalues when tuning for two operations

Таблица 2

Оптимальная настройка регуляторов на предельную передаваемую мощность $P = 1,08$ о.е.
с тремя синхронными компенсаторами

Table 2

Optimal settings of control systems to power transmission limit $P=1.08$ p.u. with three synchronous condensers

Номер узла i	U_i , о.е.	B_i , о.е.	Настройки регуляторов трех синхронных компенсаторов			
			по каналу отклонения напряжения	по каналу производной напряжения	по каналу отклонения частоты	по каналу производной от частоты
1	1,001	0	—	—	—	—
2	1,001	0,075	—	—	—	—
3	1,001	0,062	$K_{SC3_0u} = -6,439$	$K_{SC3_1u} = -8,727$	$K_{SC3_0\omega} = 1,695$	$K_{SC3_1\omega} = -1,661$
4	1,001	0,0488	—	—	—	—
5	1,001	0,0364	$K_{SC5_0u} = -14,556$	$K_{SC5_1u} = -0,636$	$K_{SC5_0\omega} = 4,709$	$K_{SC5_1\omega} = 1,545$
6	1,001	0,0247	—	—	—	—
7	1,001	0,0152	$K_{SC7_0u} = -6,877$	$K_{SC7_1u} = -4,125$	$K_{SC7_0\omega} = 4,167$	$K_{SC7_1\omega} = -0,418$
8	1	0	—	—	—	—
9	1,001	0	—	—	—	—

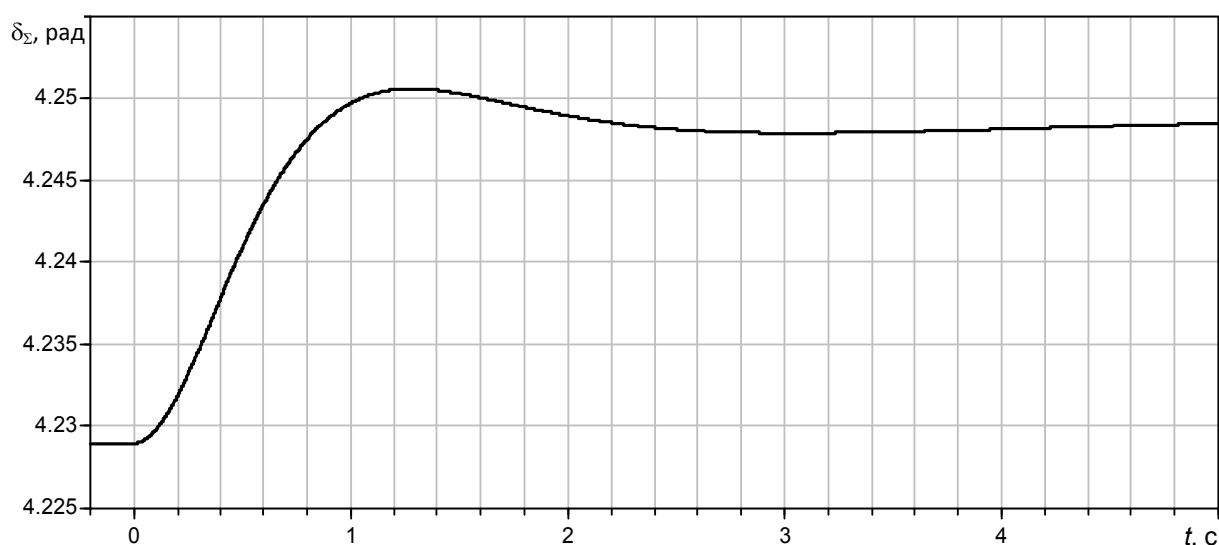


Рис. 5. Переходный процесс при набросе мощности 0,005 о.е. из режима передачи 1,08 о.е.

Fig. 5. Angle fluctuations under small disturbance (power step 0,005 p.u.) on maximum power transmission 1,08 p.u.

На рис. 5 представлен переходный процесс при малом набросе мощности (0,005 о.е.), при котором устойчивость сохраняется.

Полученные результаты показывают, что установка дополнительных синхронных компенсаторов в различных точках линии увеличивает, пусть и незначительно, предел пере-

даваемой мощности. Проанализируем изменение предела передаваемой мощности для всех трех рассмотренных случаев при увеличении установленной мощности СК вдвое.

Результаты представлены в табл. 3. Из нее видно, что предел по статической устойчивости с одним СК при увеличении его мощности



в два раза увеличивается до 1,06 о.е. В то время как установка двух СК исходной мощности в точках 4 и 7 дает увеличение лишь до 1,04 о.е., а установка трех СК — до 1,08 о.е. Увеличение мощности СК в два раза для случая установки трех СК позволяет добиться передаваемой мощности 1,21 о.е. Таким образом, при данной конфигурации схемы созданный запас по статической устойчивости позволяет работать в диапазоне режимов передачи от холостого хода до натуральной мощности.

Таблица 3

Предельная мощность линии при различных местах и мощностях установки СК

Table 3

Power transmission limits at various locations and capacities of SC installation

Узлы установки СК	Предельная передаваемая мощность P , о.е., при разных мощностях СК	
	$S_{СК} = 360$ МВА	$S_{СК} = 720$ МВА
5	1,02	1,06
4 и 7	1,04	1,11
3, 5 и 7	1,08	1,21

Влияние постоянных времени СТК на статическую устойчивость дальней электропередачи

Во всех предыдущих случаях оптимизация проводилась при неизменной постоянной времени СТК, равной 1 секунде. Рассмотрим теперь влияние этой постоянной времени на статическую устойчивость [11, 12]. Анализ будем проводить для случая линии, представленной на рис. 2, с тремя СК мощностью 360 МВА каждый и настроенной на передаваемую мощность 1,08 о.е. (см. табл. 3). Установим новую желаемую степень устойчивости α_0 , равную -4 с⁻¹. Границы изменения постоянной времени — от 0,3 до 3 с. Максимальный наброс мощности на турбину эквивалентного генератора, при котором система сохраняет устойчивость, равен 0,005 о.е.

Результаты оптимизации только постоянных времени СТК показывают, что в точках установки синхронных машин (генератора и компенсаторов) быстродействие статических устройств может быть сравнительно низким. На этих подстанциях СТК будут отвечать только за поддержание требуемых параметров установившихся режимов при медленном изменении передаваемой по линии мощности.

Оптимизация постоянных времени СТК позволила улучшить степень затухания доминирующих корней, однако увеличения предела передаваемой мощности достигнуть не удалось. Проведем совместную оптимизацию коэффициентов систем регулирования и постоянных времени СТК (48 параметров). Результаты представлены в табл. 4, зависимости реактивных мощностей трех СК от времени в переходных процессах — на рис. 6.

Таблица 4

Оптимальная настройка регуляторов на предельную передаваемую мощность $P = 1,1$ о.е. при различных постоянных времени СТК

Table 4

Optimal settings of control systems to power transmission limit $P = 1,1$ p.u. with different SVC time response

Номер узла i	U_i , о.е.	B_i , о.е.	Постоянные времени СТК $T_{окр i}$
1	1,001	0,0074	0,818
2	1,001	0,0918	0,499
3	1,001	0,0774	0,604
4	1,001	0,0637	0,357
5	1,001	0,0506	0,429
6	1,001	0,0382	0,303
7	1,001	0,0292	1,353
8	1	0,0107	0,523
9	1,001	—	—

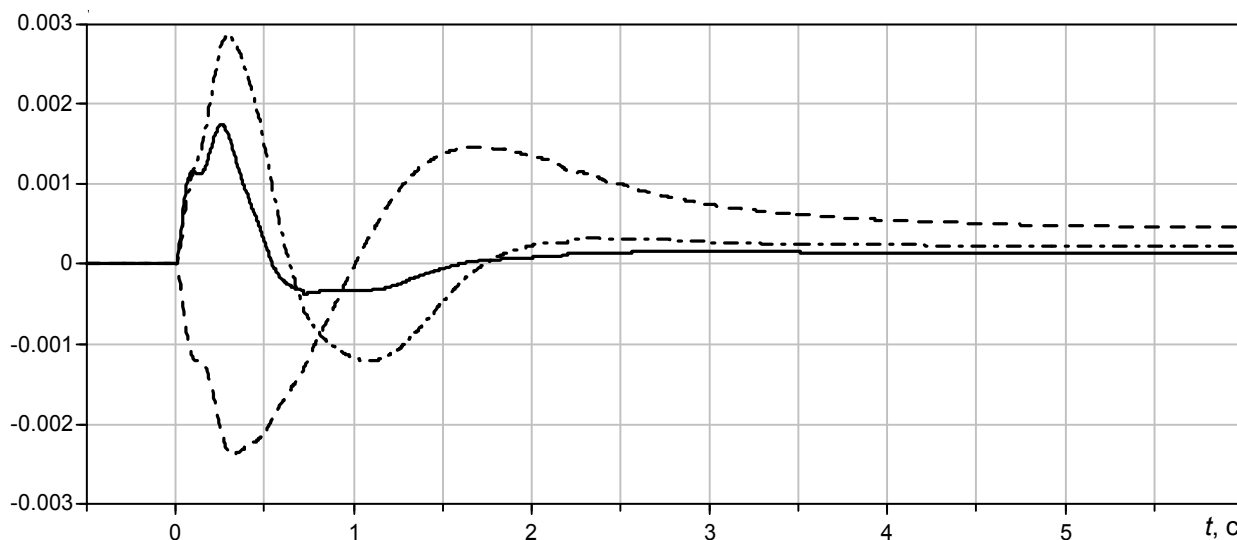


Рис. 6. Изменение реактивной мощности синхронных компенсаторов при малом возмущении на электропередаче (----- SC3; - . - . - SC5; ——— SC7)

Fig. 6. Fluctuations of synchronous condenser reactive power under small disturbance on power transmission (----- SC3; - . - . - SC5; ——— SC7)

Как видно из таблицы, передаваемая мощность увеличилась на 0.02 о.е., однако степень затухания доминирующих корней по сравнению с приведенными в табл. 3 значительно улучшилась. По данной настройке регуляторов угол передачи при $P = 1,1$ о.е. составляет $\delta = 245,9^\circ$, а доминирующие корни характеристического полинома следующие:

$$\begin{aligned} &-4,5361 \pm j20,731; -3,9746 \pm j20,584; \\ &-3,9675 \pm j2,5001; -3,9581 \pm j7,9451; \\ &-3,9157 \pm j2,1186; -3,9116; -3,8882 \pm j1,0876; \\ &-3,8311 \pm j0,5267; -3,769; -2,8975; -1; \\ &-0,8608; -0,3199 \end{aligned}$$

Также можно отметить, что значительно уменьшились по модулю коэффициенты регулирования по отклонению напряжения. На рис. 6 показаны реактивные мощности трех СК, которые не возвращаются в нулевое значение после возмущения. С этим связана необходимость дальнейшего совершенствования систем регулирования устройств компенсации.

Выводы по работе

Проведено исследование режимов и устойчивости дальней линии электропереда-

чи переменного тока максимальной длиной 4000 км с управляемой поперечной компенсацией.

Показано, что параллельная работа СТК/УШР и СК малой мощности в качестве компенсирующих устройств в одном из узлов позволяет реализовывать режимы передачи мощностей больше натуральной на 10–20 %.

С использованием метода сдвига собственных значений матрицы переменных состояния выполнена совместная координация настроек регуляторов УШР/СТК, АРВ СГ и СК.

Выявлено, что использование одинаковых коэффициентов систем регулирования на всех СТК ведет к значительному ухудшению статической устойчивости и является неэффективным.

Показано, что одновременная оптимизация коэффициентов систем управления и постоянных времени СТК позволяет увеличить предел передаваемой мощности до 1,1 о.е. и добиться улучшения уровня статической устойчивости. Увеличением мощности СК в узле в два раза достигнуто повышение предельной передаваемой мощности до 1,21 о.е.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кашин И.В., Смоловик С.В.** Устойчивость работы протяженных электропередач переменного тока с регулирующими устройствами поперечной компенсации // *Электричество*. 2001. № 2. С. 10–15.
2. **Рагозин А.А.** Условия статической устойчивости дальних линий электропередачи с управляемыми шунтирующими реакторами и их физическая интерпретация // *Электричество*. 1997. № 5. С. 11–14.
3. **Belyaev A.N., Izotova K.A., Kashin I.V.** Stability of ultra long distance AC power transmission lines with controlled shunt compensation devices // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Moscow and St. Petersburg, Russia, 2018. P. 572–576.
4. **Yan Xie and Baichao Chen.** Applied research on controllable shunt reactor in Ultra-High Voltage ac transmission system // 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems. Wuhan, 2008. P. 4258–4262.
5. **Александров Г.Н., Лунин В.П.** Управляемые реакторы. СПб: Северо-западный филиал АО «ГВЦ Энергетики», 2001. 158 с.
6. **Переслыцких О.О., Рыбаченко И.В., Беляев А.Н.** Повышение устойчивости сверхдальних линий электропередачи переменного тока с управляемой поперечной компенсацией // *Материалы IX международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи»*. Казань. 2018. С. 215–219.
7. **Eremia M.** Advanced Solutions in Power Systems, HVDC, FACTS and Artificial Intelligence // IEEE Press, Wiley, 2016. 1063 p.
8. **Рыжов Ю.П.** Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 488 с.
9. **Хазов М.А., Черняев П.В., Беляев А.Н.** Исследование режимов и устойчивости межсистемной связи на основе гибкой линии электропередачи переменного тока с управляемой продольной и поперечной компенсацией // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2017. Т. 23. № 4. С. 74–88. DOI: 10.18721/JEST.230407.
10. **Устинов С.М.** Метод численного поиска настроек регуляторов для обеспечения устойчивости больших энергообъединений // *Известия академии наук. Энергетика*, 2015, № 2. С. 49–56.
11. **Брянцев А.М., Долгополов А.Г., Евдокунин Г.А., Липатов Ю.А., Лурье А.И., Маклецова Е.Е.** Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы для сети 35–500 кВ // *Электротехника*. 2003. № 1. С. 5–15.
12. **Belyaev A.N., Smolovik S.V.** The Speed of Response of Controlled Shunt Reactors // *Power Technology and Engineering*. July 2014. Vol. 48. No 2. P. 153–156.
13. **Zeng P.P., Qin X., Zhang Y., Liang C.** A design methodology for installing reactive compensation equipment in ultra high voltage AC transmission system based on a modified particle swarm optimisation method // 2014 Power Systems Computation Conference. Wroclaw, 2014. P. 1–6.
14. **Zheng Bin, Ban Lian-Geng, Qin Xiao-Hui, Xiang Zu-Tao.** Study on system operation voltage characteristics of UHV transmission lines with series capacitors // 2010 International Conference on Power System Technology. Hangzhou, 2010. P. 1–7.
15. **Ma S., Yi J., Guo J., Zhang J., Ma S., Sun H.** Study for voltage regulation and reactive power compensation for UHV AC transmission with IEEE P1860 draft standard // 2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Shenzhen, 2014. P. 921–927.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПЕРЕСЛЫЦКИХ Олег Олегович — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: operesl@yandex.ru

БЕЛЯЕВ Андрей Николаевич — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: andrey.belyaev@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 15.10.2018

REFERENCES

- [1] **Kashin I.V., Smolovik S.V.** Ustoychivost raboty protyazhennykh elektroperedach peremennogo toka s reguliruyemyimi ustroystvami poperechnoy kompensatsii. *Elektrichestvo*. 2001. № 2. S. 10–15. (rus.)
- [2] **Ragozin A.A.** Usloviya staticheskoy ustoychivosti dálnikh liniy elektroperedachi s upravlyayemyimi shuntiruyushchimi reaktorami i ikh fizicheskaya interpretatsiya. *Elektrichestvo*. 1997. № 5. S. 11–14. (rus.)
- [3] **Belyaev A.N., Izotova K.A., Kashin I.V.** Stability of ultra long distance AC power transmission lines with controlled shunt compensation devices. *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. Moscow and St. Petersburg, Russia. 2018. P. 572–576.
- [4] **Yan Xie, Baichao Chen.** Applied research on controllable shunt reactor in Ultra-High Voltage ac transmission system. *2008 International Conference on Electrical Machines and Systems*. Wuhan, 2008. P. 4258–4262.
- [5] **Aleksandrov G.N., Lunin V.P.** Upravlyayemyye reaktory. SPb: Severo-zapadnyy filial AO «GVTs Energetiki», 2001. 158 s. (rus.)
- [6] **Pereslytskikh O.O., Rybachenko I.V., Belyaev A.N.** Povysheniye ustoychivosti sverkhdálnikh liniy elektroperedachi peremennogo toka s upravlyayemoy poperechnoy kompensatsiyey. *Materialy IX mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektroenergetika glazami molodezhi»*. Kazan, 2018. S. 215–219. (rus.)
- [7] **Eremia M.** Advanced Solutions in Power Systems, HVDC, FACTS and Artificial Intelligence, *IEEE Press*, Wiley, 2016. 1063 p.
- [8] **Ryzhov Yu.P.** Dálkiye elektroperedachi sverkhvysokogo napryazheniya. M.: Izdatelskiy dom MEI, 2007. 488 s. (rus.)
- [9] **Khazov M.A., Chernyayev P.V., Belyaev A.N.** Issledovaniye rezhimov i ustoychivosti mezh sistemnoy svyazi na osnove gibkoy linii elektroperedachi peremennogo toka s upravlyayemoy prodolnoy i poperechnoy kompensatsiyey. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki*. 2017. T. 23. № 4. S. 74–88. DOI: 10.18721/JEST.230407. (rus.)
- [10] **Ustinov S.M.** Metod chislennogo poiska nastroyek regulyatorov dlya obespecheniya ustoychivosti bolshikh energoobyedineniy. *Izvestiya akademii nauk. Energetika*, 2015, № 2. S. 49–56. (rus.)
- [11] **Bryantsev A.M., Dolgoplov A.G., Yevdokimin G.A., Lipatov Yu.A., Lurye A.I., Makletsova Ye.Ye.** Upravlyayemyye podmagnichivaniyem shuntiruyushchiye reaktory dlya seti 35–500 kV. *Elektrotehnika*. 2003. № 1. S. 5–15. (rus.)
- [12] **Belyaev A.N., Smolovik S.V.** The Speed of Response of Controlled Shunt Reactors. *Power Technology and Engineering*. July 2014. Vol. 48, No 2. P. 153–156.
- [13] **Zeng P.P., Qin X., Zhang Y., Liang C.** A design methodology for installing reactive compensation equipment in ultra high voltage AC transmission system based on a modified particle swarm optimisation method. *2014 Power Systems Computation Conference*. Wroclaw, 2014. P. 1–6.
- [14] **Zheng Bin, Ban Lian-Geng, Qin Xiao-Hui, Xiang Zu-Tao.** Study on system operation voltage characteristics of UHV transmission lines with series capacitors. *2010 International Conference on Power System Technology*. Hangzhou, 2010. P. 1–7.
- [15] **Ma S., Yi J., Guo J., Zhang J., Ma S., Sun H.** Study for voltage regulation and reactive power compensation for UHV AC transmission with IEEE P1860 draft standard. *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. Shenzhen, 2014. P. 921–927.

THE AUTHORS

PERESLYTSKIKH Oleg O. — Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: operesl@yandex.ru

BELYAEV Andrei N. — Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: andrey.belyaev@gmail.com

Received: 15.10.2018



DOI: 10.18721/JEST.25107
УДК 621.311.1

К.А. Хомяков, Д.А. Устинов

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

О НЕОБХОДИМОСТИ КОРРЕКТИРОВКИ МЕТОДА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА

Расчет электрических нагрузок — первостепенная задача при проектировании любой системы электроснабжения, а достоверность получаемых значений нагрузок прямым образом влияет на технико-экономические показатели всего предприятия. В статье рассматриваются этапы развития методов и подходов по определению расчетных значений электрических нагрузок — от опытного представления 20-х годов XX века до современных методов. Подробно рассматривается утвержденный метод расчета нагрузок и проводится его проверка путем сравнения достоверности справочных данных и фактических значений коэффициента использования, полученных в результате экспериментальных исследований на объекте горно-обогатительного производства. Показано, что проводимые мероприятия по повышению энергетической эффективности предприятия приводят к необходимости корректировки коэффициентов, используемых в существующем методе расчета электрических нагрузок.

Ключевые слова: расчет электрических нагрузок, коэффициент использования, коэффициент расчетной нагрузки, мероприятия по энергосбережению, корреляционная связь.

Ссылка при цитировании:

К.А. Хомяков, Д.А. Устинов. О необходимости корректировки метода расчета электрических нагрузок для предприятий минерально-сырьевого комплекса // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 71–78. DOI: 10.18721/JEST.25107.

K.A. Khomiakov, D.A. Ustinov

Saint-Petersburg mining university, St. Petersburg, Russia

ADJUSTING THE METHOD FOR CALCULATION OF ELECTRICAL LOADS FOR ENTERPRISES OF MINERAL RESOURCES INDUSTRY

Calculation of electrical loads is the primary task in design of each power supply system, and the reliability of the values obtained from such calculations directly affects the technical and economic indicators of the entire enterprise. This article discusses all stages of development of methods and approaches for determining the calculated values of electrical loads from experimental representation in the 1920s to modern methods. The approved method for calculation of loads is considered in detail and tested for reliability of the reference data and the actual values of the utilization coefficient obtained as a result of the studies carried out for the object of mining and processing production. We have confirmed the influence of the measures to improve energy efficiency and, as a consequence, the need to adjust the existing method for calculation of electrical loads.

Keywords: calculation of electrical loads, utilization factor, calculated load factor, energy saving measures, correlation.

Citation:

K.A. Khomiakov, D.A. Ustinov, Adjusting the method for calculation of electrical loads for enterprises of mineral resources industry, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 71–78, DOI: 10.18721/JEST.25107.

Введение

Высокие темпы, с которыми развивается энергетика, требуют повышения эффективности капиталовложений и материальных затрат. Сегодня порядка двух третей от потребляемой электроэнергии приходится на промышленные предприятия. Поэтому еще на этапе проектирования необходимо применять меры по повышению их технико-экономических показателей. Одна из первоочередных задач при проектировании промышленных предприятий — определение электрических нагрузок; достоверность получаемых при таких расчетах значений напрямую влияет на технико-экономические показатели всего предприятия. Расчетные электрические нагрузки используются при выборе элементов системы электроснабжения. Занижение или завышение расчетных значений приводит к большим потерям и увеличению капитальных затрат [2, 3]. Достоверность же значений зависит от методов, применяемых для расчета электрических нагрузок. Цель данной статьи — корректировка и повышение точности метода определения расчетных нагрузок.

Методы расчета электрических нагрузок

Методы расчета значимо изменялись: от опытных измерений 20-х годов XX века до современных методов, использующих математический аппарат теории вероятностей и случайных процессов.

Исследования в области электрических нагрузок начались с 30-х годов прошлого столетия. Но недостаточность теоретических и экспериментальных данных не позволяли с приемлемой достоверностью использовать их результаты.

Вторым периодом в развитии теории электрических нагрузок по праву считаются 50-е годы XX века. Была создана информационная база за счет проведения на промышленных предприятиях большого количества экспериментальных исследований и разработаны методы математической статистики, позволившие создать математические модели, опираясь на теорию случайных величин. Как результат в 1968 году вышли «Указания по определению

электрических нагрузок промышленных установок», в основу которых лег метод упорядоченных диаграмм (МУД) [1]. В соответствии с МУД расчетное значение коэффициента использования определяется выражением

$$k_{и\ p} = \bar{k}_{и\ cр} \left(1 + \frac{\sqrt{3}\sigma_{k_{и}}}{\sqrt{n_3}} \right) = \bar{k}_{и\ cр} \left(1 + \frac{\sqrt{3}\sqrt{f_{к\ и}^2 - 1}}{\sqrt{n_3}} \right), \quad (1)$$

где $\bar{k}_{и\ cр}$ — математическое ожидание коэффициента использования характерной категории электроприемников; $\sigma_{k_{и}}$ — среднеквадратическое отклонение коэффициента использования $k_{и}$, приведенное к одному электроприемнику; $f_{к\ и}$ — коэффициент формы упорядоченной диаграммы коэффициентов использования; n_3 — эффективное число электроприемников. Однако отсутствие информационно-справочных данных по $\bar{k}_{и\ cр}$ и $f_{к\ и}$ для характерных категорий электроприемников не позволяет считать результаты, получаемые данным методом, полностью достоверными: показатели электропотребления по результатам обследования действующих предприятий свидетельствует о завышении полученной таким методом расчетной максимальной нагрузки цехов над фактическим значением в 1,5–2,5 раза.

На смену указанию 1968 года пришли обновленные указания по расчету электрических нагрузок РТМ 36.18.32.4-92, действующие с 01.01.1993 года по сегодняшний день. Новые указания были разработаны ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект», огромный вклад в эту работу внесли такие ученые, как Б.Д. Жохов, Л.Б. Годгельф. За основу в них принят модифицированный статистический метод (МСМ). В соответствии с МСМ расчетное значение коэффициента спроса определяется выражением

$$k_c = k_{и\ p} + \frac{0,5 - 0,4k_{и}}{\sqrt{n_3 T / T_0}} = \bar{k}_{и\ cр} + \frac{k_{и} - \bar{k}_{и\ cр}}{\sqrt{n_3}} + \frac{0,5 - 0,4k_{и}}{\sqrt{n_3 T / T_0}}, \quad (2)$$

где $T_0 = 10$ мин — постоянная времени нагрева проводников малого и среднего сечений; T —



фактическая постоянная времени нагрева элементов системы электроснабжения; $k_{и}$ – средневзвешенное справочное значение коэффициентов использования для характерных категорий электроприемников; $\bar{k}_{и\text{ ср}}$ – математическое ожидание коэффициента использования группы электроприемников. МСМ основан на использовании уравнения регрессии, которое характеризует корреляционную связь между величинами $\bar{k}_{и\text{ ср}}$ и $k_{и}$; эти зависимости показаны на рис. 1 [1].

Корреляционный анализ совокупности парных значений $k_{и}$ и $\bar{k}_{и\text{ ср}}$ позволил установить, что наиболее тесная связь между этими параметрами имеет место при разбиении совокупности на два диапазона ($k_{и} < 0,5$ и $k_{и} \geq 0,5$) при числе точек в каждом диапазоне $N_T > 50$, что свидетельствует о достаточной значимости исследуемой зависимости [11, 12]. С использованием метода наименьших квадратов получены уравнения линий регрессии для первого и второго диапазонов $k_{и}$:

$$\bar{k}_{и\text{ ср}} = 0,58k_{и} - 0,05 \text{ при } k_{и} < 0,5; \quad (4)$$

$$\bar{k}_{и\text{ ср}} = 0,7k_{и} - 0,12 \text{ при } k_{и} \geq 0,5. \quad (5)$$

Значения $\bar{k}_{и\text{ ср}}$, полученные по уравнениям (4) и (5), являются усредненными частными (выборочными) значениями коэффициентов использования групп электроприемников, характеризующими математическое ожидание при известном средневзвешенном справочном значении $k_{и}$ [4, 9].

Согласно МСМ при определении максимальной по допустимому нагреву нагрузки для одной трансформаторной подстанции (ТП) средняя ее компонента должна вычисляться не по математическому ожиданию, а по верхней границе доверительных интервалов $k_{и\text{ ср}(г)}$ нормального закона распределения частных значений $\bar{k}_{и\text{ ср}}$ для первого и второго диапазонов, которые могут быть превышены с вероятностью не более 0,05:

$$k_{и\text{ ср}(г)} = 0,6k_{и} \text{ при } k_{и} < 0,5; \quad (6)$$

$$k_{и\text{ ср}(г)} = 0,8k_{и} \text{ при } k_{и} \geq 0,5. \quad (7)$$

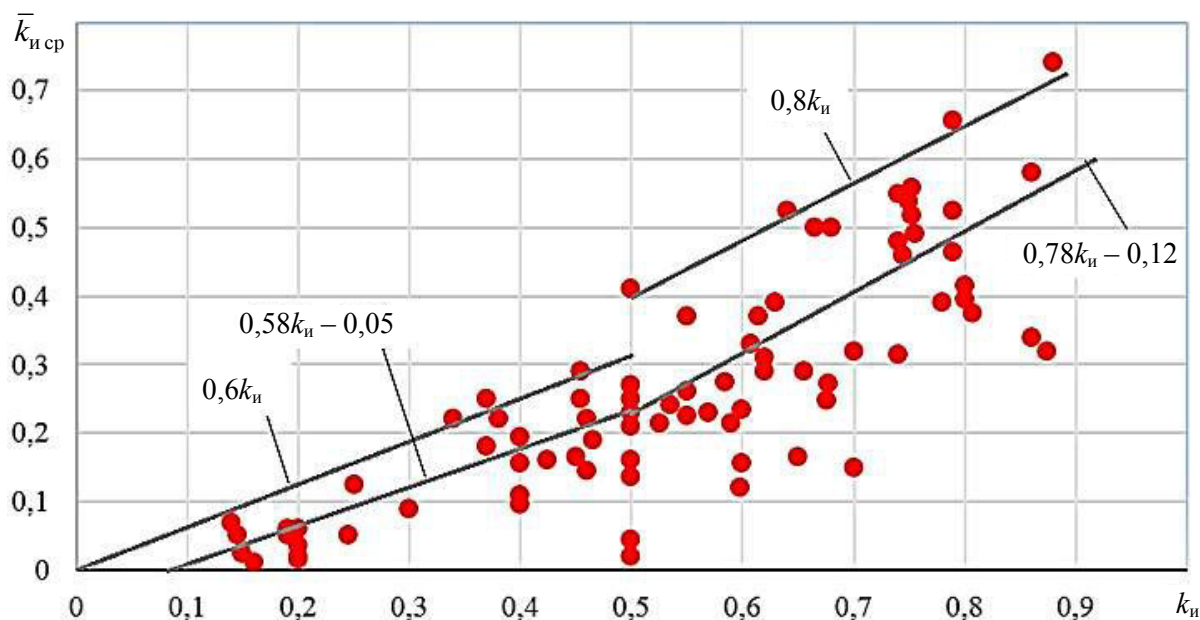


Рис. 1. Корреляционный анализ совокупности парных значений $k_{и}$ и $\bar{k}_{и\text{ ср}}$

Fig. 1. Correlation analysis of the set of paired values of k_u and $\bar{k}_{и\text{ ср}}$ (av)

Формула для расчета активной мощности:

$$P_p = k_p k_{и} P_{ном}, \quad (8)$$

где k_p — коэффициент расчетной активной нагрузки, равный отношению коэффициента спроса группы электроприемников к средневзвешенному справочному значению $k_{и}$, определенному как детерминированная величина, характеризующая верхнюю границу возможных значений коэффициентов использования электроприемников:

$$k_p = k_c / k_{и}. \quad (9)$$

Таким образом, МСМ позволил снизить погрешность определения электрических нагрузок, сохранив при этом возможность использования существующей справочно-информационной базы значений $k_{и}$ [10].

Обоснование корректировки утвержденного метода

После вступления в силу федерального закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...» возникла необходимость проведения технического перевооружения всех промышленных объектов, в том числе предприятий минерально-сырьевого комплекса, как одних из самых энергоемких объектов [5, 7]. Основная цель проведения мероприятий по энергосбережению — снизить потребление электроэнергии. Частным случаем таких мероприятий является применение на технологических установках регулируемых электроприводов, имеющих в своем составе преобразователи частоты (ПЧ), а также другого энергоэффективного электрооборудования [6]. Между тем существующие методы определения расчетных нагрузок и информационные базы не учитывают изменения, произошедшие в энергосистемах за последние годы. Поэтому необходимо проведение исследований по выявлению зависимости потребления мощности от применения современного оборудования и проводимых меро-

приятий по энергосбережению. И в методах расчета нагрузок необходимо учитывать индивидуальные особенности современных технологических процессов, при необходимости осуществляя корректировки коэффициентов, используемых в расчетах [8, 13, 16]. В частности с этой целью на объекте горно-обогатительного производства были проведены исследования зависимости потребления мощности электроприводом конвейера 2Л-120 от скорости конвейерной ленты и характера загрузки конвейера рудной массой.

Экспериментальные исследования

Привод конвейера включает следующие компоненты: приводные трехфазные асинхронные электродвигатели 660 В, 250 кВт (2 шт.); трехфазные преобразователи частоты 660 В, 250 кВт (2 шт.); вентиляторы принудительного охлаждения приводных электродвигателей 660 В (2 шт.); установка водяного охлаждения преобразователей частоты (1 шт.).

На рис. 2 представлены зависимости изменения активной и реактивной мощностей, потребляемых приводом конвейера, от скорости конвейерной ленты как без регулирования, так и с автоматическим регулированием этой скорости.

Были получены также графики изменения во времени активной мощности конвейерной установки с нерегулируемым (рис. 3) и регулируемым электроприводом (рис. 4). По результатам исследования было выявлено несоответствие полученных и справочных значений $k_{и}$ индивидуальных потребителей как при регулируемой скорости конвейерной ленты, так и без регулирования.

Данные, полученные в результате проведения испытаний конвейера, сведены в табл. 1. Испытания проводились в двух режимах: с постоянной скоростью 3,15 м/с и в режиме автоматического регулирования скорости конвейерной ленты

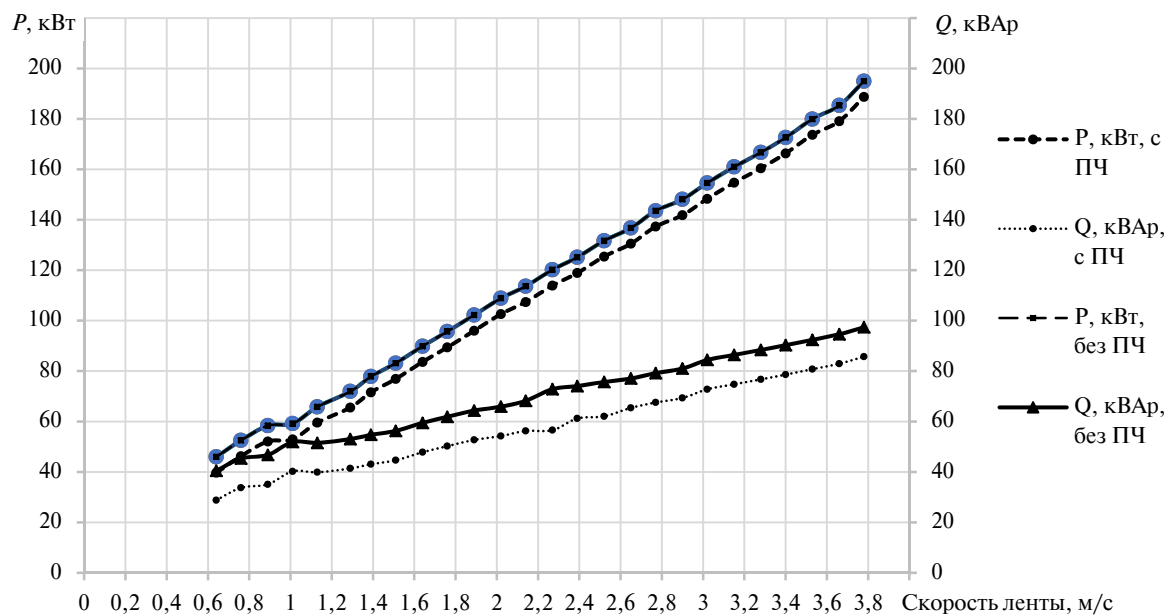


Рис. 2. Зависимость изменения активной и реактивной мощности, потребляемой приводом конвейера, от скорости конвейерной ленты без регулирования скорости и с автоматическим регулированием

Fig. 2. The dependence of the change in true and reactive power consumed by the conveyor drive on the speed of the conveyor belt without speed control and with automatic control

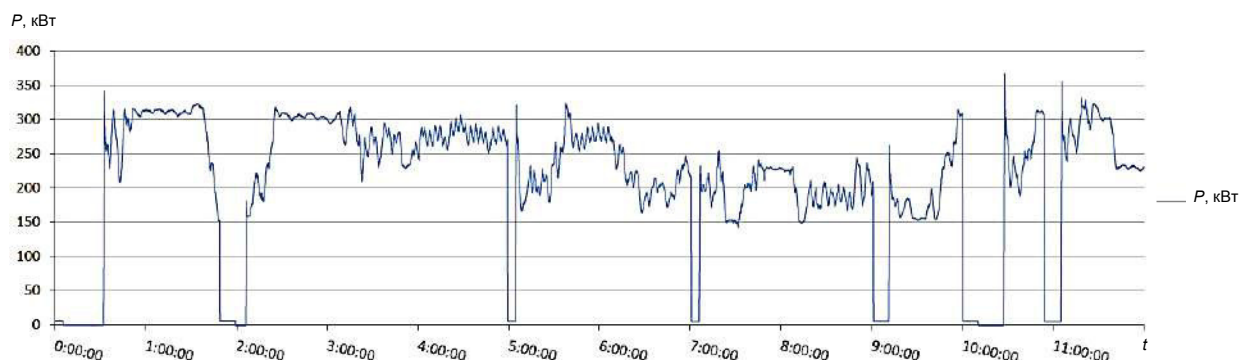


Рис. 3. Потребление активной мощности без регулирования скорости конвейерной ленты

Fig. 3. Active power consumption without speed control of the conveyor belt

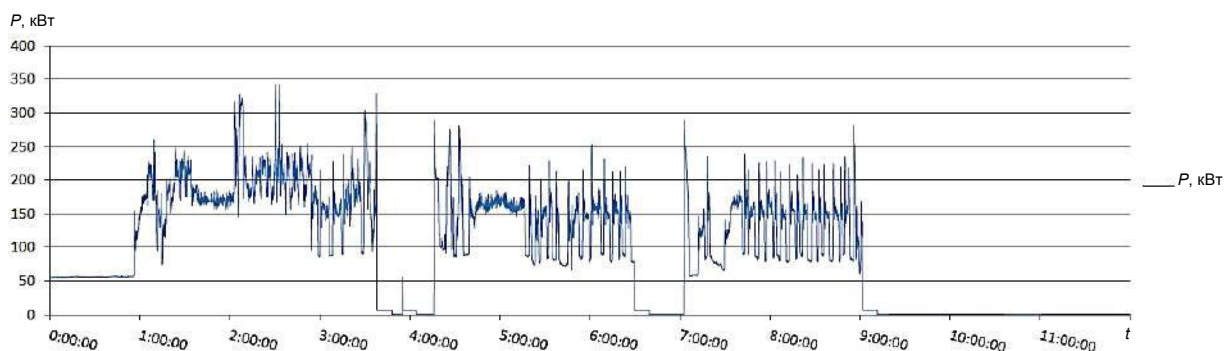


Рис. 4. Потребление активной мощности с регулируемой скоростью конвейерной ленты

Fig. 4. True power consumption with speed control of the conveyor belt

Таблица 1

Параметры работы конвейера

Table 1

Pipeline operation parameters

Параметры, характеризующие работу конвейера за период испытаний	Значение параметров	
	без ПЧ	с ПЧ
Среднее значение потребляемой активной мощности $P_{\text{ср}}$, кВт	174,85	138,99
Среднее значение потребляемой реактивной мощности $Q_{\text{ср}}$, кВАр	88,01	73,48
Удельное значение потребляемой активной энергии на тонну руды, кВт·час/т	0,441	0,206
Удельное значение потребляемой реактивной энергии на тонну руды, кВАр·час/т	0,222	0,109

Сопоставление фактических и расчетных значений $k_{\text{и}}$ электроприемника выявило несоответствие справочных данных, приведенных в М788-1069/ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект», фактическим значениям, полученным при проведении исследований:

средняя величина — $k_{\text{и}} = 0,75$;

фактическая величина без ПЧ — $k_{\text{и}} = 0,7$;

фактическая величина с ПЧ — $k_{\text{и}} = 0,5$.

Анализируя эти значения, можно сделать вывод, что фактическая величина коэффициента использования ниже справочной на 5 %, а при использовании ПЧ — ниже на 25 %. Полученные данные доказывают необходимость корректировки утвержденного метода расчета нагрузок.

Исследования, проведенные на других технологических объектах, в частности на насосах, вентиляторах, кранах, и др., также показали большой энергетический эффект от использования преобразователей частоты; в процентном соотношении он может достигать

порядка 70 % в сравнении с режимом работы без регулирования скорости вращения технологического агрегата [14, 15].

Выводы

В статье приведено обоснование необходимости корректировки утвержденного метода по расчету электрических нагрузок с целью повышения точности, ибо эти значения оказывают влияние на технико-экономические показатели всего предприятия. Для снижения погрешности определения электрических нагрузок до приемлемых в инженерных расчетах значений необходимо учитывать влияние на каждый электроприемник в отдельности проводимых мероприятий по энергосбережению, в частности установки преобразователей частоты. Проведенные исследования подтверждали необходимость при проведении расчетов по существующему методу корректировать используемые коэффициенты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жохов Б.Д. Анализ причин завышения расчетных нагрузок и возможной их коррекции // Промышленная энергетика. 1989. № 7. С. 7–9.
2. Степанов В.П., Лобанова О.В. Прямой метод оценки числовых характеристик графиков электрической нагрузки // Изв. вузов. Электромеханика. 1996. № 3, 4. С. 101.
3. Кротков Е.А., Степанов В.П. Оценка погрешностей расчетных потерь электроэнергии в промышленных электрических сетях // Энергосбережение. 2000. № 3. С. 47–79.
4. Синчук О.Н., Гузов Э.С., Пархоменко Р.А. Совершенствование методов расчета электрических нагрузок при проектировании модернизации систем электроснабжения железорудных предприятий // Вестник КрНУ имени Михаила Остроградского. 2013. Вып. 1 (78). С. 28–32.



5. Шумилова Г.П., Готман Н.Э., Старцева Т.Б. Прогнозирование электрических нагрузок при оперативном управлении электроэнергетическими системами на основе нейросетевых структур. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2008.
6. Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Веприков А.А., Хомяков К.А. Повышение эффективности электротехнических преобразовательных комплексов для питания электролизеров алюминия // Цветные металлы. 2016. № 10. С. 29–32.
7. Хомяков К.А., Беляков С.А. Применение энергосберегающих электродвигателей производства РИВС на объектах горно-обогатительного производства // Горный журнал. 2016. № 11. С. 107–108.
8. Волошко А.В., Лутчин Т.Н. Кластерный и вейвлет-анализ параметров энергопотребления // Вестник КДУ. 2010. № 1. С. 99–103.
9. Волошко А.В., Лутчин Т.Н. Разработка метода кластеризации вейвлет-преобразовательных графиков электрических нагрузок // Вестник НТУУ «КПИ». Серия «Гирництво». 2010. Вып. 19. С. 72–82.
10. Тавлинцев А.С., Суворов А.А., Стаймова Е.Д. Поиск однотипных графиков нагрузки энергообъекта // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2018. Т. 18. № 2. С. 20–27.
11. Devine M., Baring-Gould E.I. The Alaska village electric load calculator // NREL/TP-500-36824. October 2004.
12. Ilir Keka, Betim Cico, Neki Frasheri. Effect of parallelism in calculating the execution time during forecasting electrical load // JNTS. 2017. № 44. P. 169–180.
13. Bennett C., Stewart R.A., Lu J. Autoregressive with exogenous variables and neural network short-term load forecast models for residential low voltage distribution networks // Energies. 2014. No 7. P. 2938–2960.
14. Alasali F., Haben S., Becerra V., Holderbaum W. Optimal energy management and MPC strategies for electrified RTG cranes with energy storage systems // Energies. 2017. No 10. P. 1598–1616.
15. Ping-Huan Kuo, Chiou-Jye Huang. A high precision artificial neural networks model for short-term energy load forecasting // Energies. 2018. No 11. P. 213–226.
16. Khuntia S.R., Rueda J.L., Mart A.M.M., van der Meijden. Long-term electricity load forecasting considering volatility using multiplicative error model // Energies. 2018. No 11. P. 3308–3327.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ХОМЯКОВ Константин Алексеевич — аспирант Санкт-Петербургского горного университета

E-mail: kostyhom@gmail.com

УСТИНОВ Денис Анатольевич — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского горного университета

E-mail: bescheiden@rambler.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 28.01.2019

REFERENCES

- [1] Zhokhov B.D. Analiz prichin zavy'sheniya raschetny'kh nagruzok i vozmozhnoj ikh korrekczii. *Promy'shlennaya e'nergetika*. 1989. № 7. S. 7–9. (rus.)
- [2] Stepanov V.P., Lobanova O.V. Pryamoj metod ocenki chislov'y'kh kharakteristik grafikov e'lektricheskoy nagruzki. *Izv. vuzov. E'lektromekhanika*. 1996. № 3, 4. S. 101. (rus.)
- [3] Krotkov E.A., Stepanov V.P. Ocenka pogreshnostej raschetny'kh poter' e'lektroe'nergii v promy'shlenny'kh e'lektricheskikh setyakh. *Energoberezhenie*. 2000. № 3. S. 47–79. (rus.)
- [4] Sinchuk O.N., Guзов E.S., Parkhomenko R.A. Sovershenstvovaniye metodov rascheta elektricheskikh nagruzok pri proyektirovanii modernizatsii sistem elektros-nabzheniya zhelezorudnykh predpriyatij. *Vestnik KrNU imeni Mikhaila Ostrogradskogo*. 2013. Vyp. 1 (78). S. 28–32. (rus.)
- [5] Shumilova G.P., Gotman N.E., Startseva T.B. Prognozirovaniye elektricheskikh nagruzok pri operativnom upravlenii elektroenergeticheskimi sistemami na osnove neyrosetevykh struktur. Yekaterinburg: Izd-vo UrO RAN, 2008. (rus.)
- [6] Abramovich B.N., Sychev Yu.A., Veprikov A.A., Khomyakov K.A. Povysheniye effektivnosti e'lektrotekhnicheskikh preobrazovatelnykh kompleksov dlya pitaniya elektrolizerov alyuminiya. *Tsvetnyye metally*. 2016. № 10. S. 29–32. (rus.)

- [7] **Khomyakov K.A., Belyakov S.A.** Primeneniye energosberegayushchikh elektrodvigateley proizvodstva RIVS na ob'yektakh gorno-obogatitel'nogo proizvodstva. *Gornyy zhurnal*. 2016, №11, S. 107–108. (rus.)
- [8] **Voloshko A.V., Lutchin T.N.** Klasternyy i veyvlet-analiz parametrov energopotrebleniya. *Vestnik KDU*. 2010. № 1. S. 99–103. (rus.)
- [9] **Voloshko A.V., Lutchin T.N.** Razrabotka metoda klasterizatsii veyvlet-preobrazovatel'nykh grafikov elektricheskikh nagruzok. *Vestnik NTUU «KPI». Seriya «Girnitstvo»*. 2010. Vyp. 19. S. 72–82. (rus.)
- [10] **Tavlintsev A.S., Suvorov A.A., Staymova Ye.D.** Poisk odnotipnykh grafikov nagruzki energoobyekta, *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»*. 2018. T. 18. № 2. S. 20–27. (rus.)
- [11] **Devine M., Baring-Gould E.I.** The Alaska village electric load calculator. *NREL/TP-500-36824*. October 2004.
- [12] **Ilir Keka, Betim Cico, Neki Frasheri.** Effect of parallelism in calculating the execution time during forecasting electrical load. *JNTS*. 2017. № 44. P. 169–180.
- [13] **Bennett C., Stewart R.A., Lu J.** Autoregressive with exogenous variables and neural network short-term load forecast models for residential low voltage distribution networks. *Energies*. 2014. No 7. P. 2938–2960.
- [14] **Alasali F., Haben S., Becerra V., Holderbaum W.** Optimal energy management and MPC strategies for electrified RTG cranes with energy storage systems. *Energies*. 2017. No 10. P. 1598–1616.
- [15] **Ping-Huan Kuo, Chiou-Jye Huang.** A high precision artificial neural networks model for short-term energy load forecasting. *Energies*. 2018. No 11. P. 213–226.
- [16] **Khuntia S.R., Rueda J.L., Mart A.M.M., van der Meijden.** Long-term electricity load forecasting considering volatility using multiplicative error model. *Energies*. 2018. No 11. P. 3308–3327.

THE AUTHORS

KHOMIAKOV Konstantin A. — Saint-Petersburg mining university

E-mail: kostyhom@gmail.com

USTINOV Denis A. — Saint-Petersburg mining university

E-mail: bescheiden@rambler.ru

Received: 28.01.2019



DOI: 10.18721/JEST.25108
УДК 621.515

А.А. Дроздов, А.Ф. Рекстин

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

АНАЛИЗ ДИАГРАММ СКОРОСТЕЙ РАБОЧИХ КОЛЕС ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРНЫХ СТУПЕНЕЙ ПОСЛЕ ПЕРВИЧНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Разработка центробежных компрессоров состоит из нескольких этапов, важным из которых является первичное проектирование. Для решения этой задачи применяются различные методики. Одна из таких методик была разработана Ю.Б. Галеркиным и А.Ф. Рекстиным. Она оставила открытыми несколько вопросов и не была проверена практикой применения. В дополнение к этой методике авторы статьи предложили способ корректировки относительной высоты лопаток рабочего колеса с учетом чисел Маха и показателя изоэнтропы. Был предложен подход к определению эмпирического коэффициента для расчета напорной характеристики рабочего колеса при решении прямой задачи — расчета характеристик ступени с размерами, определенными первичным проектированием. Представленные изменения были реализованы в программе первичного проектирования центробежных компрессорных ступеней. Проверка эффективности первичного проектирования была произведена при помощи программы невязкого квазитрехмерного расчета путем верификации формы лопаточных аппаратов рабочих колес; спроектированы три ступени на различные параметры проектирования — коэффициенты напора и расхода. Анализ диаграмм скоростей при обтекании лопаток рабочих колес показал соответствие формы лопаток заданным параметрам проектирования.

Ключевые слова: центробежная компрессорная ступень, проточная часть, первичное проектирование, осерадиальное рабочее колесо, радиальное рабочее колесо.

Ссылка при цитировании:

А.А. Дроздов, А.Ф. Рекстин. Анализ диаграмм скоростей рабочих колес центробежных компрессорных ступеней после первичного проектирования // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 79–91. DOI: 10.18721/JEST.25108.

A.A. Drozdov, A.F. Rekstin

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

VELOCITY DIAGRAMS OF IMPELLERS OF CENTRIFUGAL COMPRESSOR STAGES: ANALYSIS AFTER PRELIMINARY DESIGN

Development of centrifugal compressors consists of several steps, the most important of them being preliminary design. A variety of methods are applied for solving this problem. One of these methods was developed by Galerkin and Rekstin. However, this method did not fully resolve all issues and was not tested by practice. In addition to this method, we have proposed a technique for adjusting the relative height of impeller blades, taking into account Mach numbers and the isentropic coefficient. We have formulated an approach to determining the empirical coefficient for calculating the pressure characteristics of the impeller when solving for the direct problem that is calculating the characteristics of the stage with the

dimensions determined by preliminary design. The presented changes were implemented in the program for preliminary design of centrifugal compressor stages. The effectiveness of primary design was tested with a program for inviscid quasi-three-dimensional calculation by verifying the shape of impeller blades. Three stages have been designed with different values of design parameters (loading factor and flow rate). Analysis of the velocity diagrams on impellers blades showed that they were designed according to the specified design parameters.

Keywords: centrifugal compressor stage, flow part, preliminary design, 3D-impeller, 2D-impeller.

Citation:

A.A. Drozdov, A.F. Rekstin, Velocity diagrams of impellers of centrifugal compressor stages: analysis after preliminary design, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 79–91, DOI: 10.18721/JEST.25108.

Введение

Центробежные компрессоры применяются в различных отраслях промышленности, таких, как черная и цветная металлургия, нефтехимическое производство, производство пластмасс и т. д. В России наиболее широко центробежные компрессоры применяются при добыче и транспортировке природного газа. Основную долю в компрессорном парке газовой промышленности составляют центробежные компрессоры, применяемые для транспортировки газа по трубопроводам и закачки его в подземные хранилища. Активная разработка новых газовых месторождений, развитие газотранспортной системы страны порождают постоянный спрос на центробежные компрессоры. Многие используемые в настоящее время компрессоры морально и физически устарели. Это приводит к необходимости замены газоперекачивающих агрегатов целиком или, что более эффективно, замене проточной части в существующем корпусе.

На привод компрессоров затрачивается большое количество энергии, поэтому необходимо создавать проточные части с максимальной энергетической эффективностью (наивысшим КПД), при этом обеспечивая сокращение сроков проектирования центробежных компрессоров, а также уменьшая стоимость проектирования. Поэтому газодинамическое проектирование центробежных компрессоров [1–8, 23–26] по-прежнему является важной и актуальной задачей.

Проектирование новых компрессоров основывается на применении отработанных и испытанных ранее модельных ступеней, а также на использовании специализированных инженерных методик. Разработкой математических моделей, лежащих в основе этих методик, занимаются специалисты университетов и профильных предприятий [9–22].

В СПбПУ на протяжении десятилетий проводились исследования компрессоров динамического действия. Полученные результаты позволили создать метод газодинамического расчета центробежных компрессоров и соответствующую математическую модель, а на этой основе — пакет программ, получивший название Метод универсального моделирования.

В первых версиях Метода универсального моделирования [27–39] первичное проектирование основано на рекомендациях качественного характера из классических отечественных монографий и на результатах собственных исследований [34–38].

Автоматическим перебором основных размеров программа «Оптимальное проектирование центробежной компрессорной ступени» Метода универсального моделирования определяет их сочетание, при котором достигается безударное обтекание при заданном для ступени коэффициенте расхода $\Phi_{\text{расч}}$, обеспечивается заданный коэффициент напора $\psi_{\text{т расч}}$ при максимально возможном КПД. Следующая программа Метода универсального моделирования —



«Расчет семейства характеристик центробежной компрессорной ступени» — делает это для оптимизированного варианта проточной части. Но, поскольку основанные на эмпирических коэффициентах математические модели не могут гарантировать абсолютной достоверности рассчитанных характеристик, пользователю программы следует проанализировать корректность оптимизированных размеров исходя из опыта проектирования и результатов испытания ступеней и компрессоров. Изложенный подход требует от пользователя большого личного опыта проектной и исследовательской работы и накладывает ограничения на эффективность применения инженерного метода проектирования компрессоров.

Следующий этап развития Метода универсального моделирования и лежащей в его основе математической модели — корректировка порядка проектирования, чтобы надежное обеспечение заданного расхода и напора компрессора давало бы проект, не нуждающийся в последующей экспертной корректировке и анализе. Выбранный сотрудниками НИЛ «Газовая динамика турбомашин» под руководством Ю.Б. Галеркина путь решения вопроса — это переход от первичного проектирования на основании качественных рекомендаций к проектированию на базе специально проведенных исследований и аппроксимирующих уравнений, дающих конкретные значения каждого из размеров проточной части. В работе [39] такие уравнения предложены по результатам проектирования двух серий модельных ступеней в диапазоне коэффициентов расхода $\Phi_{\text{расч}} = 0,015\text{--}0,15$. Пробная эксплуатация разработанной программы проектирования показала рациональность подхода, но в отношении выбора размеров, обеспечивающих требуемые значения $\Phi_{\text{расч}}$ и $\psi_{\text{т расч}}$, проблема не была решена. В работе [40] вопрос исследован применительно к малорасходным ступеням. В монографиях [34, 35] показано, что расчет диаграмм по программе ЗДМ.023, использующей

сочетание метода квазиортогоналей и интегральных уравнений, дает надежные результаты для нахождения коэффициента напора реального рабочего колеса и режима безударного обтекания, т. е. для определения расчетного режима рабочего колеса.

С использованием анализа диаграмм скоростей А. Рекстин и Ю. Галеркин спроектировали 124 рабочих колеса в диапазоне газодинамических параметров $\Phi_{\text{расч}} = 0,015\text{--}0,15$, $\psi_{\text{т расч}} = 0,40\text{--}0,70$ с втулочными отношениями в диапазоне $\bar{D}_{\text{вт}} = 0,25\text{--}0,40$.

На рис. 1 показаны схемы проточной части осерадиального и радиального рабочих колес и обозначены размеры проточных частей.

Размеры лопаточной решетки определяются количеством лопаток, их относительной толщиной, углами входа и выхода. Форма лопаток определяется зависимостью угла лопаток (на средней поверхности) от координаты в меридиональной плоскости: $\beta_{\text{л}} = f(\bar{l}_m)$. В программе ЗДМ.023 функция $\beta_{\text{л}} = f(\bar{l}_m)$ задается квадратичными алгебраическими уравнениями. Вид этой функции определяет выбор двух коэффициентов — «А» и «В». У РРК поверхность лопаток непрямая, цилиндрическая. Форму лопаток РРК определяет одно уравнение: $\beta_{\text{л}} = f(\bar{r})$. Для ОРК средняя линия задается двумя уравнениями $\beta_{\text{л}} = f(\bar{l}_m)$ — на периферийной и втулочной поверхностях лопатки.

Для расчета размеров проточной части предложены формулы, аппроксимирующие геометрические размеры упомянутых выше 124 рабочих колес.

Цель представляемой работы — реализовать предложенный А.Ф. Рекстиным и Ю.Б. Галеркиным алгоритм в виде компьютерной программы первичного проектирования и верифицировать программу в пределах изученных параметров проектирования: $\Phi_{\text{расч}} = 0,015\text{--}0,15$; $\psi_{\text{т расч}} = 0,40\text{--}0,70$; $\bar{D}_{\text{вт}} = 0,25\text{--}0,40$.

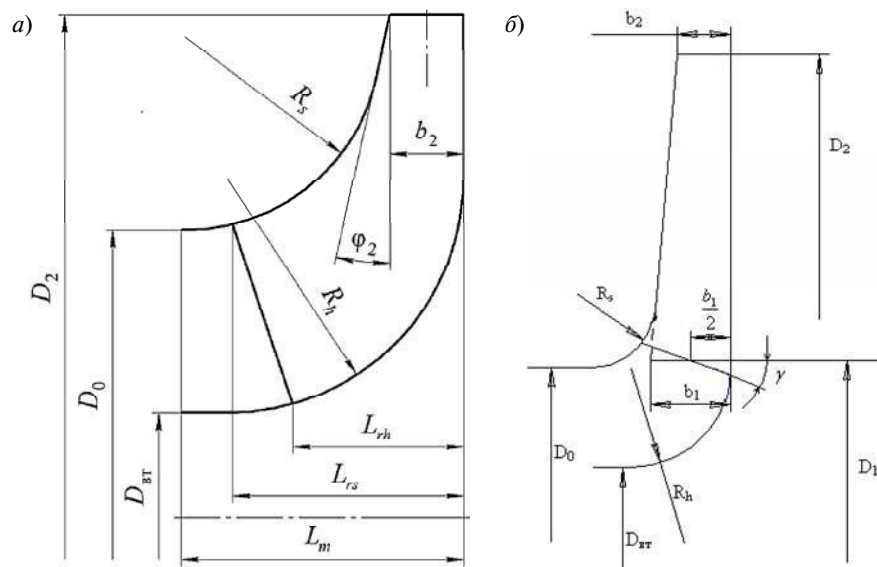


Рис. 1. Схемы и размеры рабочих колес в меридиональной плоскости:
 а – осерadiальное рабочее колесо (ОРК); б – радиальное рабочее колесо (РРК)

Fig. 1. Scheme and dimensions of the impeller in the meridional plane: а – 3D impeller; б – 2D impeller

Предложенный алгоритм следует дополнить выбором относительной высоты лопаток. Рекомендованные А. Рекстиным и Ю. Галеркиным формулы дают значения относительной высоты лопаток $\bar{b}_2 = f(\Phi_{\text{расч}})$, которые обеспечивают заданный коэффициент напора при критериях подобия $M_u = 0,70$, $k = 1,4$. При большем увеличении плотности на выходе из РК относительную высоту лопаток надо уменьшить, и наоборот:

$$\psi_T = 1 - \varphi_2 \operatorname{ctg} \beta_2; \quad (1)$$

$$\varphi_2 = \frac{\Phi}{4\bar{b}_2} \frac{\rho_0^*}{\rho_2}. \quad (2)$$

Частная цель работы – создание методики расчета относительной высоты лопаток, которая обеспечивает заданный коэффициент теоретического напора $\psi_{T \text{ расч}}$ при $M_u \neq 0,70$, $k \neq 1,4$.

Разработка методики расчета относительной высоты лопаток на выходе при произвольных значениях критериев сжимаемости

Для расчета высоты лопаток $\bar{b}_2$ на выходе из рабочего колеса, обеспечивающих необходимое значение $\psi_{T \text{ расч}}$ при $M_u \neq 0,7$ и $k \neq 1,4$,

применяются математические модели Метода универсального моделирования.

На первом этапе первичного проектирования по формулам А.Ф. Рекстина и Ю.Б. Галеркина рассчитывается значение $\bar{b}_2$, которое обеспечивает получение заданного $\psi_{T \text{ расч}}$ при числе Маха $M_u = 0,7$ и показателе изоэнтропы $k = 1,4$.

А.Ф. Рекстин и Ю.Б. Галеркин для расчета $\psi_{T \text{ расч}}$ использовали коэффициент напора при невязком обтекании с поправочным эмпирическим коэффициентом. Программа первичного проектирования включает модель напора, основанную на предложенной Ю.Б. Галеркиным формуле [35] с эмпирическим коэффициентом K_μ , учитывающим влияние вязкости [34]:

$$\psi_{T \text{ расч}} = \frac{1 - \varphi'_2 \operatorname{ctg} \beta_{\text{л}2}}{1 + \frac{K_\mu \sin \beta_{\text{л}2}}{z_{\text{РК}} K_{\text{цд}} (1 - \bar{D}_1)}}. \quad (3)$$

Для ступени, разрабатываемой по формулам первичного проектирования, необходимо произвести поиск значения K_μ , обеспечивающего заданное $\psi_{T \text{ расч}}$. Для этого ведется по-



иск искомого значения K_u методом дробных шагов в большую или меньшую сторону от текущего. В конце статьи приведены примеры первичного проектирования ступеней при $M_u \neq 0,70$, $k \neq 1,4$. Заданные значения $\psi_{т\text{ расч}}$ обеспечены за счет подбирающего выбора относительной высоты лопаток.

Программа первичного проектирования

По разработанному методу сделана программа первичного проектирования «Первичное проектирование и расчет семейства характеристик центробежных компрессорных ступеней» на базе 6-й версии программы «Расчет семейства характеристик центробежных компрессорных ступеней» (7-я версия Метода универсального моделирования ориентирована на проектирование транс- и сверхзвуковых компрессоров [41–43]). Программа первичного проектирования сохрани-

ла функции предшественницы и имеет три режима работы:

расчет характеристик ступени с размерами, введенными пользователем;

расчет характеристик ступени с размерами, полученными в программе оптимального проектирования на базе математических моделей. Размеры и параметры оптимального варианта автоматически передаются в программу расчета семейства характеристик;

производимый расчет размеров и формы проточной части по указанию пользователя выполняется по разработанному методу первичного проектирования, обобщающему результаты изучения параметров 124 оптимизированных рабочих колес. Неподвижные элементы рассчитываются по методике из работы [39].

На рис. 2 слева показано меню ввода параметров для расчета газодинамических характеристик.

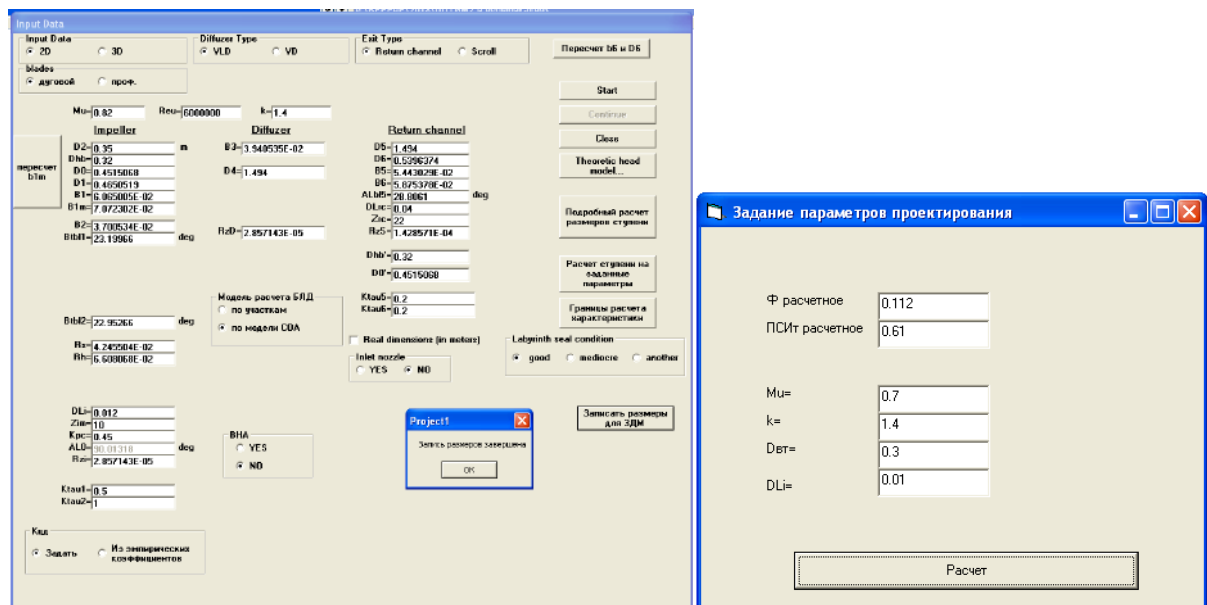


Рис. 2. Программа «Первичное проектирование и расчет семейства характеристик центробежных компрессорных ступеней»: меню ввода параметров ступени для расчета газодинамических характеристик (слева) и ввода параметров ступени для первичного проектирования (справа)

Fig. 2. Program «Primary design and calculation of the centrifugal compressor stage characteristics»: Input menu of stage parameters for gas-dynamic characteristics calculation (left) and menu of stage parameters for primary design (right)

Верхняя линейка окон позволяет выбрать типы рабочего колеса, диффузора, выходного устройства. Помимо ввода критериев подобия и размеров, есть ряд кнопок для запуска опций, облегчающих расчет и позволяющих выбрать варианты математических моделей КПД и напора в зависимости от особенностей решаемой задачи. На рис. 2, справа показано окно ввода параметров для первичного проектирования.

Рассчитанные размеры первичного проектирования ступени отражаются в окне (рис. 2, слева). При нажатии кнопки «Запись размеров для 3ДМ» формируются tpr-файлы, по которым программа 3ДМ.023 рассчитывает диаграммы скоростей рабочих колес.

Верификация метода первичного проектирования РК

Выбор размеров при первичном проектировании основан на обобщении параметров 124 рабочих колес, рассмотренных ранее. Эти колеса имеют дискретные значения параметров проектирования:

$\Phi_{\text{расч}} = 0,015; 0,028; 0,0346; 0,0526; 0,080; 0,0936; 0,1095; 0,128; 0,15;$

$\psi_{\text{т расч}} = 0,40; 0,482; 0,581; 0,70;$

$\bar{D}_{\text{вт}} = 0,25; 0,30; 0,35; 0,40$ (РПК); $0,25; 0,30; 0,35$ (ОРК).

Расчеты этих РК выполнялись при критериях подобия $M_u = 0,70$, $k = 1,4$ и толщине лопаток $\bar{\delta}_l = 0,12$. Если при промежуточных значениях $\Phi_{\text{расч}}$, $\psi_{\text{т расч}}$, $\bar{D}_{\text{вт}}$ и отличных от приведенных выше значениях M_u , k и $\bar{\delta}_l$ первичный проект удовлетворяет требованиям, верификация метода успешна.

Пример первичного проектирования малорасходного РПК

Параметры малорасходного РПК 0,022-0,52-029 очевидны из его названия. Проект выполнен при $M_u = 0,56$, $k = 1,32$ и толщине лопаток $\bar{\delta}_l = 0,012$. Все параметры проектирования отличны от линейки параметров 124 рассмотренных колес.

Начальные параметры и размеры РПК 0,022-0,52-029 передаются в программу расчета диаграмм скоростей невязкого квазитрехмерного потока — 3ДМ.023; производится расчет. Рис. 3 демонстрирует результат расчетов в программе 3ДМ.023.

Диаграммы скоростей демонстрируют качество первичного проектирования:

средняя нагрузка лопаток — в пределах рекомендаций;

вдоль задней поверхности скорость практически постоянна, что обещает отсутствие отрыва потока;

вход на периферии, на средней поверхности и у втулки практически безударный.

При проектировании 124 упомянутых выше РК обеспечение заданного значения $\psi_{\text{т расч}}$ проверялось по величине коэффициента напора при невязком течении $\psi_{\text{т ид}}$. Его обозначение на рис. 3 — «PSTid». По результатам анализа характеристик модельных ступеней семейства 20CE [44] было принято эмпирическое соотношение $\psi_{\text{т расч}} / \psi_{\text{т ид}} = 0,93$. Для РПК 0,022-0,52-029 значение $\psi_{\text{т ид}}$ должно быть равно 0,559. Оно получилось равным 0,55. То есть по первичному проекту недобор коэффициента теоретического напора составляет небольшую величину — 1,6 %. Это может быть компенсировано при окончательной оптимизации проточной части.

Пример первичного проектирования среднерасходного РПК

Параметры среднерасходного РПК 0,077-0,63-038 очевидны из его названия. Проект выполнен при $M_u = 0,83$, $k = 1,55$ и толщине лопаток $\bar{\delta}_l = 0,010$. Все параметры проектирования отличны от линейки параметров 124 рассмотренных ранее колес.

На рис. 4 представлены начальные параметры, размеры РПК 0,077-0,63-038, схема проточной части, вид лопаточной решетки и диаграммы скоростей на трех поверхностях тока — данные из программы 3ДМ.023.

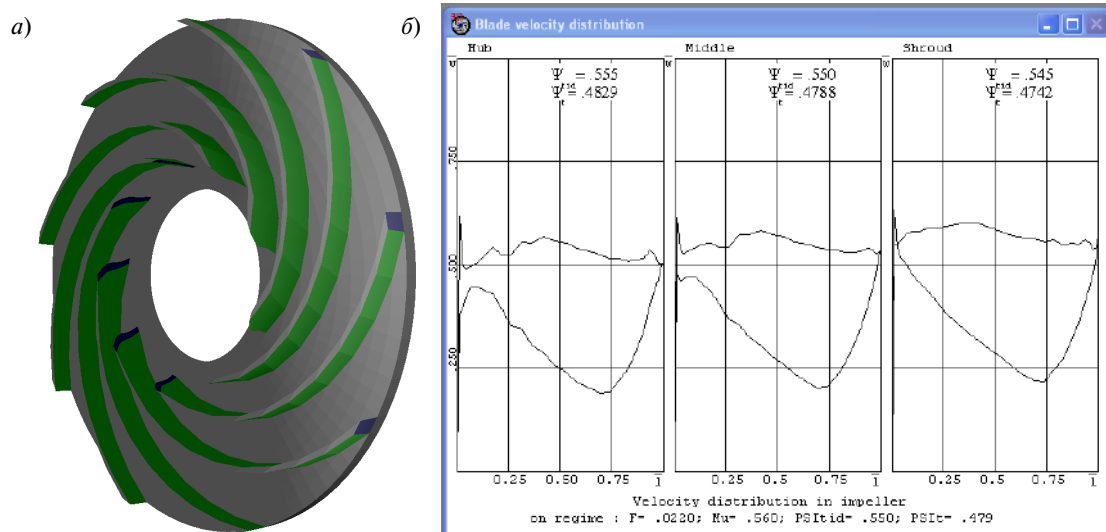


Рис. 3. Программа 3ДМ.023. Начальные параметры, размеры РПК 0,022-0,52-029, схема проточной части, вид лопаточной решетки (а) и диаграммы скоростей на трех поверхностях тока (б)

Fig. 3. 3DM.023 program. The initial parameters and size of the 2D impeller 0,022-0,52-029, flow path scheme (a), a blade row and velocity diagram on three stream line surfaces (b)

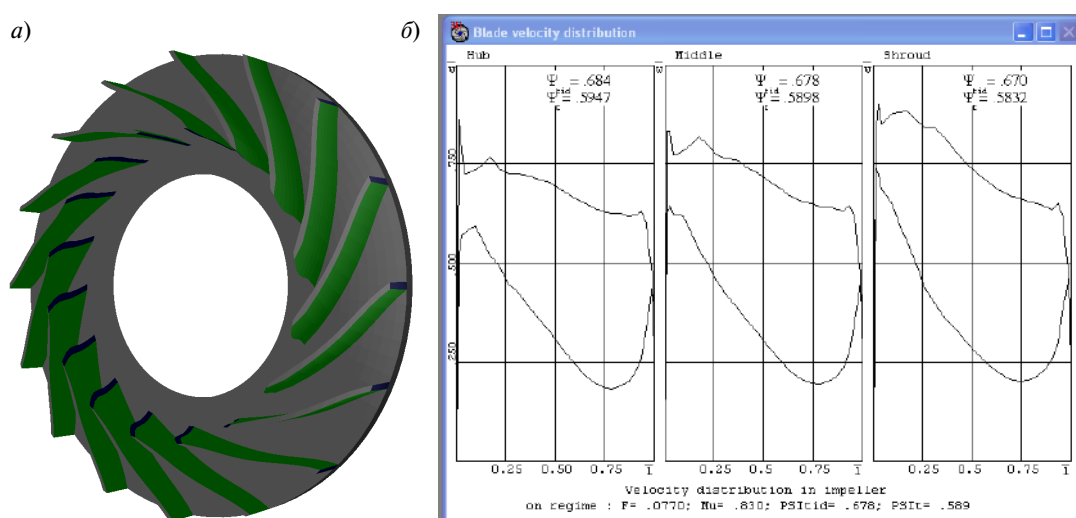


Рис. 4. Программа 3ДМ.023. Начальные параметры, размеры РПК 0,077-0,63-038, схема проточной части (а), вид лопаточной решетки и диаграммы скоростей на трех поверхностях тока (б)

Fig. 4. 3DM.023 program. The initial parameters and size of the 2D impeller 0,077-0,63-038, flow path scheme (a), a blade row and velocity diagram on three stream line surfaces (b)

У рабочего колеса с достаточно большим коэффициентом напора замедление потока на задней поверхности неизбежно. Но в целом диаграммы скоростей благоприятные. Небольшой положительный угол ата-

ки на всех трех осесимметричных поверхностях приемлем. Отношение $\Psi_{трасс}/\Psi_{ид} = 0,63/0,678 = 0,929$ практически равно значению 0,93, принятому для первичного проектирования.

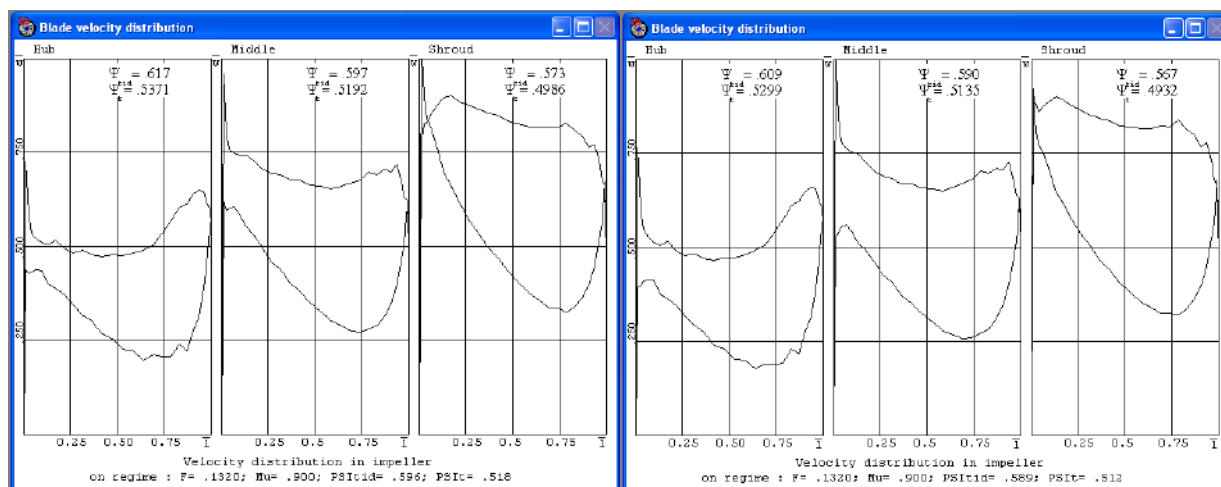


Рис. 5. Программа 3ДМ.023. Диаграммы скоростей ОРК 0132-0,545-0265: слева — по результатам первичного проектирования, справа — после незначительной корректировки

Fig. 5. 3DM.023 program. 3D impeller 0132-0,545-0265 velocity diagram: by results of primary design — on the left, after minor adjustment — on the right

Пример первичного проектирования высокорасходного ОРК

Рабочее колесо ОРК 0132-0,545-0265 спроектировано при $M_u = 0,90$, $k = 1,60$.

На рис. 5 слева показаны диаграммы скоростей ОРК 0132-0,545-0265 по результатам первичного проектирования. Справа — диаграммы скоростей после незначительной корректировки.

Вид диаграмм скоростей соответствует принципам проектирования, но отношение $\psi_{T \text{ расч}} / \psi_{T \text{ ид}} = 0,545 / 0,596 = 0,914$ указывает на небольшое превышение коэффициента теоретического напора. Небольшой отрицательный угол атаки на периферии можно уменьшить. Для корректировки оказалось достаточным уменьшить на 1 шт. число лопаток и увеличить на один градус входной угол лопаток. Отношение $\psi_{T \text{ расч}} / \psi_{T \text{ ид}} = 0,545 / 0,589 = 0,925$ незначительно отличается от значения 0,93, принятого при оптимальном проектировании.

Обсуждение результатов

Предложенная методика первичного проектирования центробежных компрессорных сту-

пеней была апробирована: результаты проектирования сравнивались с расчетами по программе невязкого квазитрехмерного расчета. Анализ диаграмм распределения скоростей по поверхностям лопаток показал, что размеры и форма проточной части рабочего колеса, получаемая в результате проектирования, обеспечивает его эффективную работу. Рассчитывались ступени как радиальных, так и осерадиальных рабочих колес с различными расчетными коэффициентами расхода и напора. Это обеспечило эффективную проверку реализованных изменений в математической модели.

Внесенные изменения в инженерной программе проектирования центробежных компрессоров Метода универсального моделирования оказались эффективными и могут найти практическое применение при реализации новых проектов центробежных компрессоров.

Заключение

Предложенный А. Рекстиным и Ю. Галеркиным метод первичного проектирования дополнен методом расчета относительной высоты лопаток на выходе из рабочих колес, обес-



печивающим заданный коэффициент теоретического напора в широком диапазоне критериев сжимаемости. Созданная на основе этих методик и Метода универсального моделирования программа «Первичное проектирование и расчет семейства характеристик центробежных компрессорных ступеней» показала себя надежным и удобным инструментом газодинамического проектирования.

Приложение

Условные обозначения:

$\bar{b}_1$ — высота лопаток на входе; $\bar{b}_2$ — высота лопаток на выходе; D_2 — наружный диаметр рабочего колеса; $\bar{D}$ — относительный диаметр; $\bar{D}_{вт}$ — втулочное отношение; k — показатель изоэнтропы; $K_{цд}$ — коэффициент положения центра давления диаграммы скоростей; $\bar{L}_{рс}$ — положение входной кромки осерадиального рабочего колеса на периферии; $\bar{L}_{rh}$ — положение входной кромки осерадиального рабочего колеса на втулке; $\bar{L}_m$ — осевая длина; M_u — условное число Маха; $\bar{R}_s$ — относительный радиус закругления покрывающего диска; $\bar{R}_h$ — относительный радиус закругления основного диска; $z_{рк}$ — число лопаток рабочего колеса; $\Phi_{расч}$ — расчетный условный

коэффициент расхода; $\psi_{трасч}$ — расчетный коэффициент теоретического напора; $\psi_{тид}$ — коэффициента теоретического напора при невязком течении; γ — угол наклона входной кромки лопатки; φ_2 — угол наклона покрывающего диска; β — угол между относительной скоростью и обратным окружным направлением; β_l — угол лопатки; $\bar{\delta}_l$ — относительная толщина лопатки; ρ — плотность газа.

Подстрочные индексы:

0, 1, 2 — индексы контрольных сечений; расч — относящийся к расчетному режиму (по расходу).

Надстрочные индексы:

* — относится к полным параметрам (параметры торможения).

Благодарность

Работа выполнена в лаборатории «Газовая динамика турбомашин» ОНТИ СПбПУ Петра Великого, которую возглавляет профессор доктор технических наук Ю.Б. Галёркин. Авторы выражают ему признательность за постановку задачи исследования и консультации при выполнении работы.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евдокимов В.Е. Банк экспериментальных данных по модельным ступеням и их элементам для проектирования ЦКМ // Турбины и компрессоры. 1997. № 3. С. 4.
2. Любимов А.Н., Евдокимов В.Е. О расчете газодинамических характеристик ступени центробежного компрессора // Компрессорная техника и пневматика. 2012. № 7. С. 28–33.
3. Семаков А.В., Евдокимов В.Е., Репринцев А.И., Любимов А.Н. Модернизация центробежных компрессоров на азотных производствах // Компрессорная техника и пневматика. 2013. № 3. С. 20–22.
4. Любимов А.Н., Евдокимов В.Е., Семаков А.В., Репринцев А.И. Об использовании экспериментального и расчетных методов при проектировании проточных частей центробежных компрессоров // Компрессорная техника и пневматика. 2014. № 6. С. 12–20.
5. Лунев А.Т. Структура метода проектирования и испытания проточной части нагнетателей для перекачивания природного газа // Компрессорная техника и пневматика. 2001. № 10. С. 4–7.
6. Лунев А.Т. Разработка высокоэффективных сменных проточных частей центробежных компрессоров газоперекачивающих агрегатов: Дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2005. 123 с.
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. 2016. Vol. 131. P. 41–53.
8. Kryłłowicz W., Świder P., Kozanecki Z., Kabalyk K., Kozanecki Jr Z. Technical and Aerodynamical Aspects of a High Pressure Synthesis Gas Turbocompressor Modernization // 12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics. April 3–7, 2017, Stockholm, Sweden.
9. Syka T., Luňáček O. Numerical simulation of radial compressor stage // EPJ Web of Conferences. 45, 01088 (2013). DOI: 10.1051/epjconf/20134501088

10. **Pei-Yuan Li, Chu-Wei Gu, Yin Song.** A New Optimization Method for Centrifugal Compressors Based on 1D Calculations and Analyses // *Energies*. 2015. Vol. 8. P. 4317-4334. DOI:10.3390/en8054317
11. **Schiff J.** A preliminary design tool for radial compressors: Thesis for the Degree of Master of Science / LTH Lund University. 2013. 171 p.
12. **Aungier R.H.** Centrifugal Compressors: A Strategy for Aerodynamic Design and Analysis. ASME Press. 2000. ISBN 0-7918-0093-8, New York, USA.
13. **Casey M.A., Robinson C.** Method to Estimate the Performance Map of a Centrifugal Compressor Stage // *Journal of Turbomachinery*. 2013. Vol. 135 / 021034
14. **Aungier R.H.** Mean Streamline Aerodynamic Performance Analysis of Centrifugal Compressors // *Transactions of the ASME*. 1995. Vol. 117.
15. **Kangsoo Im.** Development of a design method for centrifugal compressors. [text]: Ph. D. thesis / Michigan State University. 2012. 160 p.
16. **Hazby H. Casey M., Robinson C., Spataro R.** The design of a family of process compressor stages // *Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics ETC12*. April 3–7, 2017. Stockholm, Sweden. Paper ID: ETC2017-134
17. **Japikse D., Krivitzky E.M.** Radial stages with non-uniform pressures at diffuser inlet // *Proceedings of the ASME Turbo Expo*. Volume 2D-2016, Seoul; South Korea; 13 June 2016 – 17 June 2016; DOI: 10.1115/GT2016-57956
18. **Japikse D.** Turbomachinery design with an agile engineering system // *JSME fluid engineering conference*. Osaka. September 19–20. 2003.
19. **Stuart C., Spence S., Kim S.I., Filsinger D., Starke A.** A 1-D Vaneless Diffuser Model Accounting for the Effects of Spanwise Flow Stratification // *Proceedings of The International Gas Turbine Congress*. Tokyo. 2015. Gas Turbine Society of Japan. P. 485–494.
20. **Gong X., Chen R.** Total pressure loss mechanism of centrifugal compressors // *Journal of Mechanical Engineering Research*. 2014. Vol. 4 (2). P. 45–59.
21. **Harley P., Spence S., Filsinger D., Dietrich M., Early J.** An evaluation of 1D design methods for the off-design performance prediction of automotive turbo-charger compressors // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2012*. GT2012. June 11–15, 2012, Copenhagen, Denmark GT2012-69743.
22. **Schneider M., Bühler J., Hanna M., Schiffer H.-P., Leichtfuß S.** Analytical loss prediction for turbocharger compressors // *Proceedings of 11th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics/ ETC11*. March 23–27, 2015, Madrid, Spain.
23. **Felipe C., Favaretto F., Anderson M.R., Li S., Hu L.** Development of a meanline model for preliminary design of recirculating casing treatment in turbo-charger compressors // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. GT2018. June 11–15, 2018, Oslo, Norway.
24. **Mounier V., Picard C., Schiffmann J.** Data-driven pre-design tool for small scale centrifugal compressors in refrigeration // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. GT2018. June 11–15, 2018, Oslo, Norway.
25. **Zamiri A., Chung J.T.** Scale adaptive simulation of transient behavior in a transonic centrifugal compressor with a vaned diffuser // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. GT2018. June 11–15, 2018, Oslo, Norway.
26. **Harley P., Spence S., Filsinger D., Dietrich M., Early J.** Meanline modeling of inlet recirculation in automotive turbocharger centrifugal compressors // *Journal of Turbomachinery*. 2015. Vol. 137 / 011007-1. DOI: 10.1115/1.4028247
27. **Галеркин Ю.Б.** Формирование взглядов на рабочие процессы и современное состояние газодинамических методов проектирования промышленных центробежных компрессоров // *Компрессорная техника и пневматика*. 2000. № 2. С. 9–14.
28. **Галеркин Ю.Б., Данилов К.А., Попова Е.Ю.** Развитие метода универсального моделирования рабочего процесса ЦК. Программные комплексы первого уровня (третье поколение). Опыт разработки и практического использования комплекса третьего уровня. СПб., 1995.
29. **Галеркин Ю.Б., Данилов К.А., Попова Е.Ю.** Численное моделирование центробежных компрессорных ступеней (физические основы, современное состояние) // *Компрессорная техника и пневматика*. 1993. № 2.
30. **Galerkin Y.B., Mitrofanov V.P.** Current Optimum Design Methods in the Development of New Generations of Model Stages in Centrifugal Compressors // *Chemical and Petroleum Engineering* July, 1996. Vol. 31, № 11-12. New York. USA. 1996.
31. **Галеркин Ю.Б.** Начало развития теории центробежных компрессоров и создание базиса экспериментальных данных на кафедре компрессоростроения // *Сборник научных трудов «Некоторые проблемы энергомашиностроения»*. СПб., 1995. С. 22–30.
32. **Галеркин Ю.Б., Попова Е.Ю., Данилов К.А.** Универсальная модель центробежного компрессора – оптимальное решение // *Труды немецкого*



инженерного общ-ва. Германия, Ганновер. 28–29 сентября 1995. С. 54–59.

33. **Галеркин Ю.Б.** Математическое моделирование ступеней центробежного компрессора на кафедре компрессоростроения СПбГТУ (физические основы, современное состояние) // Сообщения Союза немецких инженеров. Ганновер. Германия. № 947. 1992.

34. **Галеркин, Ю.Б.** Турбокомпрессоры. СПб.: Изд-во КХТ, 2010. 650 с.

35. **Селезнев К.П., Галеркин Ю.Б.** Центробежные компрессоры. Л.: Машиностроение, 1982. 271 с.

36. **Рис В.Ф.** Центробежные компрессорные машины. Л.: Машиностроение, 1981. 351 с.

37. **Ден Г.Н.** Механика потока в центробежных компрессорах. Л.: Машиностроение, 1973. 268 с.

38. **Лившиц С.П.** Аэродинамика центробежных компрессорных машин Москва; Ленинград: Машиностроение, 1966. С. 335–337.

39. **Галеркин Ю.Б., Рекстин А.Ф., Солдатова К.В., Дроздов А.А.** Анализ геометрических и газодинамических параметров центробежных компрессорных ступеней в десятикратном диапазоне расчетного коэффициента расхода // Компрессорная техника и пневматика. 2016. № 7. С. 32–43.

40. **Рекстин А.Ф., Галеркин Ю.Б.** Особенности первичного проектирования малорасходных цен-

тробежных компрессорных ступеней // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2018. Т. 20, № 2. С. 43–54. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.2.06

41. **Григорьев А.В., Соловьева А.В., Галеркин Ю.Б., Рекстин А.Ф.** Вопросы аэродинамического проектирования сверхзвуковых центробежных компрессорных ступеней // Компрессорная техника и пневматика. 2014. № 6. С. 21–27.

42. **Рекстин А.Ф., Солдатова К.В., Дроздов А.А.** Особенности моделирования газодинамических характеристик высоконапорных центробежных ступеней // Климовские чтения. Перспективные направления авиадвигателестроения. СПб., 2013. С. 45–55.

43. **Galerkin Y., Rekstin A., Soldatova K.** Aerodynamic designing of supersonic centrifugal compressor stages // International Conference on Numerical Methods in Industrial Processes. World Academy of science, engineering and technology. Paris 2015 Conference. Vol:9 No:01 2015. № 216. URL: <http://www.waset.org/Publications/?path=Publications>

44. **Карпов А.Н.** Методика моделирования напорной характеристики центробежного компрессорного колеса по результатам испытаний модельных ступеней.: Дис. ... канд. техн. наук / СПбГПУ. СПб., 2011. 137 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ДРОЗДОВ Александр Александрович — кандидат технических наук старший научный сотрудник Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
E-mail: A_drozdi@mail.ru

РЕКСТИН Алексей Феликсович — кандидат технических наук заместитель заведующего НИИ «Газовая динамика турбомашин» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
E-mail: rekstin2k7@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 24.12.2018

REFERENCES

[1] **Yevdokimov V.Ye.** Bank eksperimentalnykh dannykh po modelnym stupenyam i ikh elementam dlya proyektirovaniya TsKM. *Turbiny i kompressory*. 1997. № 3. P. 4 (rus.)

[2] **Lyubimov A.N., Yevdokimov V.Ye.** O raschete gazodinamicheskikh kharakteristik stupeni tsentrobezhnogo kompressora. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*. 2012. № 7. S. 28–33. (rus.)

[3] **Semakov A.V., Yevdokimov V.Ye., Reprintsev A.I., Lyubimov A.N.** Modernizatsiya tsentrobezhnykh kom-

pressorov na azotnykh proizvodstvakh. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*. 2013. № 3. S. 20–22. (rus.)

[4] **Lyubimov A.N., Yevdokimov V.Ye., Semakov A.V., Reprintsev A.I.** Ob ispolzovanii eksperimentalnogo i raschetnykh metodov pri proyektirovanii protochnykh chastey tsentrobezhnykh kompressorov. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*. 2014. № 6. S. 12–20. (rus.)

[5] **Lunev A.T.** Struktura metoda proyektirovaniya i ispytaniya protochnoy chasti nagnetateley dlya

perekachivaniya prirodnogo gaza. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*. 2001. № 10. S. 4–7. (rus.)

[6] **Lunev A.T.** Razrabotka vysokoeffektivnykh smennykh protochnykh chastey tsentrobezhnykh kompressorov gazoperekachivayushchikh agregatov: Dis, ... kand. tekhn. nauk. Kazan, 2005. 123 s. (rus.)

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

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

[9] **Syka T., Luňáček O.** Numerical simulation of radial compressor stage. *EPJ Web of Conferences*. 45, 01088 (2013). DOI: 10.1051/epjconf/20134501088

[10] **Pei-Yuan Li, Chu-Wei Gu, Yin Song.** A New Optimization Method for Centrifugal Compressors Based on 1D Calculations and Analyses. *Energies*. 2015. Vol. 8. P. 4317–4334. DOI:10.3390/en8054317

[11] **Schiff J.** A preliminary design tool for radial compressors: Thesis for the Degree of Master of Science / LTH Lund University. 2013. 171 p.

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

[13] **Casey M.A., Robinson C.** Method to Estimate the Performance Map of a Centrifugal Compressor Stage. *Journal of Turbomachinery*. 2013. Vol. 135 / 021034.

[14] **Aungier R.H.** Mean Streamline Aerodynamic Performance Analysis of Centrifugal Compressors. *Transactions of the ASME*. 1995. Vol. 117.

[15] **Kangsoo Im.** Development of a design method for centrifugal compressors. [text]: Ph. D. thesis / Michigan State University. 2012. 160 p.

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

[17] **Japikse D., Krivitzky E.M.** Radial stages with non-uniform pressures at diffuser inlet. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*. Volume 2D-2016, Seoul; South Korea; 13 June 2016 – 17 June 2016; DOI: 10.1115/GT2016-57956

[18] **Japikse D.** Turbomachinery design with an agile engineering system. *JSME fluid engineering conference*. Osaka. September 19–20. 2003.

[19] **Stuart C., Spence S., Kim S.I., Filsinger D., Starke A.** A 1-D Vaneless Diffuser Model Accounting for the Effects of Spanwise Flow Stratification. *Proceedings of The International Gas Turbine Congress*. Tokyo. 2015. Gas Turbine Society of Japan. P. 485–494.

[20] **Gong X., Chen R.** Total pressure loss mechanism of centrifugal compressors. *Journal of Mechanical Engineering Research*. 2014. Vol. 4 (2). P. 45–59.

[21] **Harley P., Spence S., Filsinger D., Dietrich M., Early J.** An evaluation of 1D design methods for the off-design performance prediction of automotive turbo-charger compressors. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2012*. GT2012. June 11–15, 2012, Copenhagen, Denmark GT2012-69743.

[22] **Schneider M., Bühler J., Hanna M., Schiffer H.-P., Leichtfuß S.** Analytical loss prediction for turbocharger compressors. *Proceedings of 11th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics*. ETC11. March 23–27, 2015, Madrid, Spain

[23] **Felipe C., Favaretto F., Anderson M.R., Li S., Hu L.** Development of a meanline model for preliminary design of recirculating casing treatment in turbo-charger compressors. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. GT2018. June 11–15, 2018, Oslo, Norway.

[24] **Mounier V., Picard C., Schiffmann J.** Data-driven pre-design tool for small scale centrifugal compressors in refrigeration. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. GT2018. June 11–15, 2018, Oslo, Norway.

[25] **Zamiri A., Chung J.T.** Scale adaptive simulation of transient behavior in a transonic centrifugal compressor with a vaned diffuser. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. GT2018. June 11–15, 2018, Oslo, Norway.

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

[27] **Galerkin Yu.B.** Formirovaniye vzglyadov na rabochiye protsessy i sovremennoye sostoyaniye gazodinamicheskikh metodov proyektirovaniya promyshlennykh tsentrobezhnykh kompressorov, *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*. 2000. № 2. S. 9–14. (rus.)

[28] **Galerkin Yu.B., Danilov K.A., Popova Ye.Yu.** Razvitiye metoda universalnogo modelirovaniya



rabochego protsessa TsK. Programmnyye komplekсы pervogo urovnya (tret'ye pokoleniye), opyt razrabotki i prakticheskogo ispolzovaniya kompleksa tret'yego urovnya. SPb., 1995. (rus.)

[29] **Galerkin Yu.B., Danilov K.A., Popova Ye.Yu.** Chislennoye modelirovaniye tsentrobezhnykh kompressornykh stupeney (fizicheskiye osnovy, sovremennoye sostoyaniye). *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*. 1993. № 2. (rus.)

[30] **Galerkin Y.B., Mitrofanov V.P.** Current Optimum Design Methods in the Development of New Generations of Model Stages in Centrifugal Compressors. *Chemical and Petroleum Engineering*. 1996. Vol. 31, № 11–12, New York. USA. 1996.

[31] **Galerkin Yu.B.** Nachalo razvitiya teorii tsentrobezhnykh kompressorov i sozdaniye bazisa eksperimentalnykh dannyykh na kafedre kompressorostroyeniya. *Sbornik nauchnykh trudov «Nekotoryye problemy energomashinostroyeniya»*. SPb., 1995. S. 22–30. (rus.)

[32] **Galerkin Yu.B., Popova Ye.Yu., Danilov K.A.** Universalnaya model tsentrobezhnogo kompressora – optimalnoye resheniye. *Trudy nemetskogo inzhenernogo obshch-va*. Germaniya, Gannover. 28–29 sentyabrya 1995. C. 54–59

[33] **Galerkin Yu.B.** Matematicheskoye modelirovaniye stupeney tsentrobezhnogo kompressora na kafedre kompressorostroyeniya SPbGTU (fizicheskiye osnovy, sovremennoye sostoyaniye). *Soobshcheniya Soyuzu nemetskikh inzhenerov*. Gannover. Germaniya. № 947. 1992.

[34] **Galerkin Yu.B.** Turbokompressor. SPb.: Izd-vo KKhT, 2010. 650 s. (rus.)

[35] **Seleznev K.P., Galerkin Yu.B.** Tsentrobezhnyye kompressory. L.: Mashinostroyeniye, 1982. 271 s. (rus.)

[36] **Ris V.F.** Tsentrobezhnyye kompressornyye mashiny. L.: Mashinostroyeniye, 1981. – 351 s.

[37] **Den G.N.** Mekhanika potoka v tsentrobezhnykh kompressorakh. L.: Mashinostroyeniye, 1973. 268 s. (rus.)

[38] **Livshits S.P.** Aerodinamika tsentrobezhnykh kompressornykh mashin. Moskva; Leningrad: Mashinostroyeniye, 1966. S. 335–337.

[39] **Galerkin Yu.B., Rekstin A.F., Soldatova K.V., Drozdov A.A.** Analiz geometricheskikh i gazodinamicheskikh parametrov tsentrobezhnykh kompressornykh stupeney v desyatikratnom diapazone raschetnogo koefitsiyenta raskhoda. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*. 2016. № 7. S. 32–43. (rus.)

[40] **Rekstin A.F., Galerkin Yu.B.** Osobennosti pervichnogo proyektirovaniya maloraskhodnykh tsentrobezhnykh kompressornykh stupeney. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta*. 2018. T. 20, № 2. S. 43–54. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.2.06. (rus.)

[41] **Grigoryev A.V., Solovyeva A.V., Galerkin Yu.B., Rekstin A.F.** Voprosy aerodinamicheskogo proyektirovaniya sverkhzvukovykh tsentrobezhnykh kompressornykh stupeney. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*. 2014. № 6. S. 21–27. (rus.)

[42] **Rekstin A.F., Soldatova K.V., Drozdov A.A.** Osobennosti modelirovaniya gazodinamicheskikh kharakteristik vysokonapornykh tsentrobezhnykh stupeney. *Klimovskiy chteniye. Perspektivnyye napravleniya aviadvigatelya stroyeniya*. SPb. 2013. S. 45–55. (rus.)

[43] **Galerkin Y., Rekstin A., Soldatova K.** Aerodynamic designing of supersonic centrifugal compressor stages. *International Conference on Numerical Methods in Industrial Processes. World Academy of science, engineering and technology*. Paris 2015 Conference. Vol:9 No:01 2015. № 216. URL: <http://www.waset.org/Publications/?path=Publications>

[44] **Karpov A.N.** Metodika modelirovaniya napornoy kharakteristiki tsentrobezhnogo kompressornogo koleasa po rezul'tatam ispytaniy modelnykh stupeney. [Tekst]: dis... kand. tekhn. nauk / SPbGPU. SPb., 2011. 137 s. (rus.)

THE AUTHORS

DROZDOV Aleksandr A. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: A_drozdi@mail.ru

REKSTIN Aleksei F. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: rekstin2k7@mail.ru

Received: 24.12.2018

DOI: 10.18721/JEST.25109
УДК 621.43

В.А. Лиханов, О.П. Лопатин

Вятская государственная сельскохозяйственная академия, г. Киров, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКСИЧНОСТИ БИОДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА СПИРТЕ

В работе обоснована необходимость использования биотоплив на основе спирта в дизельных двигателях. Исследованы такие возобновляемые экологические источники энергии, как метиловый и этиловый спирты. С целью разработки и оптимизации состава спирто-топливных эмульсий для применения в дизеле проведены его исследования при работе на дизельном топливе, метано- и этано-топливных эмульсиях. Предложено перспективное решение по улучшению экологических показателей дизеля путем применения спирто-топливных эмульсий, что позволяет снизить в отработавших газах при работе на метано-топливной эмульсии содержание оксидов азота — на 41,3 %, сажи — в 6,9 раза, диоксида углерода — на 6,7 %, оксида углерода — на 45,0 %; при работе на этано-топливной эмульсии: оксидов азота — на 50,2 %, сажи — в 5,2 раза, диоксида углерода — на 23,8 %, оксида углерода — на 25,0 %.

Ключевые слова: дизельный двигатель, метанол, этанол, эмульсия, биотопливо, токсичность.

Ссылка при цитировании:

В.А. Лиханов, О.П. Лопатин. Исследование токсичности биодизельного двигателя, работающего на спирте // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 92–100. DOI: 10.18721/JEST.25109.

V.A. Likhanov, O.P. Lopatin

Vyatka state agricultural academy, Kirov, Russia

STUDY ON TOXICITY OF BIODIESEL ENGINE RUNNING ON ALCOHOL

The paper substantiates the need for using biofuels based on alcohol in diesel engines. Such renewable environmental energy sources as methyl and ethyl alcohols were investigated. In order to develop, determine and optimize the composition of alcohol-fuel emulsions for use in diesel, studies were carried out for engines running on diesel fuel, methanol and ethanol fuel emulsions. We have found a promising solution to improve the environmental performance of diesel through using alcohol fuel emulsions, allowing to reduce the content of exhaust gases for engines running on methanol fuel emulsion: nitrogen oxides by 41.3 %, soot by 6.9 times, carbon dioxide by 6.7 %, carbon monoxide by 45.0 %; for engines running on ethanol fuel emulsion: nitrogen oxides by 50.2 %, soot by 5.2 times, carbon dioxide by 23.8 %, carbon monoxide by 25.0 %.

Keywords: diesel engine, methanol, ethanol, emulsion, biofuel, toxicity.

Citation:

V.A. Likhanov, O.P. Lopatin, Study on toxicity of biodiesel engine running on alcohol, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 92–100, DOI: 10.18721/JEST.25109.



Введение

Хорошо известно, что для дизельных двигателей постоянно разрабатываются и совершенствуются нормы выбросов вредных веществ не только в масштабах конкретного региона, страны, но и в рамках международных программ ЕЭК ООН. В настоящее время экологические требования к дизелям наиболее приоритетны, при этом параметры, характеризующие экологичность отработавших газов (ОГ), производители дизелей закладывают в их конструкцию уже на стадии проектирования, причем они не должны ухудшаться в процессе эксплуатации. Будущее за экологически чистыми тепловыми двигателями, работающими на альтернативных нефтяному видах топлива. Всё более широкое распространение получают альтернативные виды биотоплива на основе спиртов и растительных масел (рапсовое, подсолнечное, соевое, арахисовое, пальмовое), а также их производных. Интенсивные работы по переводу дизелей на биотопливо ведутся как в странах с ограниченным энергетическим потенциалом, так и в странах с большими запасами нефти, а также в высокоразвитых странах, имеющих финансовую возможность приобретения различных альтернативных видов топлива [1, 2].

Наиболее исследованными и перспективными на сегодняшний день для применения в дизелях являются спирты, такие, как метанол (CH_3OH) и этанол ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Среди положительных свойств метанола для применения в дизелях можно отметить наличие в его молекуле атома кислорода, что даёт возможность использовать метанол в качестве оксигенатов (кислородсодержащих компонентов), способствующих снижению вредных выбросов сажи и СО в продуктах его сгорания. Этанол широко используется в пищевой промышленности, парфюмерии, медицине, химической промышленности, кожевенной промышленности, радиоэлектронике, на бытовые нужды и, конечно же, в топливной промышленности. Метанол нашёл большое применение в химиче-

ской промышленности, и немалые его объёмы применяются в производстве топлив для тепловых двигателей. Применение этих спиртов в качестве альтернативного биотоплива для дизелей стало возможным в результате их получения доступным способом из сельскохозяйственных и пищевых отходов, из газообразного топлива. Но более важная причина в применении метанола и этанола — это снижение выбросов токсичных компонентов ОГ (рис. 1) [3].

При использовании спиртов как топлива для дизелей можно значительно снизить выбросы сажевых частиц и оксидов азота. Это происходит вследствие того, что при горении спирта в камере сгорания дизеля образуется меньше (чем у дизельного топлива) промежуточных продуктов, способствующих зарождению ацетиленовых и ароматических углеводородов, которые и приводят к образованию сажи. Кроме того, в ОГ при сгорании метанола и этанола значительно меньше различных соединений серы. Спирт со своей более простой структурой и незначительными размерами молекул служит одним из определяющих факторов более «чистого сгорания» топлива [4].

По сравнению с другими альтернативными видами топлива стоимость метанола невысока, но один из его недостатков — это большая теплота испарения при низкой температуре кипения (1104 кДж/кг против 250 кДж/кг у штатного дизельного топлива). Это приводит к охлаждению воздушного заряда вследствие испарения спирта при низких цетановых числах и высоких температурах самовоспламенения, что в итоге является причиной плохого воспламенения в камере сгорания дизеля. Воспламенение метанола в таких условиях возможно с помощью дополнительно установленных источников воспламенения, подачи метанола на впуск или использования различных катализаторов, которые способствуют снижению температуры воспламенения, а также ускоряют реакции горения. Ещё один эффективный способ воспламенения метанола в камере сгорания дизеля —

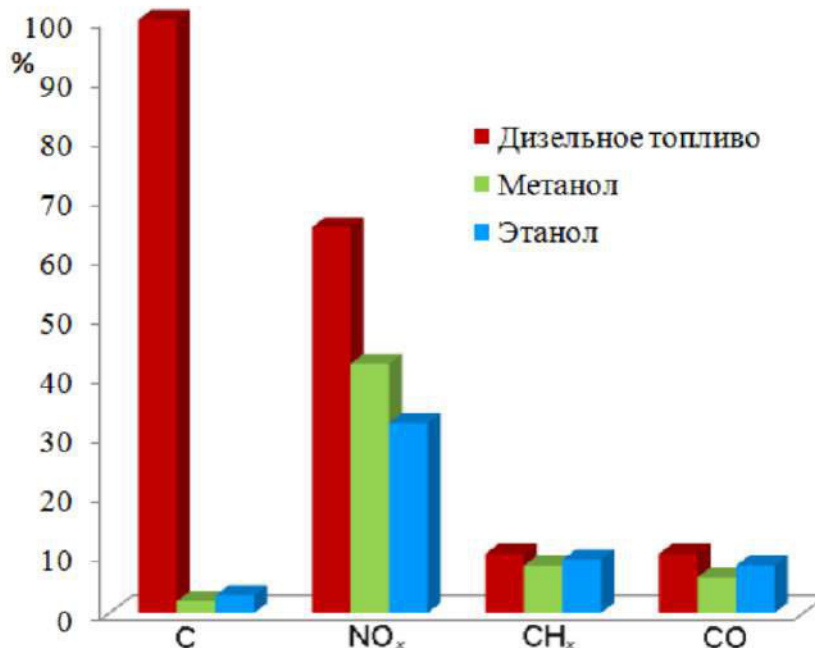


Рис. 1. Относительное содержание вредных веществ в ОГ дизельных двигателей, работающих на дизельном топливе и спиртах, % (за 100 % принято содержание сажи для дизельного топлива)

Fig. 1. The relative content of harmful substances in the EG of diesel engines running on diesel fuel and alcohols, % (for 100 % diesel fuel on soot is accepted)

подача запальной порции штатного дизельного топлива в камеру сгорания. С целью улучшения воспламенения спиртов используют двойные системы топливоподачи, которые одновременно с подачей спирта (основное биотопливо) осуществляют и подачу запальной порции дизельного топлива [5].

Требуемые физико-химические свойства альтернативного биотоплива обуславливают применение соответствующих технологий, способных обеспечить эксплуатационные, экономические и экологические показатели. При производстве биотоплива применяют различные виды растительных масел: рапсовое, льняное, подсолнечное, пальмовое и др. При этом полученное биотопливо из разных растительных масел имеет ряд отличительных физико-химических признаков. К таким признакам относятся: низшая теплота сгорания,

вязкость, плотность, фильтруемость, температура застывания, коксуемость, цетановое число и др. (табл. 1) [6].

Данные табл. 1 наглядно демонстрируют схожесть параметров биотоплива с дизельным топливом по плотности и расхождению по кинематической вязкости, низшей теплоте сгорания и цетановому числу. Естественно, все это говорит о том, что в чистом виде один вид биотоплива сложно применим в дизеле. Поэтому было принято решение о применении биотоплива в форме эмульсий в сочетании со спиртом, что позволяет приблизить значения физико-химических свойств биотоплива к штатному дизельному топливу [7].

Цель данной работы – применение экологичных видов биотоплива в дизелях для улучшения их экологических показателей и экономии нефтяного моторного топлива.



Таблица 1

Физико-химические характеристики биотоплива и дизельного топлива

Table 1

Physical and chemical characteristics of biofuels and diesel fuel

Топливо	Характеристики топлива			
	Плотность при 20 °С, кг/м ³	Кинематическая вязкость при 20 °С, мм ² /с	Низшая теплота сгорания, МДж/м ³	Цетановое число
Метанол	795	0,55	20,0	3
Этанол	790	1,20	27,4	8
Рапсовое масло	877	80	36,7	44
МЭРМ	860–900	12	37,2	51
Дизельное топливо	863	3,0–6,0	42,5	45

Методика исследований

Для проведения исследований создана экспериментальная база в научно-исследовательской лаборатории испытания дизелей кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов Вятской государственной сельскохозяйственной академии. Экспериментальная база включает электротормозной стенд SAK-N670 с балансирным маятниковым механизмом, устанавливаемые на него дизели, измерительную аппаратуру. Приготовление эмульсий осуществлялось гомогенизатором MPW-302 при частоте вращения вала 2000 мин⁻¹. Отбор проб ОГ производился газозаборниками автоматической системы газового анализа (АСГА-Т), установленными в выпускном трубопроводе дизеля. Дымность отработавших газов измерялась с помощью дымомера «BOSCH-EFAW-68A» [8, 9].

При испытаниях дизеля, работающего на спиртовой эмульсии, использовался следующий состав, %: спирт — 25, моюще-диспергирующая присадка сукцинимид С-5А — 0,5, вода — 7, дизельное топливо — 67,5 [10].

Результаты и обсуждение

На рис. 2 и 3 представлены экологические показатели дизеля, работающего на метанолю-топливной эмульсии (МТЭ) и этанолю-топливной эмульсии (ЭТЭ) в зависимости от

установочного угла опережения впрыскивания топлива ($\Theta_{впр}$).

Анализ кривых токсичности ОГ дизеля, работающего по дизельному процессу, показывает, что с увеличением установочного угла опережения впрыскивания топлива $\Theta_{впр}$ происходит рост оксидов азота NO_x и суммарных углеводородов CH_x . Содержание оксида углерода CO и диоксида CO_2 с увеличением $\Theta_{впр}$ снижается [11].

Обсуждая результаты исследований экологических показателей работы дизеля в зависимости от изменения $\Theta_{впр}$, следует отметить, что некоторые зависимости содержания токсичных компонентов в отработавших газах при работе на спирто-топливной эмульсии отличаются от аналогичных кривых для дизельного процесса. Анализ показал, что отличающийся от дизельного процесса характер зависимостей имеют только токсичные компоненты, получающиеся в результате неполноты сгорания топлива. Скорее всего, это объясняется тем, что у применяемых спиртов меньшие по отношению к дизельному топливу теплотворная способность и значения цетановых чисел, что приводит к увеличению периода задержки воспламенения и росту продуктов неполного сгорания топлива — CH_x , CO и сажи. Применение же спирто-топливных эмульсий снижает содержание в ОГ оксидов азота, оксида и диоксида углерода и сажи [12, 13].

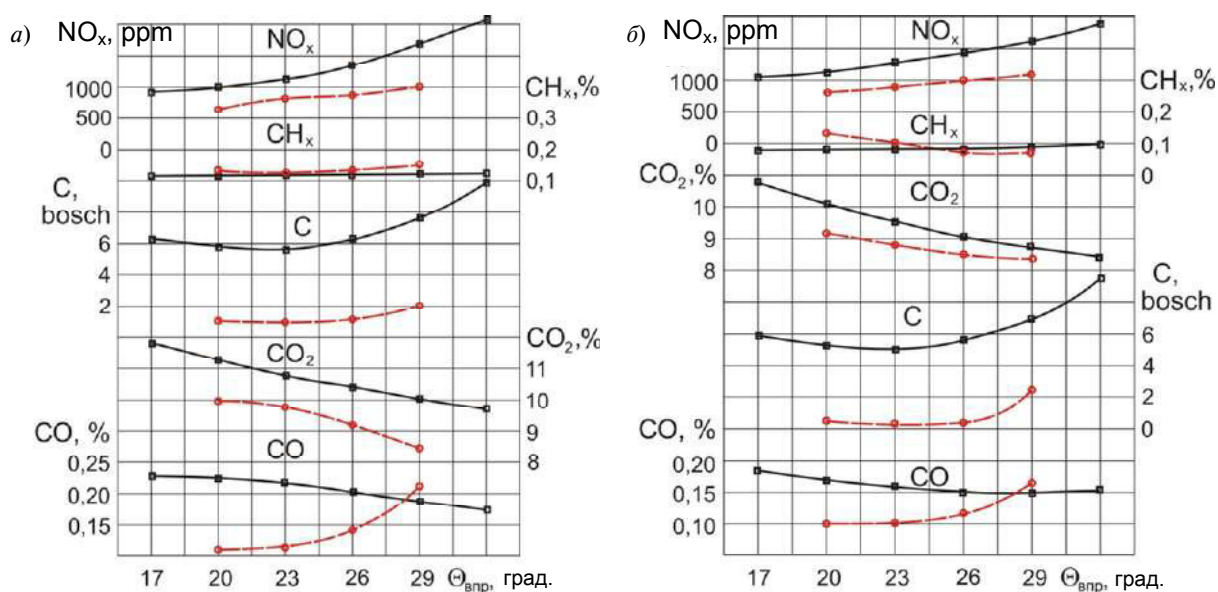


Рис. 2. Зависимость экологических показателей работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 от изменения $\Theta_{\text{впр}}$: а – $n=2200 \text{ мин}^{-1}$; б – $n=1700 \text{ мин}^{-1}$;

— дизельное топливо; — — МТЭ

Fig. 2. The dependence of the environmental performance of diesel engine 4F 11.0/12.5 from changes Θ_{inj} : а – $n=2200 \text{ min}^{-1}$; б – $n=1700 \text{ min}^{-1}$;

– Diesel fuel; – – MFE

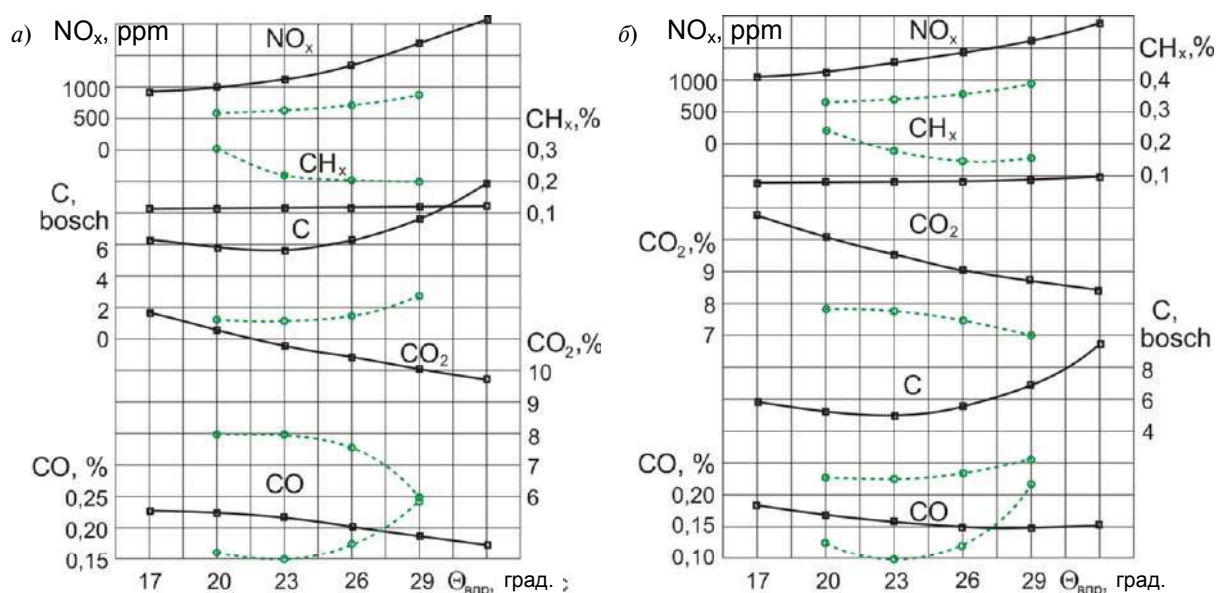


Рис. 3. Зависимость экологических показателей работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 от изменения $\Theta_{\text{впр}}$: а – $n=2200 \text{ мин}^{-1}$; б – $n=1700 \text{ мин}^{-1}$;

— дизельное топливо; — — ЭТЭ

Fig. 3. The dependence of the environmental performance of diesel engine 4F 11.0/12.5 from changes Θ_{inj} : а – $n=2200 \text{ min}^{-1}$; б – $n=1700 \text{ min}^{-1}$;

— Diesel fuel; – – EFE

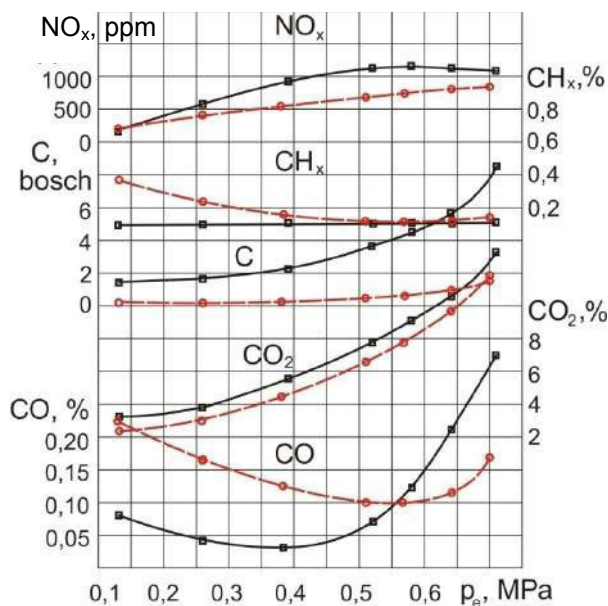


Рис. 4. Зависимость экологических показателей работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 от изменения нагрузки при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$:

— дизельное топливо; — — МТЭ

Fig. 4. The dependence of the environmental performance of the diesel 4F 11.0/12.5 from the load changes at $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$:

— Diesel fuel; — — MFE

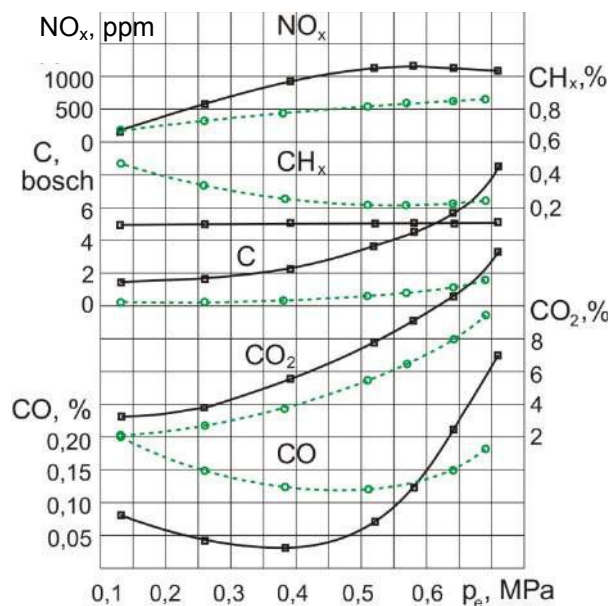


Рис. 5. Зависимость экологических показателей работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 от изменения нагрузки при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$:

— дизельное топливо; — — ЭТЭ

Fig. 5. The dependence of the environmental performance of the diesel 4F 11.0/12.5 from the load changes at $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$:

— Diesel fuel; — — EFE

Таблица 2

Результаты исследований показателей токсичности и дымности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при оптимальных значениях $\Theta_{\text{впр}}$ и номинальном режиме ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 0,64 \text{ МПа}$)

Table 2

The results of studies of the toxicity and opacity of the EG of diesel 4F 11.0/12.5 at optimal values of Θ_{inj} and nominal mode ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 0.64 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели			
	Оксиды азота NO_x , ppm	Сажа С, единицы по шкале Bosch	CO_2 , %	CO , %
Дизельное	1320	6,2	10,5	0,20
Метано-топливная эмульсия	775 (снижение на 41,3 %)	0,9 (снижение в 6,9 раза)	9,8 (снижение на 6,7 %)	0,11 (снижение на 45,0 %)
Этано-топливная эмульсия	657 (снижение на 50,2 %)	1,2 (снижение в 5,2 раза)	8,0 (снижение на 23,8 %)	0,15 (снижение на 25,0 %)

На рис. 4 и 5 представлены зависимости экологических показателей работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 от нагрузки при номинальном скоростном режиме.

Анализ графиков токсичности и дымности ОГ дизеля при работе на спирто-топливных

эмульсиях показывает, что во всем исследуемом диапазоне нагрузки происходит снижение содержания оксидов азота NO_x , сажи С, диоксида углерода CO_2 и оксида углерода СО при максимальных значениях P_e , при этом отмечен рост суммарных углеводородов CH_x [14].

Результаты исследований показателей токсичности и дымности отработавших газов дизеля представлены в табл. 2 [15].

Заключение

На основании полученных результатов предложено поддерживать следующие соотношения спирто-топливных эмульсий: спирт (метанол или этанол) — 25 %, моюще-диспергирующая присадка сукцинимид С-5А — 0,5 %, вода — 7 %, дизельное топливо — 67,5 %.

При работе дизеля 4Ч 11,0/12 на спирто-топливной эмульсии указанного состава определено значение оптимального установочного угла опережения впрыскивания топлива — 23°. Это же значение рекомендовано и для дизельного процесса.

Дано перспективное решение улучшения экологических показателей дизеля путем применения спирто-топливных эмульсий, позволяющее снизить содержание в ОГ: при работе на метаноле-топливной эмульсии — оксидов азота на 41,3 %, сажи в 6,9 раза, диоксида углерода на 6,7 %, оксида углерода на 45,0 %; при работе на этаноле-топливной эмульсии — оксидов азота на 50,2 %, сажи в 5,2 раза, диоксида углерода на 23,8 %, оксида углерода на 25,0 %.

Авторы выражают благодарность за помощь в анализе полученных результатов при подготовке рукописи к печати, академику РАН, научному руководителю Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого **Юрию Сергеевичу Васильеву**.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sivakumar M., Ramesh Kumar R., Syed Thasthagir M.H., Shanmuga Sundaram N. Effect of aluminium oxide nanoparticles blended pongamia methyl ester on performance, combustion and emission characteristics of diesel engine // *Renewable Energy*. 2018. Vol. 116. P. 518–526.
2. Chang W.R., Hwang J.J., Wu W. Environmental impact and Sustainability study on Biofuels for Transportation Applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 67. P. 277–288.
3. Starik A.M., Savel'ev A.M., Favorskii O.N., Titova N.S. Analysis of emission characteristics of gas turbine engines with some alternative fuels // *International Journal of Green Energy*. 2018. Vol. 15. № 3. P. 161–168.
4. Presser C., Nazarian A., Millo A. Laser-driven calorimetry measurements of petroleum and biodiesel fuels // *Fuel*. 2018. Vol. 214. P. 656–666.
5. Aydin F., Ogut H. Effects of Ethanol-Biodiesel-Diesel Fuel in Single Cylinder Diesel Engine to engine Performance and Emissions // *Renewable Energy*. 2017. Vol. 103. P. 688–694.
6. Han K., Yang B., Zhao C. [et al.]. Experimental Study on Evaporation Characteristics of Ethanol-Diesel blend Fuel Droplet // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016. Vol. 70. P. 381–388.
7. Zhang S., Wu W., Lee C.-F. [et al.]. A Semi-detailed chemical Kinetic Mechanism of Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) and Diesel blend for Combustion Simulations // *SAE International Journal of Engines*. 2016. Vol. 9. № 1. P. 631–640.
8. Козлов А.Н., Арасланов М.И. Определение оптимальных установочных углов опережения впрыскивания топлива дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и рапсовом масле // *Аграрный научный журнал*. 2014. № 6. С. 47–49.
9. Фоминых А.В., Копчиков В.Н., Николаевский М.Д. Определение оптимальных установочных углов опережения впрыска метанола и метилового эфира рапсового масла дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе с двойной системой топливоподачи // *Аграрный научный журнал*. 2015. № 1. С. 51–53.
10. Romanyuk V., Likhanov V.A., Lopatin O.P. Reducing the environmental threat of motor vehicles by converting engines for operating on natural gas // *Теоретическая и прикладная экология*. 2018. № 3. С. 27–32.
11. Анфилатова Н.С., Анфилатов А.А. Образование оксидов азота в поршневых двигателях // *Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства*. 2017. № 19. С. 317–320.
12. Rajesh Kumar B., Saravanan S. Use of Higher Alcohol Biofuels in Diesel Engines: a Review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 60. P. 84–115.



13. **Datta A., Mandal B.K.** Impact of Alcohol Addition to Diesel on the Performance Combustion and Emissions of a Compression Ignition Engine // *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 98. P. 670–682.

14. **Романов С.А.** Результаты исследования экологических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на метаноле-топливной эмульсии в зависимости от изменения нагрузки // *Улучшение экс-*

плуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: материалы IX Международной научно-практической конференции. Киров: Изд-во Вятской ГСХА, 2016. С. 331–335.

15. **Likhanov V.A., Lopatin O.P.** Use of Natural Gas, Methanol, and Ethanol Fuel Emulsions as Environmentally Friendly Energy Carriers for Mobile Heat Power Plants // *Thermal Engineering*. 2017. Vol. 64. № 12. P. 935–944.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛИХАНОВ Виталий Анатольевич — доктор технических наук профессор Вятской государственной сельскохозяйственной академии

E-mail: lihanov.va@mail.ru

ЛОПАТИН Олег Петрович — кандидат технических наук доцент Вятской государственной сельскохозяйственной академии

E-mail: nirs_vsaa@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 21.01.2019

REFERENCES

[1] **Sivakumar M., Ramesh Kumar R., Syed Thasthagir M.H., Shanmuga Sundaram N.** Effect of aluminium oxide nanoparticles blended pongamia methyl ester on performance, combustion and emission characteristics of diesel engine. *Renewable Energy*. 2018. Vol. 116. P. 518–526.

[2] **Chang W.R., Hwang J.J., Wu W.** Environmental impact and Sustainability study on Biofuels for Transportation Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 67. P. 277–288.

[3] **Starik A.M., Savel'ev A.M., Favorskii O.N., Titova N.S.** Analysis of emission characteristics of gas turbine engines with some alternative fuels. *International Journal of Green Energy*. 2018. Vol. 15. № 3. P. 161–168.

[4] **Presser C., Nazarian A., Millo A.** Laser-driven calorimetry measurements of petroleum and biodiesel fuels. *Fuel*. 2018. Vol. 214. P. 656–666.

[5] **Aydin F., Ogut H.** Effects of Ethanol-Biodiesel-Diesel Fuel in Single Cylinder Diesel Engine to engine Performance and Emissions. *Renewable Energy*. 2017. Vol. 103. P. 688–694.

[6] **Han K., Yang B., Zhao C. [et al.]** Experimental Study on Evaporation Characteristics of Ethanol-Diesel blend Fuel Droplet. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016. Vol. 70. P. 381–388.

[7] **Zhang S., Wu W., Lee C.-F. [et al.]** A Semi-detailed chemical Kinetic Mechanism of Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) and Diesel blend for Combustion Simulations. *SAE International Journal of Engines*. 2016. Vol. 9. № 1. P. 631–640.

[8] **Kozlov A.N., Araslanov M.I.** Opredeleniye optimalnykh ustanovochnykh uglov operezheniya vpryskivaniya topliva dizelya 2Ch 10,5/12,0 pri rabote na etanole i rapsovom masle. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal*. 2014. № 6. S. 47–49. (rus.)

[9] **Fominykh A.V., Kopchikov V.N., Nikolayevskiy M.D.** Opredeleniye optimalnykh ustanovochnykh uglov operezheniya vpryska metanola i metilovogo efira rapsovogo masla dizelya 2Ch 10,5/12,0 pri rabote s dvoynoy sistemoy toplivopodachi. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal*. 2015. № 1. S. 51–53. (rus.)

[10] **Romanyuk V., Likhanov V.A., Lopatin O.P.** Reducing the environmental threat of motor vehicles by converting engines for operating on natural gas. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2018. № 3. S. 27–32. (rus.)

[11] **Anfilatova N.S., Anfilatov A.A.** Obrazovaniye oksidov azota v porshnevykh dvigatelyakh. *Aktualnyye voprosy sovershenstvovaniya tekhnologii proizvodstva i pererabotki produktov selskogo khozyaystva*. 2017. № 19. S. 317–320. (rus.)

[12] **Rajesh Kumar B., Saravanan S.** Use of Higher Alcohol Biofuels in Diesel Engines: a Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 60. P. 84–115.

[13] **Datta A., Mandal B.K.** Impact of Alcohol Addition to Diesel on the Performance Combustion and Emissions of a Compression Ignition Engine. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 98. P. 670–682.

[14] **Romanov S.A.** Rezultaty issledovaniya ekologicheskikh pokazateley dizelya 4Ch 11,0/12,5 pri

rabote na metanolo-toplivnoy emulsii v zavisimosti ot izmeneniya nagruzki. *Uluchsheniye ekspluatatsionnykh pokazateley dvigateley vnutrennego sgoraniya: Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Kirov: Izd-vo Vyatskoy GSKhA, 2016. S. 331–335.

[15] **Likhanov V.A., Lopatin O.P.** Use of Natural Gas, Methanol, and Ethanol Fuel Emulsions as Environmentally Friendly Energy Carriers for Mobile Heat Power Plants. *Thermal Engineering*. 2017. Vol. 64. № 12. P. 935–944.

THE AUTHORS

LIKHANOV Vitalii.A. – *Vyatka state agricultural academy*

E-mail: lihanov.va@mail.ru

LOPATIN Oleg P. – *Vyatka state agricultural academy*

E-mail: nirs_vsaa@mail.ru

Received: 21.01.2019



DOI: 10.18721/JEST.25110
УДК 621.514.4

Л.Г. Кузнецов¹, Ю.Л. Кузнецов¹, А.В. Бураков¹, Н.А. Кудла²

1 – АО «Компрессор», Санкт-Петербург, Россия

2 – АО НПО «Компрессор», Санкт-Петербург, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РОТОРНЫХ КОМПРЕССОРОВ

В статье рассмотрены вопросы цифрового проектирования роторных газовых компрессоров. Выявлены освоенные российскими и зарубежными предприятиями в различных отраслях промышленности (в том числе в авиаракетостроении и энергетике) аддитивные технологии изготовления деталей и сборочных единиц с помощью 3D-печати металлическими и неметаллическими материалами, проанализированы наиболее перспективные материалы, достижения и тенденции развития. Проанализирован опыт применения воздушных и газовых роторных компрессоров, исследованы металлические и неметаллические материалы, применяемые для их изготовления. Выявлены основные факторы, определяющие стоимостные показатели и эффективность роторных компрессоров. Определены оптимальные параметры газовых компрессоров для эффективного решения промышленных задач. Предложены методы проектирования и способы изготовления, обеспечивающие снижение материалоемкости и увеличение прочности деталей и узлов компрессоров.

Ключевые слова: компрессор, роторный, эффективность, аддитивность, 3D-печать.

Ссылка при цитировании:

Л.Г. Кузнецов, Ю.Л. Кузнецов, А.В. Бураков, Н.А. Кудла. Повышение эффективности роторных компрессоров // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 101–110. DOI: 10.18721/JEST.25110.

L.G. Kuznetsov¹, Yu.L. Kuznetsov¹, A.V. Burakov¹, N.A. Kudla²

1 – JSC «Compressor», St. Petersburg, Russia

2 – JSC SPA «Compressor», St. Petersburg, Russia

EFFICIENCY IMPROVEMENT OF ROTARY COMPRESSORS

The article discusses the issues of digital design of rotary gas compressors, identifies additive technologies for manufacturing parts and assembly units mastered by industrial enterprises abroad and in Russia using 3D printing with metal and non-metallic materials in various industries (including aircraft manufacturing and power engineering). We have analyzed the most promising materials, achievements and development trends, analyzed the experience of using air and gas rotary compressors, investigated metallic and non-metallic materials used for manufacturing rotary compressors. We have identified the main factors determining low cost indicators and efficiency of rotary compressors, determined the optimal parameters of gas compressors to effectively solve industrial problems, proposed design methods and manufacturing techniques reducing material consumption and increasing the strength of parts and components of compressors.

Keywords: compressor, rotary, efficiency, additivity, 3D printing.

Citation:

L.G. Kuznetsov, Yu.L. Kuznetsov, A.V. Burakov, N.A. Kudla, Efficiency improvement of rotary compressors, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 101–110, DOI: 10.18721/JEST.25110.

Введение

В промышленности эксплуатируется большое количество компрессорного оборудования для получения сжатого воздуха, значительная часть которого относится к роторным (винтовым) компрессорам.

В различных технических областях в настоящее время для снижения стоимости изготовления технологически сложных деталей и уменьшения количества сборочных единиц активно внедряется технология 3D печати.

Применение технологии 3D печати подразумевает использование непосредственно 3D моделей, разработанных методами цифрового проектирования, минуя стадию разработки большого объема классической конструкторской и технологической документации по ЕСКД и ЕСТД, что может сократить сроки и стоимость разработки, изготовления и испытания изделий. Однако при этом в ходе цифрового проектирования каждой детали и изделия в целом необходимо на стадии выпуска их 3D моделей проводить многопараметрическую верификацию и оптимизацию как с позиций массогабаритных характеристик, соответствия техническим параметрам, прочности, долговечности, стойкости к внешним воздействиям, так и с точки зрения аддитивности технологии 3D печати.

Постановка задачи и методы исследования

Задачами нашего исследования являются повышение эффективности компрессоров, снижение капитальных и эксплуатационных расходов.

Для повышения эффективности применяемого парка компрессорного оборудования необходимо тщательно исследовать и внедрять во все элементы компрессорной системы конструктивные мероприятия, обеспечивающие снижение капитальных и эксплуатационных расходов.

К способам снижения капитальных затрат, помимо повышения эффективности приводов (электрического, газотурбинного, дизельного и т. п.), относится снижение стоимости изготовления и применяемых материалов без

ухудшения эксплуатационных характеристик оборудования.

Для снижения стоимости изделий во многих отраслях промышленности вместо деталей из металлов могут применяться детали из полимерных и композиционных материалов, которые обладают достаточными механическими свойствами, не подвержены коррозии, имеют меньшую массу и низкую себестоимость.

Исследование ведется с помощью численного метода и параметрического анализа.

В мировом опыте турбокомпрессоростроения можно отметить внедрение и использование метода 3D печати применительно как к отдельным частям, так и к компрессору целиком.

Например, в 2015 году компания GE Aviation внедрила в авиационные двигатели такие детали, созданные методом 3D печати, как корпус температурного датчика на входе в компрессор и топливную форсунку. При одинаковой прочности оригинала и модели, выполненной на 3D принтере, последняя оказалась на 25 % легче [1].

В том же году в Австралии на 3D принтере был напечатан первый в мире действующий реактивный двигатель [2].

Немногом позже миниатюрный турбореактивный двигатель был напечатан компанией GE Aviation и представляет собой модифицированную версию силового агрегата, который используется в радиоуправляемых моделях самолетов [3].

В 2017 году компания GE Aviation создала первый в истории коммерческий авиационный двигатель, который более чем на треть состоит из компонентов, напечатанных на 3D принтере. Инженерам удалось снизить количество отдельных деталей с 855 до 12 штук. Данный двигатель был разработан специально для пассажирского одномоторного самолета бизнес-класса. Использование такого двигателя уменьшает вес самолета на 5 %, что, в свою очередь, уменьшает расход топлива при сохранении той же скорости [4].



Рис. 1. Пример выполнения на 3D принтере рабочего колеса центробежного компрессора

Fig. 1. A sample run on a 3D printer impeller centrifugal compressor

На отечественных предприятиях авиастроения изучаются вопросы аддитивных технологий изготовления ответственных технологически сложных деталей (рабочие колеса турбонасосных агрегатов, камеры сгорания [5], детали газотурбинного двигателя [6, 7]); в качестве материалов используются как нержавеющая и жаростойкая сталь, так и титан.

Таким образом, можно отметить успешное использование 3D печати отдельных деталей и узлов в авиации и турбостроении. Подобную технологию целесообразно внедрять в такой обширной отрасли, как компрессоростроение.

АО «Компрессор», лидер отечественного компрессоростроения, проектирует и производит большую номенклатуру блочного компрессорного и газового оборудования, поршневые и винтовые компрессоры, установки подготовки топливного, пускового и импульсного газа. Оборудование установлено и надежно работает на всех надводных кораблях и подводных лодках ВМФ, а также компрессорных станциях магистральных газопроводов «Ухта – Торжок», СМГ «Бованенково – Ухта», Северо-Европейского газопровода, Южного потока.

Предприятие выпускает широкий ассортимент серийной продукции:

компрессоры (роторные, поршневые, мембранные) и компрессорные станции с конечным давлением от 0,2 до 42,0 МПа для сжатия различных газов (воздух, азот, кислород, водород, CO₂, аргон, природный газ и т. д.);

блочные дожимные компрессорные станции;
блочные воздушные компрессорные станции;

холодильные установки и компрессоры.

Одна из актуальных областей применения машин объемного вытеснения с вращающимися рабочими органами, в частности роторных нагнетателей, – получение сжатого газа низкого давления и перекачка различных газов в пищевой, металлургической, атомной и химической промышленности, на пневматическом транспорте, при нагнетании воздуха в печи и для многих других целей [8].

Модель исследования

Сфера применения нагнетателей – там, где требуется низкое выходное давление и большая производительность. Наиболее распространенный из существующих тип нагнетателя низкого давления – нагнетатель типа Рутс (Roots).

В частности, роторный нагнетатель Рутс (Roots) используется для подачи безмасляного воздуха в атомной, электронной и пищевой промышленности.

Принцип действия нагнетателя типа Рутс: два идентичных ротора, снабженных, как правило, двумя или тремя зубьями, имеющими специальный профиль, синхронно вращаются в нагнетательной полости; при вращении они захватывают входящий поток газа из всасывающего патрубка, постепенно изолируют его в полостях между зубьями, сжимают и перемещают к нагнетательному патрубку, а затем выталкивают через выходное отверстие.

Оси вращения роторов параллельны, а их движение связано посредством синхронизо-

ванной зубчатой передачи с одинаковым количеством зубьев обеих колес. Синхронизованная зубчатая передача обеспечивает бесконтактное управление роторами, роторы вращаются друг против друга, при этом они не соприкасаются ни между собой, ни с корпусом, что обеспечивает отсутствие необходимости в смазке внешних поверхностей зубьев самих роторов. Смазываются только шестерни и подшипники, находящиеся в отдельном смазочном блоке.

Для роторных нагнетателей необходимо иметь зазоры между зубьями роторов при работе по возможности минимальными, чтобы утечка воздуха через них была наименьшей. Для получения наименьшего эксплуатационного зазора между расточкой корпуса и роторами применяют заливку вершин зубьев мягким легкоистирающимся металлом [9]. В то же время должно быть обеспечено отсутствие соприкосновения зубьев роторов друг с другом. Факторами, которые при работе нагнетателя влияют на величину зазоров между роторами, являются:

- тепловое расширение роторов;
- зазоры между зубьями шестерен связи, возрастающие по мере износа последних;
- деформация зубьев роторов от воздействия центробежных сил и давления нагнетаемого воздуха;
- прогибы валов;
- закручивание валов.

Температурное расширение зубьев роторов существенно для эффективной работы нагнетателя, так как в случае использования для изготовления корпуса и роторов материалов, имеющих различные коэффициенты линейного расширения [11], а также при охлаждении корпуса (например, при изготовлении роторов из алюминия, а корпуса из чугуна в результате охлаждения корпуса окружающим воздухом) может произойти заклинивание [12].

Известен также двухроторный компрессор, содержащий алюминиевый корпус с крышка-

ми подшипников, внутри которого расположены алюминиевые роторы. Недостатки такой конструкции — высокая стоимость изготовления и невысокая прочность*.

Известны различные способы изготовления рабочих колес нагнетателей типа «Рутс», но все они достаточно сложны и трудоемки, а получаемые такими способами рабочие колеса имеют большую металлоемкость и массу [13].

Одним из современных способов формирования объемных конструкций, позволяющим снизить затраты на материалы, уменьшить стоимость с сохранением механических свойств, является использование в конструкции элементов, выполненных методом 3D печати.

Методика исследования

В 2018 году АО «Компрессор» разработало и изготовило ротационный компрессор РК105/60 с зубчатыми роторами, выполненными на 3D принтере. На данное изобретение был получен патент**.

Роторы выполнены с внутренними полостями, образованными взаимопересекающимися продольными и поперечными ребрами, причем поперечные ребра расположены перпендикулярно к оси ротора или под углом к ней и с шагом не менее пяти толщин ребер, а внутренние полости, образованные продольными ребрами, имеют форму сектора цилиндра либо форму треугольной или шестигранной призмы.

Ребра и наружные стенки зубчатых роторов выполнены толщиной не менее 0,5 мм.

* Пат. на изобретение РФ № 2 307 262 МПК F04C 18/08, Двухроторный компрессор / Кондров А.Ю., Кистенев Г.В., Лернер Е.И. Номер заявки 2006113726/06. Дата подачи заявки: 21.04.2006. Опубликовано: 27.09.2007. Бюл. № 27.

** Пат. на изобретение РФ № 2 660 701 МПК F04C 18/12, Роторный нагнетатель / Кузнецов Л.Г., Кузнецов Ю.Л., Бураков А.В. Номер заявки 2017135119. Дата подачи заявки: 04.10.2017. Опубликовано: 09.07.2018. Бюл. № 19.

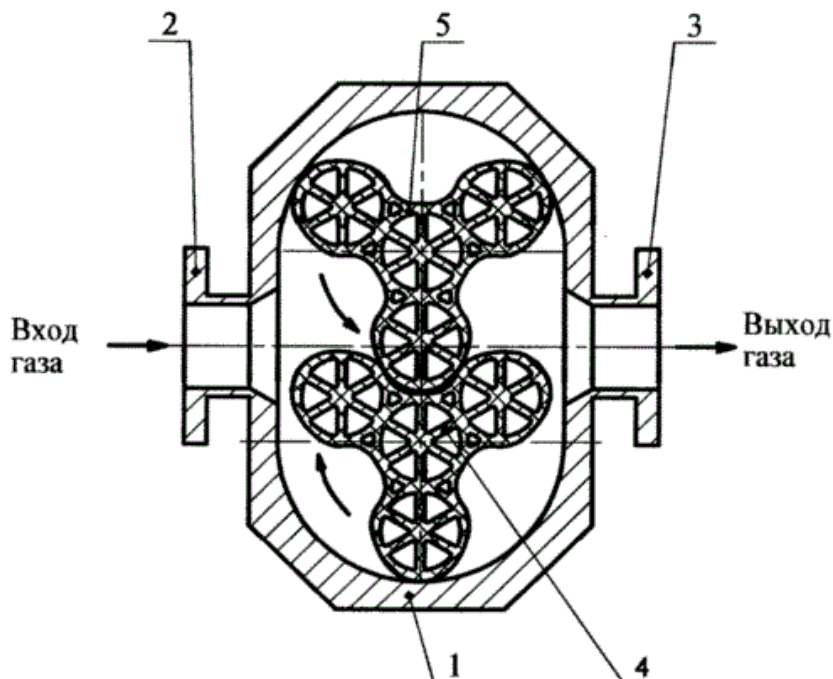


Рис. 2. Схема роторного нагнетателя компрессора РК105/60

Fig. 2. Rotary blower

Роторный нагнетатель (рис. 2) содержит корпус 1 с входным патрубком 2 и выходным патрубком 3. В корпусе 1 размещены ведущий ротор с тремя зубьями 4 и ведомый ротор с тремя зубьями 5. На роторах 4 и 5 установлены синхронизирующие зубчатые шестерни 6, а сами роторы 4 и 5 установлены в подшипниках 7. Синхронизирующие зубчатые шестерни 6 и подшипники 7 изолированы от полости сжатия газа и смазываются маслом. Роторы 4 и 5 имеют гарантированный зазор, не соприкасаются ни друг с другом, ни с корпусом, что обеспечивает отсутствие необходимости в смазке внешних поверхностей зубьев роторов.

Роторы 4, 5 выполнены с внутренними полостями 8, образованными по всей длине роторов взаимопересекающимися продольными 9 и поперечными 10 ребрами и наружными стенками 11. Роторы 4, 5 изготовлены методом трехмерной печати на 3D принтере.

Внутренние полости 8 (рис. 3), образованные продольными ребрами 9 (рис. 4), имеют

форму сектора цилиндра или форму треугольной призмы.

В другом варианте исполнения внутренние полости 8 (рис. 5), образованные продольными ребрами 9, имеют форму шестигранной призмы (иначе говоря, форму сот).

Взаимопересекающиеся продольные и поперечные ребра обеспечивают прочность ротора с зубьями при воздействии изгибающих нагрузок, скручивающих нагрузок, внешнего давления. Толщина ребер и внешней стенки ротора выбирается исходя из соображений технологичности и предотвращения потери устойчивости.

Ребра 9, 10 и внешние стенки 11 роторов выполнены толщиной не менее 0,5 мм.

Поперечные ребра выполнены перпендикулярно к оси ротора или под углом к ней и с шагом не менее пяти толщин ребер. Например, на рис. 5 показаны внутренние поперечные ребра 10 ротора, расположенные с шагом, равным десяти толщинам ребра.

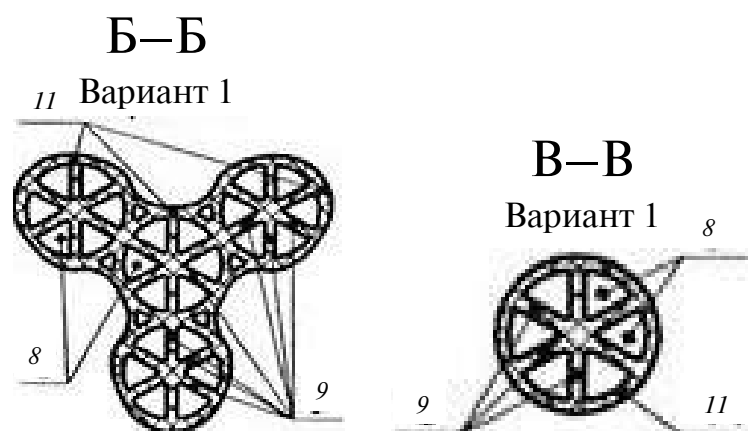


Рис. 3. Внутренние полости ротора в форме сектора цилиндра
Fig. 3. Internal cavities of a rotor in the form of a sector a cylinder

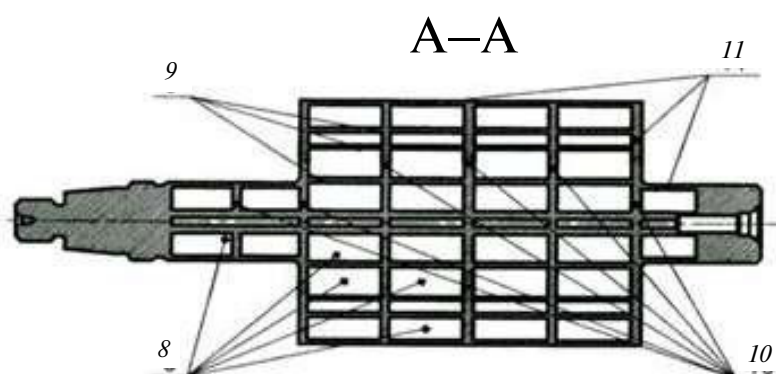


Рис. 4. Продольные ребра
Fig. 4. Longitudinal ribs

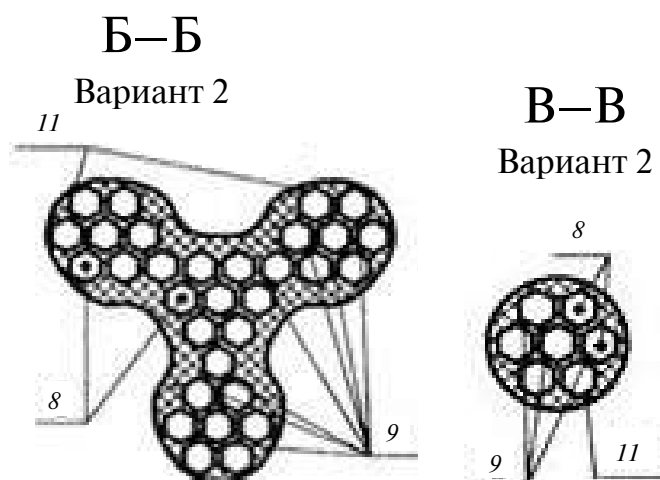


Рис. 5. Внутренние полости ротора в форме сот
Fig. 5. Internal cavities of a rotor in the form of honeycombs

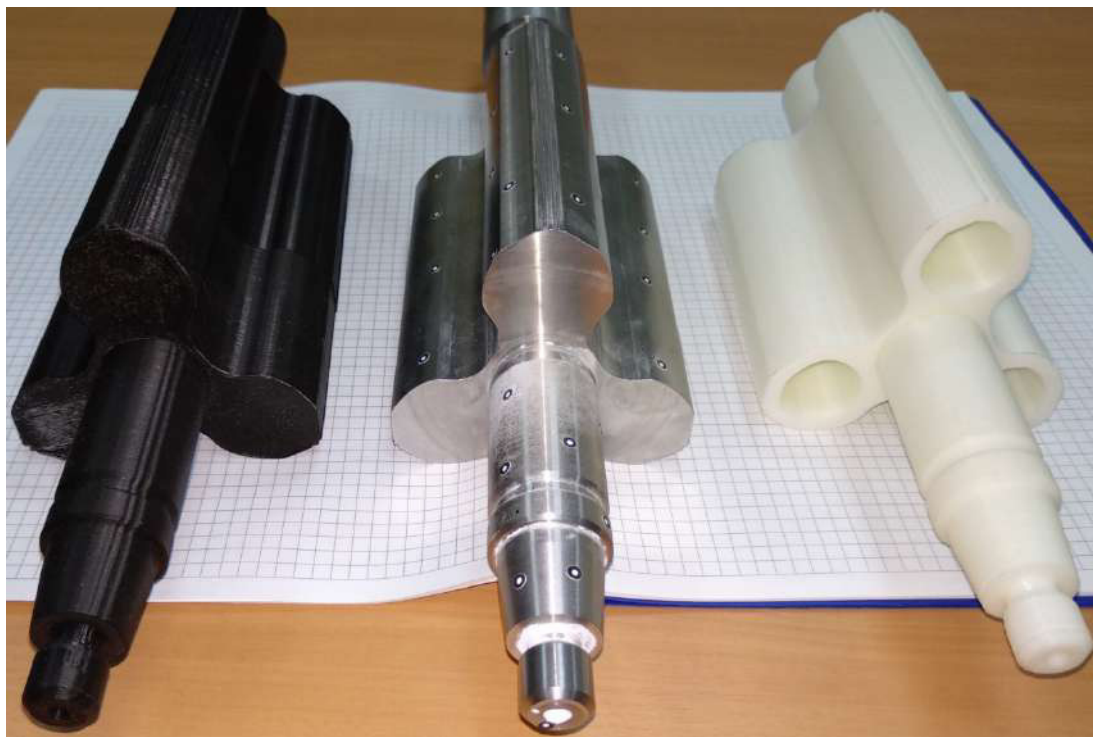


Рис. 6. Роторы, выполненные на 3D принтере (слева направо: полиамид, металл, АБС-пластик)
Fig. 6. Rotors made on a 3D printer (from left to right: polyamide, metal, ABS- plastic)

Нагнетатель работает следующим образом. Нагнетатель (см. рис. 2) приводится в действие вращением конца вала ведущего ротора 4, например от электродвигателя (не показан). Ведущий ротор с зубьями 4 вращается и через синхронизирующие шестерни 6, насаженные на роторы 4 и 5, передает вращение ведомому ротору 5. Роторы 4 и 5 синхронно вращаются. Роторы 4 и 5 снабжены идентичными зубьями, имеющими специальный профиль, гарантирующий минимальный зазор между роторами и корпусом 1. Частота вращения роторов может составлять от 500 до 6000 об/мин. Газ поступает на вход в корпус нагнетателя через патрубок 2. При вращении роторы 4 и 5 захватывают входящий поток газа из всасывающего патрубка 2, постепенно изолируют его в полостях между зубьями, сжимают, перемещают и выталкивают к нагнетательному патрубку 3. Действующие на ротор с зубьями при работе нагнетателя изгибающие силы воспринимаются продольными ребрами, скручивающие силы воспринимаются поперечными ребрами, силы от внешнего давления газа вос-

принимаются стенкой с развитым внутренним оребрением. Толщина ребер, их количество и схема расположения рассчитаны исходя из требуемых параметров нагнетателя.

За счет производства зубчатых роторов методом трехмерной печати на 3D принтерах достигается упрощение технологии изготовления.

Могут быть использованы следующие технологии трехмерной печати:

- моделирование методом наплавления;
- лазерная стереолитография;
- селективное лазерное спекание;
- электронно-лучевая плавка.

При выборе материала роторов имеют в виду следующие соображения: обеспечение надежной работы; наименьшую стоимость материала; наилучшие условия обработки; физические свойства сжимаемой среды.

Зубчатые роторы нагнетателя могут быть созданы из пластика, металла или иного материала, пригодного для трехмерной печати (см. рис. 6). Основным же материалом для изготовления роторов винтовых компрессоров служат



Рис. 7. Фото разреза ротора, выполненный на 3D принтере
Fig. 7. Photo of the rotor section made on a 3D printer

различные марки стали. Применяются, кроме того, чугун и пластмассы, а также специальные марки графитов для роторов, работающих в области высоких температур. При этом, даже если используемый материал печати имеет низкие механические свойства (как, например, у пластика), по расчету подбирают необходимый размер, количество и конфигурацию внутренних ребер. Из всех полимеров наиболее подходит по физическим свойствам полиамид П-66, который имеет наиболее высокую температуру плавления [14], что позволяет использовать его для изготовления деталей, устойчивых к высоким температурам. Разработана также конструкция ротора с пластиковым покрытием [15].

Основные результаты

Предложенное техническое решение позволяет обеспечить требуемые рабочие параметры нагнетателя при снижении массы его зубчатых роторов, низкую стоимость изготовления, избавиться от подгонки зубчатых роторов друг к другу, гарантировать стабильность размеров и параметров зубчатых роторов и их полную взаимозаменяемость.

За счет использования эффективного внутреннего оребрения взаимопересекающимися

продольными и поперечными ребрами обеспечивается прочность зубчатых роторов при воздействии изгибающих нагрузок, скручивающих нагрузок, внешнего давления, а также позволяет исключить возможность заклинивания роторов в корпусе благодаря точности предлагаемого метода изготовления роторов с заданными размерами и гарантированным зазором.

Заключение

Для изготовления зубчатых роторов могут применяться полимерные и композиционные материалы с самосмазывающимися свойствами, так как при уменьшении зазора, например при повышении температуры и линейном расширении деталей, происходит приработка полимерных деталей без заклинивания.

Помимо этого, масса роторов может быть снижена в 4–6 раз, что уменьшит массу всего компрессора на 5–15 %.

Таким образом, предложенное эффективное использование 3D печати для изготовления деталей может применяться не только в роторных нагнетателях низкого давления, но и при изготовлении других, более сложных элементов компрессорного оборудования, что позволит уменьшить эксплуатационные затраты и снизить стоимость компрессоров.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лав Радис.** GE Aviation получает сертификат FAA на первую 3D печатную часть реактивного двигателя. [Электр. ресурс]. URL: <https://3dprinting.com/news/ge-aviation-gets-faa-certification-for-first-3d-printed-jet-engine-part/> (дата обращения: 22.09.2018).
2. На 3D-принтере впервые напечатали реактивный двигатель. [Электр. ресурс] URL: <https://lenta.ru/news/2015/02/26/jetprinted/> (дата обращения: 22.09.2018).
3. В США реактивный двигатель «напечатали» на 3D-принтере. [Электр. ресурс] URL: https://www.dialog.ua/news/55451_1431709113 (дата обращения: 22.09.2018).
4. **Мэтью Ван Дюсен.** 3D-печатный самолетный двигатель GE будет запущен в этом году. [Электр. ресурс] URL: <https://www.ge.com/reports/mad-props-3d-printed-airplane-engine-will-run-year/> (дата обращения: 22.09.2018).
5. **Каминский Я.В., Левихин А.А.** Разработка камеры сгорания ЖРД малой тяги с применением аддитивных технологий // В сборнике: Молодежь. Техника. Космос труды X Общероссийской молодежной научно-технической конференции. Сер. «Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ». 2018. № 49. С. 218–222.
6. **Побемянский А.В., Мустейкис А.И., Галаджун А.А., Круглов Д.С.** Исследование возможности применения деталей из термостойких пластиков и их испытание в составе малоразмерного газотурбинного двигателя // Исследования наукограда. 2017. Т. 1. № 2 (20). С. 76–81.
7. **Андрюшкин А.Ю., Левихин А.А., Михеенков М.Ю., Мустейкис А.И.** Обеспечение заданного уровня свойств полученных послойным лазерным сплавлением деталей из жаропрочных никелевых сплавов // В сборнике: Инновационные технологии и технические средства специального назначения. Труды десятой общероссийской научно-практической конференции. 2018. С. 45–48.
8. **Хлумский В.** Ротационные компрессоры и вакуум-насосы. М.: Машиностроение, 1971. 127 с.
9. **Андреев П.А.** Винтовые компрессорные машины. М.: Судпромгиз, 1961. 251 с.
10. **Андрюшкин А.Ю., Левихин А.А., Преображенская М.А., Галаджун А.А.** Материаловедческие аспекты повышения прочностных свойств полученных послойным лазерным сплавлением деталей из жаропрочных никелевых сплавов // В сборнике: Инновационные технологии и технические средства специального назначения. Труды десятой общероссийской научно-практической конференции. 2018. С. 53–57.
11. Lutos Стандартные нагнетательные агрегаты с ротационным нагнетателем. [Электр. ресурс] URL: <http://www.lutos.cz/inc/getfile.php?file=44857f26e4d6b83ccc91c7368239d5ce5734f9cf> (дата обращения: 22.09.2018).
12. **Кац А.М.** Расчет, конструкция и испытание воздуходувок типа Рутс, М.: ГНТИ Машиностроительной литературы, 1946. 30 с.
13. **Андрюшкин А.Ю., Левихин А.А., Галинская О.О., Михайлов К.Н.** Точность размеров и шероховатость поверхностей полученных послойным лазерным сплавлением деталей из жаропрочных никелевых сплавов // В сборнике: Инновационные технологии и технические средства специального назначения. Труды десятой общероссийской научно-практической конференции. 2018. С. 48–53.
14. **Николаев А.Ф.** Технология пластических масс. М.: Химия, 1977. 367 с.
15. **Хисамеев И.Г., Максимов В.А.** Двухроторные винтовые и прямозубые компрессоры: теория, расчет и проектирование. М.: Фен, 2000. 638 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КУЗНЕЦОВ Леонид Григорьевич — доктор технических наук генеральный конструктор АО «Компрессор»

E-mail: office@compressor.spb.ru

КУЗНЕЦОВ Юрий Леонидович — кандидат технических наук заместитель генерального директора по науке АО «Компрессор»

E-mail: yuriy_spb@mail.ru

БУРАКОВ Александр Васильевич — начальник ЦКБ АО «Компрессор»

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

КУДЛА Наталия Александровна — ведущий инженер АО НПО «Компрессор»

E-mail: graf_fi@rambler.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 21.01.2019

REFERENCES

- [1] **Lav Radis.** GE Aviation poluchaet sertifikat FAA na pervuyu 3D pechatnuyu chast' reaktivnogo dvigatelya. [Elektr. resurs]. URL: <https://3dprinting.com/news/ge-aviation-gets-faa-certification-for-first-3d-printed-jet-engine-part/> (data obrashcheniya: 22.09.2018). (rus.)
- [2] Na 3D-printere vperve napechatali reaktivnyy dvigatel'. [Elektr. resurs] URL: <https://lenta.ru/news/2015/02/26/jetprinted/> (data obrashcheniya: 22.09.2018). (rus.)
- [3] V SSA reaktivnyy dvigatel' «napechatali» na 3D-printere. [Elektr. resurs] URL: https://www.dialog.ua/news/55451_1431709113 (data obrashcheniya: 22.09.2018). (rus.)
- [4] **Meht'yu Van Dyusen.** 3D-pechatnyy samoletnyy dvigatel' GE budet zapushchen v ehtom godu. [Elektr. resurs] URL: <https://www.ge.com/reports/mad-props-3d-printed-airplane-engine-will-run-year/> (data obrashcheniya: 22.09.2018). (rus.)
- [5] **Kaminskiy Ya.V., Levikhin A.A.** Razrabotka kamery sgoraniya ZHRD maloy tyagi s primeneniem additivnykh tekhnologiy // V sbornike: Molodezh'. Tekhnika. Kosmos trudy X Obshcherossiyskoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Ser. «Biblioteka zhurnala «Voenmekh. Vestnik BGU». 2018. № 49. S. 218–222. (rus.)
- [6] **Pobelyanskiy A.V., Musteykis A.I., Galadzhun A.A., Kruglov D.S.** Issledovanie vozmozhnosti primeneniya detaley iz termostoykikh plastikov i ikh ispytanie v sostave malorazmernogo gazoturbinnogo dvigatelya. *Issledovaniya naukograda*. 2017. T. 1. № 2 (20). S. 76–81. (rus.)
- [7] **Andryushkin A.Yu., Levikhin A.A., Mikheenkoy M.Yu., Musteykis A.I.** Obespechenie zadannogo urovnya svoystv poluchennykh posloynym lazernym splavleniem detaley iz zharoprochnykh nikelovykh splavov. *V sbornike: Innovatsionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva spetsial'nogo naznacheniya. Trudy desyatoy obshcherossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2018. S. 45–48. (rus.)
- [8] **Khilumskiy V.** Rotatsionnye kompressory i vakuum-nasosy. M.: Mashinostroenie, 1971. 127 s. (rus.)
- [9] **Andreev P.A.** Vintovye kompressornye mashiny. M.: Sudpromgiz, 1961. 251 s. (rus.)
- [10] **Andryushkin A.Yu., Levikhin A.A., Preobrazhenskaya M.A., Galadzhun A.A.** Materialovedcheskie aspekty povysheniya prochnostnykh svoystv poluchennykh posloynym lazernym splavleniem detaley iz zharoprochnykh nikelovykh splavov. *V sbornike: Innovatsionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva spetsial'nogo naznacheniya. Trudy desyatoy obshcherossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2018. S. 53–57. (rus.)
- [11] Lutos. Standartnye magnetatelnnye agregaty s rotatsionnym magnetatelem. [Elektr. resurs] URL: <http://www.lutos.cz/inc/getfile.php?file=44857f26e4d6b83ccc91c7368239d5ce5734f9cf> (data obrashcheniya: 22.09.2018).
- [12] **Kats A.M.** Raschet, konstruktsiya i ispytanie vozdukhoduvok tipa Ruts, M.: GNTI Mashinostroi-tel'noy literatury, 1946. 30 s. (rus.)
- [13] **Andryushkin A.Yu., Levikhin A.A., Galinskaya O.O., Mikhaylov K.N.** Tochnost' razmerov i sherokhovatost' poverkhnostey poluchennykh posloynym lazernym splavleniem detaley iz zharoprochnykh nikelovykh splavov. *V sbornike: Innovatsionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva spetsial'nogo naznacheniya. Trudy desyatoy obshcherossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2018. S. 48–53. (rus.)
- [14] **Nikolaev A.F.** Tekhnologiya plasticheskikh mass. M.: Khimiya, 1977. 367 s. (rus.)
- [15] **Khisameev I.G., Maksimov V.A.** Dvukhrotornyye vintovye i pryamozubyie kompressory: teoriya, raschet i proektirovanie. M.: Fen, 2000. 638 s. (rus.)

THE AUTHORS

KUZNETSOV Leonid G. — JSC «Compressor»

E-mail: office@compressor.spb.ru

KUZNETSOV Yuri L. — JSC «Compressor»

E-mail: yuriy_spb@mail.ru

BURAKOV Aleksandr V. — JSC «Compressor»

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

KUDLA Nataliia A. — JSC SPA «Compressor»

E-mail: graf_fi@rambler.ru

Received: 21.01.2019

DOI: 10.18721/JEST.25111
УДК 621.01

В. Чжао, В.Л. Жавнер, А.Б. Смирнов, Ч. Янь

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

ПРИМЕНЕНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРОВ С ВОЗВРАТНЫМИ ПРУЖИНАМИ В МЕХАТРОННЫХ РЕКУПЕРАТИВНЫХ ПРИВОДАХ

Рассмотрены вопросы использования пневматических двигателей в пружинных приводах для компенсации диссипативных потерь и фиксации привода в крайних положениях пружинных аккумуляторов. Выделен класс задач, для которых при создании пружинных рекуперативных приводов используются только пневматические цилиндры с возвратными пружинами. Рассмотрены примеры использования таких приводов в фасовочно-упаковочном оборудовании. Предложено применять пневматические приводы с возвратными пружинами в мехатронных приводах, построенных на базе линейных пружинных аккумуляторов с двумя пружинами. Рассмотрены алгоритмы компенсации диссипативных потерь в мехатронных приводах. Для каждого типоразмера пневматического цилиндра определены максимальные значения масс, которые могут быть перемещены такими мехатронными приводами. Дано описание схемы дозатора сыпучих продуктов, у которого обеспечена простота его разборки и сборки для санитарно-гигиенической обработки. Предложено использовать пневматические цилиндры с возвратными пружинами в мехатронных приводах с рекуперацией энергии на базе нелинейных пружинных аккумуляторов. Приведены зависимости для определения диссипативных потерь.

Ключевые слова: пружинный привод, диссипативные потери, рекуперация энергии, пневматические цилиндры, дозаторы, упаковочные материалы.

Ссылка при цитировании:

В. Чжао, В.Л. Жавнер, А.Б. Смирнов, Ч. Янь. Применение пневматических цилиндров с возвратными пружинами в мехатронных рекуперативных приводах // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 111–123. DOI: 10.18721/JEST.25111.

Wen Zhao, V.L. Zhavner, A.B. Smirnov, Chuanchao Yan

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university. St. Petersburg, Russia

APPLICATION OF PNEUMATIC SPRING-RETURN CYLINDERS IN MECHATRONIC DRIVES WITH ENERGY RECOVERY

We have considered the questions of using pneumatic motors in spring drives for compensating for dissipative losses, fixing the drive in extreme positions of spring batteries. A class of problems has been identified in which spring drives with energy recovery are created using only pneumatic cylinders with return

springs. Examples of using such drives in filling and packaging equipment have been considered. We have proposed to make pneumatic actuators with return springs in mechatronic drives constructed on the basis of linear spring accumulators with two springs. We have considered algorithms for compensation of dissipative losses in mechatronic drives. The maximum values of the mass which can be mixed by such mechatronic drives for each size of pneumatic cylinder have been determined. We have described a scheme for a dispenser of bulk products which is easy to disassemble and assemble for sanitary and hygienic processing. It is proposed to use pneumatic cylinders with return springs in mechatronic drives with energy recovery based on nonlinear spring batteries. Dependences for determining dissipative losses have been given.

Keywords: spring drive, dissipative losses, energy recovery, pneumatic cylinders, dispensers, packaging materials.

Citation:

Wen Zhao, V.L. Zhavner, A.B. Smirnov, Chuanchao Yan, Application of pneumatic engines for compensation of dissipative losses in spring wires with recovery of energy, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 111–123, DOI: 10.18721/JEST.25111.

Введение

В задачах возвратно-поступательного перемещения объектов с управляемым выстоем в крайних положениях уменьшение затрат энергии достигается за счет использования мехатронных пружинных приводов с рекуперацией энергии [1–3]. Затраты энергии могут быть снижены в несколько раз [4, 5]. Традиционно пружинный привод содержит линейный или нелинейный пружинный аккумулятор, систему управления, управляемые фиксаторы и двигатель для компенсации диссипативных потерь [6, 7]. В гидравлических приводах отпадает необходимость использования управляемых фиксаторов, но такие приводы целесообразно применять для перемещения изделий с массами более 1000 кг при невысоком быстродействии. Использование электродвигателей для компенсации диссипативных потерь на всем протяжении перемещения ограничивается быстродействием, так как при высоком быстродействии возрастает мощность двигателя и требуются передачи с большим передаточным числом [1]. При высоком быстродействии предпочтительно применять пневматические цилиндры, обеспечивающие компенсацию диссипативных потерь, фиксацию выходного звена в крайних положениях и работу при технологических нагрузках [4].

Цель нашей работы — исследование пневматических двигателей в пружинных приводах для компенсации диссипативных потерь и фиксации привода в крайних положениях пружинных аккумуляторов.

В работе рассматриваются мехатронные приводы с рекуперацией энергии, построенные на базе пневматических цилиндров с возвратными пружинами [13–15]. Обычно такие цилиндры используются в приводах с односторонней нагрузкой.

В табл. 1 представлены характеристики пневматических цилиндров с возвратными пружинами итальянской фирмы Pnevmax.

Методы исследования

Объектом исследования являются пневматические цилиндры с возвратными пружинами, применяемые в приводах с односторонней нагрузкой, где возвратные пружины обеспечивают перемещение рабочего органа в исходное положение. Поскольку в этих пневматических цилиндрах присутствуют элементы, необходимые и достаточные для реализации мехатронных пружинных приводов с рекуперацией энергии, то поставлена задача: выполнить анализ характеристик пневматических цилиндров и синтез мехатронных пружинных приводов с целью упростить их конструкции, повысить надежность и снизить затраты на проектирование.

Таблица 1
Характеристики пневматических цилиндров
с возвратными пружинами
итальянской фирмы Pnevmax

Table 1

Characteristics of pneumatic cylinders with return springs
of the Italian company Pnevmax

Диаметр поршня, мм	Характеристики цилиндров		
	F_n , Н	F_k , Н	c , Н/м
<i>Микроцилиндры серии ISO 6431-1260 (ход 0–40 мм)</i>			
ø 12	9,9	26,5	415
ø 16	10,8	22,6	295
ø 20	10,8	22,6	295
ø 25	7,9	49,1	1030
ø 32	19,7	53,0	832,5
ø 40	39,3	106,0	1667,5
ø 50	39,3	106,0	1667,5
<i>Микроцилиндры серии ISO 6431-1280 «MIR» (ход 0–50 мм)</i>			
ø 8	2,2	4,2	40
ø 10	2,2	4,2	40
ø 12	4,0	8,7	94
ø 16	7,5	21,0	270
ø 20	11,0	22,0	220
ø 25	16,5	30,7	284
ø 32	23,0	52,5	590
<i>Цилиндры серии ISO 15552-1319-20-21 (ход 0–50 мм)</i>			
ø 32	17,2	41,7	490
ø 40	24,6	83,4	1176
ø 50	51,0	114,8	1276
ø 63	51,0	114,8	1276
ø 80	98,1	194,2	1922
ø 100	98,1	194,2	1922
<i>Компактные цилиндры «Европа» (ход 0–25 мм)</i>			
ø 12	3,9	9,3	216
ø 16	4,4	17,7	532
ø 20	4,9	18,1	528
ø 25	9,8	25,5	628
ø 32	12,3	34,3	880
ø 40	16,7	44,1	1096
ø 50	27,5	51,0	940
ø 63	37,3	63,8	1060
ø 80	59,4	99,4	1600
ø 100	101,3	141,9	1624

Примечание: F_n — начальное усилие, при вытянутом штоке; F_k — максимальное усилие, при втянутом штоке пружине; c — жесткость пружины.

Построение пружинных приводов с рекуперацией энергии возможно на основе линейного пружинного аккумулятора с двумя пружинами, схема которого представлена на рис. 1.

Без учета диссипативных потерь рассматриваемый пружинный привод представляет собой консервативный линейный осциллятор с частотой колебания, не зависящей от амплитуды, поэтому к нему применимы все зависимости, используемые для линейных осцилляторов [5, 7]. Такая конфигурация привода позволяет программным способом организовать в соответствии с теоремой Эри любой возможный вариант включения пневматических цилиндров в работу для компенсации диссипативных потерь, а именно:

в начале хода;

на всем перемещении рабочего органа;

в начале и в конце хода (в середине же хода полости цилиндров соединяются с атмосферой);

включение соответствующего пневматического цилиндра только в конце хода.

На рис. 2 представлено графическое изображение теоремы Эри.

Так как теорема была сформулирована голландским математиком Эри при исследовании часовых механизмов, то в эпоху чистой механики конструктивно проще было подавать компенсационное воздействие при прохождении среднего положения, в начале или конце хода. В случае конструктивных решений с нелинейными пружинными аккумуляторами подача компенсационного импульса в среднем положении выходного звена невозможна. Однако мехатронные принципы проектирования позволяют выполнить компенсацию диссипативных потерь по любому закону, если это не противоречит возможным конструктивным ограничениям, например при использовании нелинейных пружинных аккумуляторов [4].

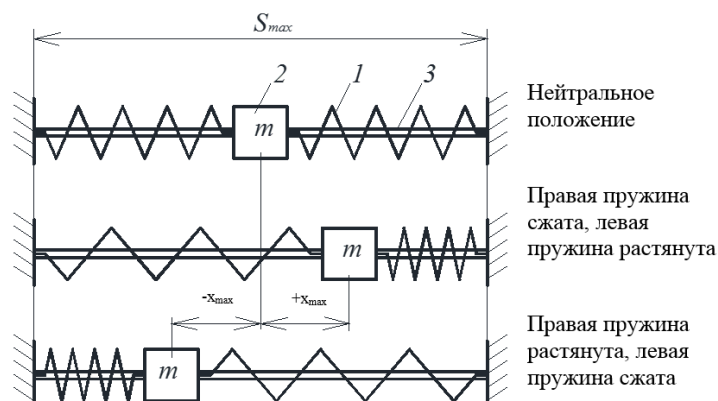


Рис. 1. Схема линейного пружинного аккумулятора с двумя пружинами сжатия
Fig. 1. Diagram of a linear spring battery with two compression springs

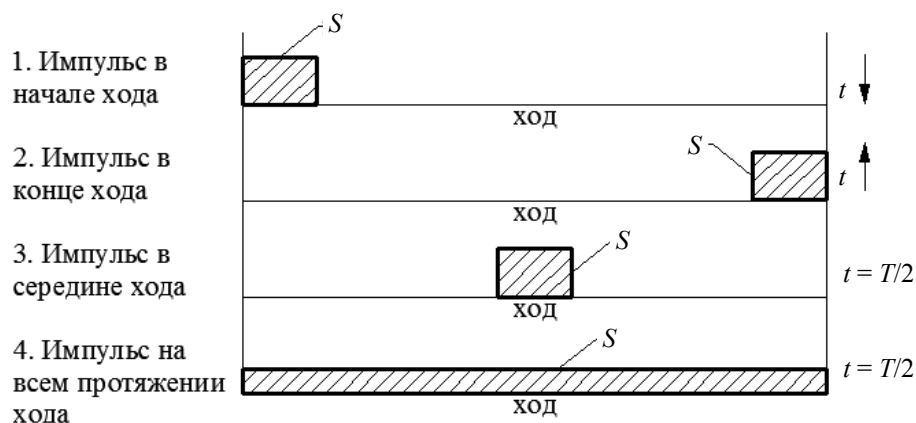


Рис. 2. Графическое изображение теоремы Эри
Fig. 2. Graphic representation of the Erie theorem

Определим область применения представленных в табл. 1 пневматических цилиндров с возвратными пружинами в мехатронных рекуперативных приводах, построенных с использованием схемы линейного пружинного аккумулятора с двумя пружинами.

Для линейного пружинного аккумулятора с двумя пружинами без учета диссипативных потерь время перемещения рабочего органа из одного крайнего положения в другое определяется выражением

$$t = \pi \sqrt{m / 2c}. \quad (1)$$

Для пружинного аккумулятора при использовании пневматических цилиндров с возвратными пружинами величина предвари-

тельного сжатия определяется следующим выражением:

$$L_{\min} = F_n / c = h. \quad (2)$$

Тогда минимальная потенциальная энергия пружины равна

$$\Pi_{\min} = 0,5 F_n^2 / c. \quad (3)$$

Максимальная потенциальная энергия пружины равна

$$\Pi_{\max} = 0,5c(S + L_{\min})^2. \quad (4)$$

Введем понятие эффективной потенциальной энергии $\Pi_{\text{эф}}$, равной разности максимальной и минимальной потенциальных энергий:

$$\Pi_{\text{эф}} = \Pi_{\max} - \Pi_{\min} = 0,5c(S^2 + SL_{\min}). \quad (5)$$

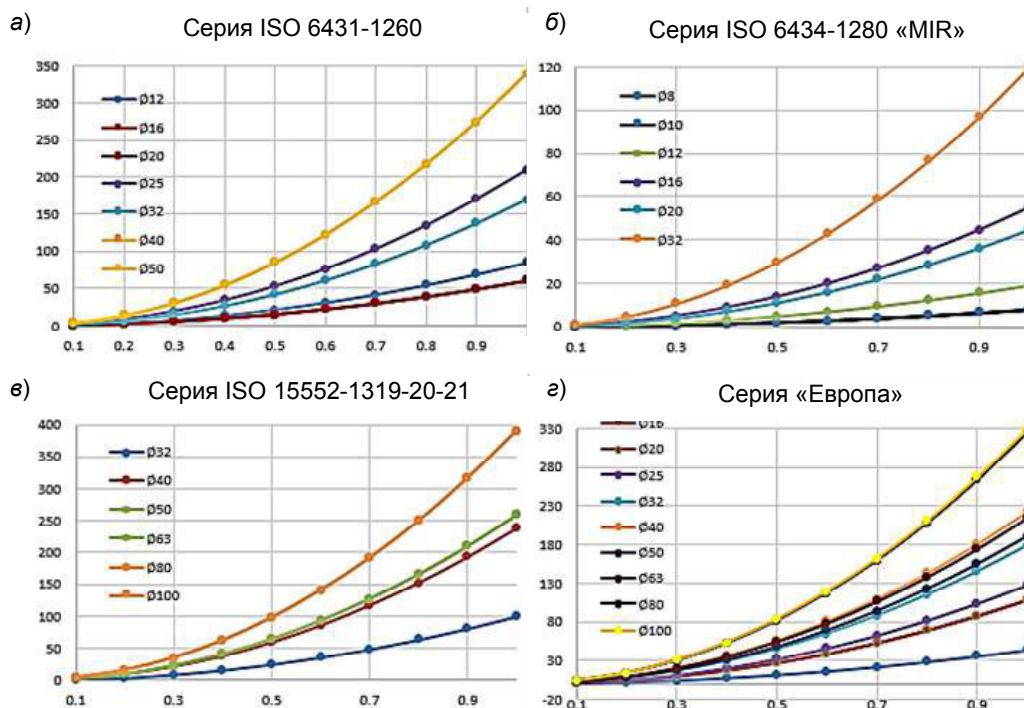


Рис. 3. Графики изменения максимальной массы перемещаемой нагрузки m от заданного времени перемещения t для пневмоцилиндров разных серий

Fig. 3. Graphs of changes in the mass of the load m from a given time of movement t

Она позволяет определить максимальную скорость каретки в среднем положении:

$$\dot{x}_{\max} = \sqrt{2P_{\text{эф}} / m}. \quad (6)$$

Из уравнения (1) можно определить максимальную массу, в зависимости от заданного времени перемещения t .

На рис. 3 представлены зависимости максимальной массы m нагрузки, которую можно переместить от заданного времени перемещения t .

Мехатронный привод с рекуперацией энергии, разработанный на кафедре автоматов Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, построенный с применением таких цилиндров и реализованный по схеме линейного пружинного аккумулятора с двумя пружинами (см. рис. 1), рассматривается на примере привода шибера дозатора. Схема последнего представлена на рис. 4.

Из соображений удобства ежедневной санитарно-гигиенической обработки дозатора применены два пневматических цилиндра с возвратными пружинами. Шибер расположен между штоками цилиндров, и не требуется соединительных элементов между штоками и шибером. Для подключения бесштоковых полостей к источнику сжатого воздуха с целью компенсации диссипативных потерь или фиксации рабочего органа в крайних положениях используется распределитель 5/3, у которого в нейтральном положении полости пневматических цилиндров соединены с атмосферой. В дозаторе используются пневматические цилиндры фирмы Пневмакс (Италия) с диаметром поршня 16 мм, ходом штока 25 мм и жесткостью пружины 295 Н/м (см. табл. 1). При массе шибера 0,7 кг время перемещения t из одного крайнего положения в другое равно 0,11 с. При использовании компактного цилиндра «Европа» с таким же диаметром поршня и с жесткостью

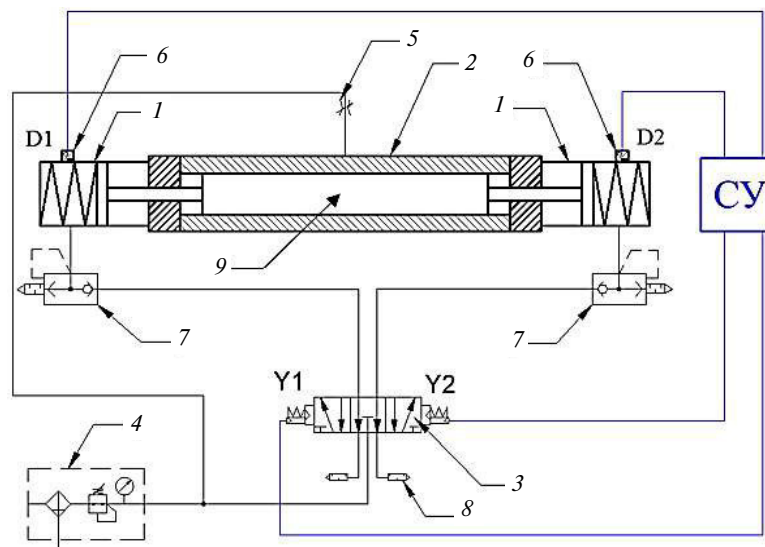


Рис. 4. Мехатронный привод шиберного дозатора:

1 – пневматические цилиндры с возвратными пружинами; 2 – корпус дозатора; 3 – пневматический распределитель 5/3; 4 – блок подготовки воздуха; 5 – регулируемые дроссели; 6 – датчики положения; 7 – клапан быстрого выхлопа; 8 – глушитель; 9 – шибер

Fig. 4. Mechatronic drive of the gate dosing^

1 – pneumatic cylinders with return springs; 2 – body of dosing; 3 – pneumatic distributor 5/3; 4 – air preparation unit; 5 – adjustable throttles; 6 – position sensors; 7 – quick exhaust valve; 8 – silencer; 9 – gate

пружины 532 Н/м (см. табл. 1) время t составит 0,09 с. Особенностью разработанного привода является режим работы с нулевой скоростью при позиционировании в крайних положениях. Однако следует отметить увеличенный габарит привода вдоль рабочих движений шиберов, который зависит от линейных размеров шиберов, использования двух цилиндров и обусловлен необходимостью периодической санитарно-гигиенической обработки дозатора.

Рассмотрим возможность применения пневматических цилиндров с возвратными пружинами в мехатронных пружинных рекуперативных приводах, построенных на базе нелинейного пружинного аккумулятора [5].

Схема нелинейного пружинного аккумулятора приведена на рис. 5.

В работе [5] показано, что пружинный аккумулятор превращается в линейный гармонический осциллятор и время движения из одного крайнего положения в другое опреде-

ляется уравнением (1), если выполняется следующее соотношение между характеристиками пружинного аккумулятора:

$$h = mg / c = F_n / c, \quad (7)$$

где h – конструктивный размер, равный минимальному расстоянию между осями шарнирных соединений пружинного аккумулятора.

Масса ползуна в этом случае должна быть равна

$$m = F_n / g. \quad (8)$$

Время перемещения равно [5]

$$t = \sqrt{h}. \quad (9)$$

Максимальное отклонение каретки от среднего положения $x_{\max}$ определяется следующим выражением:

$$x_{\max} = \sqrt{s^2 + 2hs}, \quad (10)$$

где s – ход цилиндра.

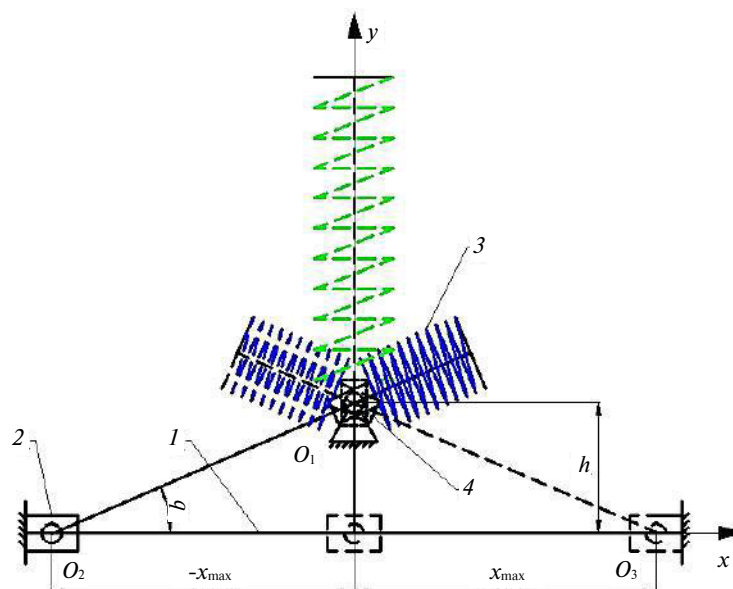


Рис. 5. Нелинейный пружинный аккумулятор с поступательной парой на базе пружины сжатия:

1 – направляющая; 2 – каретка (ползун); 3 – пружина; 4 – боковые шарниры

Fig. 5. Non-linear spring battery with a forward pair on the base of the compression spring:

1 – guideway; 2 – carriage (slider); 3 – spring; 4 – side hinges

При таких характеристиках привода на всем протяжении перемещения каретки суммарная нагрузка на направляющую равна нулю.

В табл. 2 представлены параметры пружинного привода с разгрузкой направляющих от массы каретки,

При использовании стандартных присоединительных элементов получаемые размеры h отличаются от значений, представленных в табл. 2, и приведены в табл. 3 для пневматических цилиндров с диаметрами поршня от 8 до 100 мм.

В этом случае время t можно получить в соответствии с работой [9] из решения следующего уравнения

$$t = \sqrt{m/2} \int_{-x_{\max}}^{x_{\max}} \frac{dx}{\sqrt{\Pi_{\max} - \Pi_T}}, \quad (11)$$

где P_T — текущее значение потенциальной энергии, определяемой координатой x .

После преобразований уравнение (11) принимает следующий вид:

$$t = \sqrt{m / c K_{th}}. \quad (12)$$

Здесь K_{th} — безразмерный коэффициент, получаемый при решении интегрального уравнения

$$K_{th} = \sqrt{m/c} \int_{-1}^1 \frac{d\bar{x}}{\sqrt{\left(\sqrt{1+\bar{h}^2} - \bar{h}\right)^2 - \left(\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{h}^2} - \bar{h}\right)^2}}, \quad (13)$$

где $\bar{h} = h / x_{\max}$, $\bar{x} = x / x_{\max}$.

В табл. 4 приведены численные значения коэффициента k_{th} в зависимости от $\bar{h}$.

Второй пример использования рассматриваемых пневматических цилиндров с возвратными пружинами — привод протягивания упаковочного материала в фасовочно-упаковочных автоматах, представленный на рис. 6.

Таблица 2

Параметры пружинного привода с разгрузкой направляющих при максимальной массе каретки

Table 2

Parameters of the spring drive with unloading guideways with the maximum mass of the carriage

Диаметр поршня, мм	h , м	t , с	$2x_{\max}$, мм
<i>Микроцилиндры серии ISO 6431-1260 (ход 0–40 мм)</i>			
12	0,024	0,154	118
16	0,037	0,191	135
20	0,037	0,191	135
25	0,008	0,088	94
32	0,024	0,154	118
40	0,024	0,154	118
50	0,024	0,154	118
<i>Микроцилиндры серии ISO 6431-1280 «MIR» (ход 0–50 мм)</i>			
8	0,055	0,235	179
10	0,055	0,235	179
12	0,043	0,206	164
16	0,028	0,167	145
20	0,050	0,224	173
25	0,058	0,241	182
32	0,039	0,197	160
<i>Цилиндры серии ISO 15552-1319-20-21 (ход 0–50 мм)</i>			
32	0,035	0,187	155
40	0,021	0,145	136
50	0,040	0,200	161
63	0,040	0,200	161
80	0,051	0,226	174
100	0,051	0,226	174
<i>Компактные цилиндры «Европа» (ход 0–25 мм)</i>			
12	0,018	0,134	78
16	0,008	0,091	64
20	0,009	0,096	66
25	0,016	0,125	75
32	0,014	0,118	73
40	0,015	0,123	74
50	0,029	0,171	91
63	0,035	0,188	98
80	0,037	0,193	100
100	0,062	0,250	122

Таблица 3

Значение h при стандартных присоединительных элементах

Table 3

h value with standard connections

Диаметр поршня, мм	$h_{\min}$, м	$2x_{\max}$, мм	K_{th}
8	46	145	5,024
10	46	145	5,024
12	51	150	5,215
16	51	150	5,215
20	60	160	5,215
25	64	164	5,293
32	109	232	6,276
40	125	245	6,447
50	150	265	3,443

Пружинный привод состоит из пневматического цилиндра 1, снабженного пружиной сжатия 2, которая установлена в штоковой полости цилиндра 1. С помощью боковых шарниров 3 цилиндр закреплен на корпусе привода. Шток цилиндра 1 шарнирно соединен с направляющей 4. Привод снабжен пневматическим распределителем 5/3 (позиция 5). На пневматическом цилиндре 1 установлены датчики положения – герконы 6. При движении ползуна в любое из крайних положений пружина 2 сжимается.

Работа происходит следующим образом. Сигнал с контроллера поступает в распределитель 5, который переходит в крайнее левое положение. Воздух с распределителя подается в пневматический цилиндр 1, и начинается движение под действием усилия пружины и усилия, действующего на поршень цилиндра. При прохождении поршня цилиндра мимо датчика 6, в контроллер 7 поступает сигнал, в свою очередь подающий напряжение на электромагнитный вход распределителя 5, который переходит в нейтральное положение, и полости пневматического цилиндра соединяются с атмосферой. Дальнейшее движение каретки происходит только под действием усилия пружины 2. Так продолжается до тех пор, пока

Таблица 4

Численные значения коэффициента k_{th} в зависимости от $\bar{h}$

Table 4

Numerical values of the coefficient k_{th} depending on $\bar{h}$

$\bar{h}$	K_{th}	$\bar{h}$	K_{th}	$\bar{h}$	K_{th}	$\bar{h}$	K_{th}	$\bar{h}$	K_{th}
0	3,142	0,20	3,613	0,40	4,211	0,60	4,911	0,80	5,692
0,01	3,162	0,21	3,640	0,41	4,243	0,61	4,948	0,81	5,733
0,02	3,182	0,22	3,668	0,42	4,276	0,62	4,986	0,82	5,774
0,03	3,203	0,23	3,695	0,43	4,310	0,63	5,024	0,83	5,815
0,04	3,225	0,24	3,723	0,44	4,343	0,64	5,062	0,84	5,856
0,05	3,246	0,25	3,752	0,45	4,377	0,65	5,100	0,85	5,897
0,06	3,268	0,26	3,780	0,46	4,411	0,66	5,138	0,86	5,939
0,07	3,291	0,27	3,809	0,47	4,445	0,67	5,176	0,87	5,981
0,08	3,314	0,28	3,838	0,48	4,480	0,68	5,215	0,88	6,022
0,09	3,337	0,29	3,868	0,49	4,514	0,69	5,254	0,89	6,064
0,10	3,360	0,30	3,897	0,50	4,549	0,70	5,293	0,90	6,106
0,11	3,384	0,31	3,928	0,51	4,585	0,71	5,332	0,91	6,148
0,12	3,408	0,32	3,958	0,52	4,620	0,72	5,371	0,92	6,191
0,13	3,433	0,33	3,989	0,53	4,656	0,73	5,411	0,93	6,233
0,14	3,457	0,34	4,019	0,54	4,692	0,74	5,451	0,94	6,276
0,15	3,483	0,35	4,051	0,55	4,728	0,75	5,490	0,95	6,318
0,16	3,508	0,36	4,082	0,56	4,764	0,76	5,530	0,96	6,361
0,17	3,534	0,37	4,114	0,57	4,800	0,77	5,571	0,97	6,404
0,18	3,560	0,38	4,146	0,58	4,837	0,78	5,611	0,98	6,447
0,19	3,586	0,39	4,178	0,59	4,874	0,79	5,651	0,99	6,490

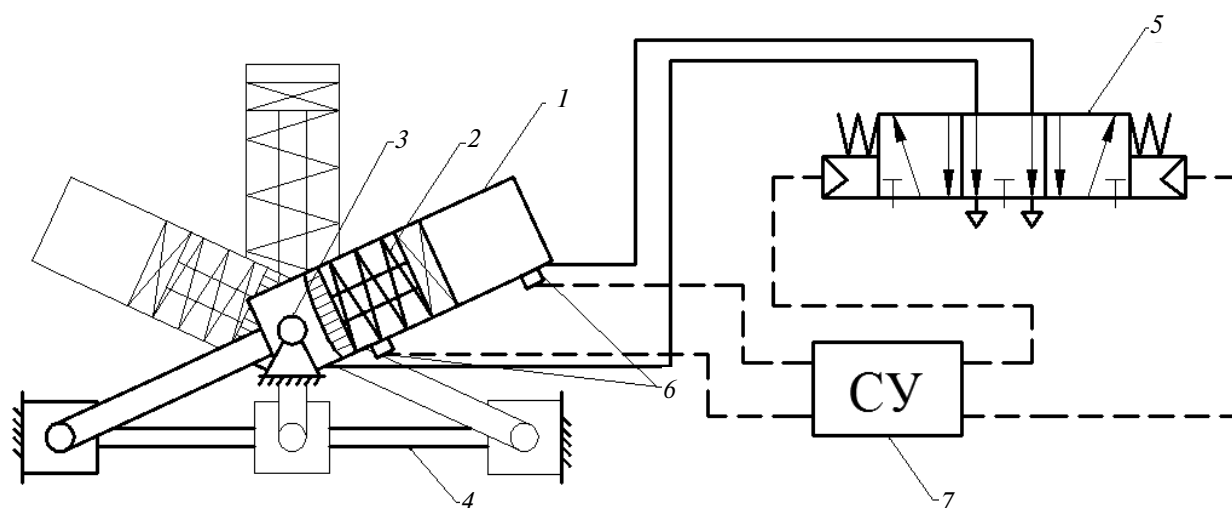


Рис. 6. Пружинный привод механизма протягивания упаковочного материала:

1 – пневматический цилиндр с пружиной сжатия; 2 – пружина сжатия; 3 – боковые шарниры;
4 – направляющая; 5 – пневматический распределитель 5/3; 6 – герконы; 7 – система управления

Fig. 6. Spring drive mechanism for pulling packaging material:

1 – pneumatic cylinder with compression spring; 2 – compression spring; 3 – side hinges; 4 – directing;
5 – pneumatic distributor 5/3; 6 – reed switches; 7 – exercise system

не возникнет конфигурация, когда пневматический цилиндр займет вертикальное положение; дальнейшее движение происходит под действием сил инерции, при этом начинает накапливаться потенциальная энергия в пружине 2. Когда каретка приближается к крайнему правому положению, срабатывает датчик положения 6 и распределитель переключается в крайнее правое положение; тогда в бесштоковую полость цилиндра подается воздух и происходит фиксация каретки в крайнем правом положении. Далее начинается движение в обратную сторону. Наличие пневматического распределителя 5 позволяет включать и выключать подачу сжатого воздуха в полости пневматического цилиндра 1 при различных конфигурациях привода, обеспечивая требуемые законы движения выходного звена. Фиксация каретки в крайних положениях обеспечивается тем, что усилие пружины в крайних положениях выходного звена меньше усилия пневматического цилиндра. Пружинный аккумулятор 2 является нелинейной колебательной системой с подвижной массой и с заданной амплитудой колебаний, в которой время перемещения из одного крайнего положения в другое зависит от жесткости пружины и конструктивных параметров.

Затраты энергии определяются только потерями на внутреннее трение в пружине, на трение в зацепах и направляющих, а также силами трения в пневматическом цилиндре.

Знание суммарных диссипативных потерь необходимо для определения компенсационных силовых импульсов в зависимости от принятого алгоритма подачи давления в полости пневматического цилиндра.

Потери энергии на преодоление силы сопротивления, определяемой внутренним трением в пружине, равны [4]

$$A_1 = \psi \Pi_{\text{эф}}. \quad (15)$$

Коэффициент рассеивания ψ можно принимать равным 0,1.

Вне зависимости от конструктивного исполнения привода

$$A_2 = \int_{-x_{\min}}^{x_{\max}} F_{\text{тр пр}}(x) dx, \quad (16)$$

где $F_{\text{тр пр}}$ — сила трения в шарнирных соединениях НПА, приведенная к ползуну.

Определим $F_{\text{тр пр}}$; для этого запишем уравнение мгновенных мощностей системы:

$$N_1 = N_2, \quad (17)$$

где N_1 — мгновенная мощность приведенной к ползуну силы трения в шарнирных соединениях пружины; N_2 — мгновенная мощность сил трения в шарнирных соединениях пружины.

Мгновенная мощность силы $F_{\text{тр пр}}$ трения пружины, приведенной к ползуну, определяется из выражения

$$N_1 = F_{\text{тр пр}} \dot{x}. \quad (18)$$

В соответствии с работой [4] мгновенная мощность сил трения в шарнирных соединениях пружины определяется из выражения

$$N_2 = 2F_{\text{пр}} f d / 2\dot{q}, \quad (19)$$

где $F_{\text{пр}}$ — текущее усилие пружины; f — коэффициент трения в шарнирных соединениях пружины; d — диаметр оси шарнирного соединения; $\dot{q}$ — угловая скорость поворота пружины относительно ползуна.

Приведенную к ползуну силу трения в шарнирных соединениях получим из совместного решения системы уравнений (18) и (19):

$$F_{\text{тр пр}} = F_{\text{пр}} f d \dot{q} / \dot{x}. \quad (20)$$

Найдем отношение $\dot{q} / \dot{x}$. В соответствии с рис. 5 имеем

$$\operatorname{tg} q = h / x. \quad (21)$$

Взяв производные от левой и правой частей уравнения (11), получим

$$(1 / \cos^2 q) \dot{q} = (h / x^2) \dot{x}, \quad (22)$$

или

$$\begin{aligned} \dot{q} / \dot{x} &= (h / x^2) \cos^2 q = \\ &= (h / x^2) (x^2 / (x^2 + h^2)) = h / (x^2 + h^2). \end{aligned} \quad (23)$$

Текущее усилие пружины $F_{\text{пр}}$ определяется из уравнения

$$F_{\text{пр}} = c(\sqrt{(x^2 + h^2)} - h). \quad (24)$$



Приведенная к каретке сила трения в шарнирных соединениях пружины определяется по формуле [4]

$$F_{\text{тр пр}} = cfd \frac{h}{x^2 + h^2} (\sqrt{x^2 + h^2} - h) = cfdh \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + h^2}} - \frac{h}{x^2 + h^2} \right). \quad (25)$$

Введем безразмерные параметры $\bar{h} = h / x_{\text{max}}$ и $\bar{x} = x / x_{\text{max}}$. Тогда уравнение (25) примет вид

$$F_{\text{тр пр}} = cfd\bar{h} \left(\frac{1}{\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{h}^2}} - \frac{\bar{h}}{\bar{x}^2 + \bar{h}^2} \right). \quad (26)$$

Работа, требуемая на преодоление сил трения в шарнирных соединениях, определяется следующим выражением:

$$A_2 = cfd\bar{h} \left(\int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{h}^2}} dx - \int_{-1}^1 \frac{\bar{h}}{\bar{x}^2 + \bar{h}^2} dx \right). \quad (27)$$

И после преобразований получим

$$A_2 = 2cfd\bar{h} \left(\ln \left(1 + \sqrt{1 + \bar{h}^2} \right) - \bar{h} \arctg \frac{1}{\bar{h}} - \ln \bar{h} \right). \quad (28)$$

Сила трения в направляющих определяет суммарной массой ползуна и рабочего органа и нагрузкой на направляющие от вертикальной составляющей усилия пружины. В общем виде она равна

$$F_{\text{тр}} = mgf - F_{\text{пр}} \sin \varphi. \quad (29)$$

Если параметры привода обеспечивают выполнение соотношения (7), то потери на трение в направляющих равны нулю.

Результаты исследования

Определены характеристики рабочих операций, которые могут быть получены при со-

здании мехатронных пружинных приводов с рекуперацией энергии, обеспечивающих благоприятные динамические режимы и снижающих в несколько раз энергетические затраты. Разработаны рекомендации по применению пневматических цилиндров с возвратными пружинами в мехатронных пружинных приводах, использующих нелинейные пружинные аккумуляторы; это позволяет уменьшить размеры привода в направлении движения рабочего органа и снизить нагрузки на направляющие. Даны расчетные формулы для определения диссипативных потерь. Показано, что при величине хода штока 40–50 мм выходное звено может перемещаться на расстояния более чем в 2 раза и более величины хода

Рассчитаны максимальные значения масс изделий, которые могут перемещаться только за счет пружин в рассматриваемых пневматических цилиндрах при времени перемещения в 1 с. Для цилиндров серий ISO 6431-1260 и ISO 15552-1319-20-21 максимальная масса может достигать 400 кг, а для цилиндров серий ISO 6431-1280 и «Европа» максимальная перемещаемая масса может достигать 200 кг.

Разработанный привод протягивания упаковочной ленты, использующий пневматический цилиндр с возвратной пружиной, уменьшает затраты энергии и обеспечивает благоприятные динамические режимы работы.

Полученные результаты использованы при разработке мехатронной пневматической системы приводов фасовочно-упаковочного автомата для сыпучих продуктов в диапазоне нагрузок от 0,5 до 5 г. Результатами могут воспользоваться разработчики энергосберегающего технологического оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корендяев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И. Теоретические основы робототехники: в 2 кн. М.: Наука, 2006. 376 с.
2. Жавнер В.Л., Мацко О.Н., Жавнер М.В. Рекуперативные приводы для цикловых переме-

- ний. Deutschland, Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2014. 90 с.

3. Жавнер В.Л., Мацко О.Н. Пружинные приводы с уравниванием для горизонтальных возвратно-поступательных перемещений // Вест-

ник научно-технического развития. 2016. № 5. С. 12–17.

4. **Жавнер В.Л., Мацко О.Н., Чжао Вэнь.** Пружинные приводы с рекуперацией энергии для цикловых перемещений с технологической нагрузкой // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и механики: IPDME_2018: Сборник тезисов. Санкт-Петербургский горный университет. СПб., 2018. С. 42

5. **Жавнер В.Л., Миничев А.В.** Повышение эффективности работы рекуперативных приводов // Неделя науки СПбГПУ. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2014. С. 8–10.

6. **Жавнер В.Л., Чжао Вэнь.** Дозирование сыпучих продуктов малыми дозами массой 0,2–5 грамм // Вестник международной академии холода. 2018. № 2. С. 34–41.

7. **Жавнер В.Л., Чжао Вэнь.** Применение пневматических двигателей для компенсации диссипативных потерь в пружинных приводах с рекуперацией энергии // Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития: Сборник научных трудов международной научно-технической конференции. Москва, 7–8 июня 2018 года. С. 307.

8. **Жавнер В.Л., Чжао Вэнь.** Исследование мехатронной системы дозирования сыпучих продуктов малыми дозами // Современное машиностроение: наука и образование. MMEST-2018. 2018. 410 с.

9. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Теоретическая физика. В 10 т. Т. 1: Механика. Москва: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 216 с.

10. **Наземцев А.С.** Гидравлические и пневматические системы. Часть 1: Пневматические приводы и средства автоматизации. М.: ФОРУМ, 2004. 240 с.

11. Компоненты для пневматических и вакуумных систем. 2011. 643 с. / Каталог компании «Пневмакс»: сайт компании. Режим доступа: <https://www.pneumax.ru/>

12. **Emblem A., Emblem H.** Packaging technology – Fundamentals, materials and processes. Woodhead Publishing Limited, 2012. 595 p.

13. **Kelsey R.J., Hanlon J.F., Forcinio H.E.** Packing and packaging: design, technology. CRC Press Published. April 23, 1998. 698 p.

14. **Zhavner V.L., Matsko O.N.** Spring drives for reciprocal motion // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2016. Vol. 45. No 1. P. 1–5.

15. **彭博, 粉末包装精密计量系统的设计与分析.** 《湖北工业大学》2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЧЖАО Вэнь — *PhD ассистент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*

E-mail: wenfly2015@yandex.ru

ЖАВНЕР Виктор Леонидович — *доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*

E-mail: vjavner@outlook.com

СМИРНОВ Аркадий Борисович — *доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*

E-mail: smirnov_ab@spbstu.ru

ЯНЬ Чуаньчао — *аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*

E-mail: ychuanchao@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 24.01.2019

REFERENCES

[1] **Korendyasev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I.** Teoreticheskiye osnovy robototekhniki. V 2 kn. M.: Nauka, 2006. 376 s. (rus.)

[2] **Zhavner V.L., Matsko O.N., Zhavner M.V.** Rekupeativnyye privody dlya tsiklovyykh peremesh-

cheniy. Deutschland, Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2014. 90 s.

[3] **Zhavner V.L., Matsko O.N.** Pruzhinnyye privody s uravnoveshivaniyem dlya gorizontalnykh vozvratno-postupatelnykh peremeshcheniy. *Vestnik*



nauchno-tehnicheskogo razvitiya. 2016. № 5. S. 12–17. (rus.)

[4] Zhavner V.L., Matsko O.N., Chzhao Ven, Pruzhinnyye privody s rekuperatsiyey energii dlya tsiklovyykh peremeshcheniy s tekhnologicheskoy nagruzkoy. *Innovatsii i perspektivy razvitiya gornogo mashinostroyeniya i mekhaniki: IPDME_2018: Sbornik tezisev* / Sankt-Peterburgskiy gornyy universitet. SPb., 2018. S. 42. (rus.)

[5] Zhavner V.L., Minichev A.V. Povysheniye effektivnosti raboty rekuperativnykh privodov. *Nedelya nauki SPbGPU SPb.* Izd-vo Politekh.un-ta, 2014. S. 8–10. (rus.)

[6] Zhavner V.L., Chzhao Ven. Dozirovaniye sypuchikh produktov malymi dozami massoy 0,2–5 gramm. *Vestnik mezhdunarodnoy akademii kholoda.* 2018. № 2. S. 34–41. (rus.)

[7] Zhavner V.L., Chzhao Ven. Primeneniye pnevmaticheskikh dvigateley dlya kompensatsii dissipativnykh poter v pruzhinnykh privodakh s rekuperatsiyey energii. *Gidravlicheskiye mashiny, gidropnevmoprivody i gidropnevmootomatika. Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya: Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii.* Moskva, 7–8 iyunya 2018 goda. S. 307. (rus.)

[8] Zhavner V.L., Chzhao Ven. Issledovaniye mekhatronnoy sistemy dozirovaniya sypuchikh produktov malymi dozami. *Sovremennoye mashinostroyeniye: nauka i obrazovaniye MMEST-2018.* 2018. 410 s. (rus.)

[9] Landau L.D., Lifshits Ye.M. Teoreticheskaya fizika: v 10 t. T. 1: Mekhanika. Moskva: Nauka, Gl. red. fiz.-mat. lit., 1988. 216 s. (rus.)

[10] Nazemtsev A.S. Gidravlicheskiye i pnevmaticheskiye sistemy. Chast 1: Pnevmaticheskiye privody i sredstva avtomatizatsii. M.: FORUM, 2004. 240 s. (rus.)

[11] Components for pneumatic and vacuum systems. 2011. 643 p. / Catalog of the kompaniya «Pnevmaks»: sayt kompanii. URL: <https://www.pneumax.ru/> (rus.)

[12] Anne Emblem, Henry Emblem. Packaging technology – Fundamentals, materials and processes M.: Woodhead Publishing Limited, 2012. 595 p.

[13] Kelsey R.J., Hanlon J.F., Forcinio H.E. Packing and packaging: design, technology, application. CRC Press Published. April 23, 1998. 698 p.

[14] Zhavner V.L., Matsko O.N. Spring drives for reciprocal motion. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability.* 2016. Vol. 45. No 1. P. 1–5.

[15] 彭博, 粉末包装精密计量系统的设计与分析。《湖北工业大学》2017

THE AUTHORS

ZHAO Wen – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: wenfly2015@yandex.ru

ZHAVNER Viktor L. – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: vjavner@outlook.com

SMIRNOV Arkadii B. – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: smirnov_ab@spbstu.ru

YAN Chuanchao Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: ychuanchao@mail.ru

Received: 24.01.2019

DOI: 10.18721/JEST.25112
УДК 621.833.61

А.К. Пшизов

Публичное акционерное общество «ЗАРЕМ», г. Майкоп, Россия

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ВОДИЛА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ ПО ШИРИНЕ ЗУБЧАТЫХ ВЕНЦОВ ПЛАНЕТАРНОГО РЕДУКТОРА

В статье исследовано влияние деформативности водила на значение углов перекоса оси сателлита. В основе расчета деформации водила лежит численный метод. Отдельно приведены формулы для нахождения углов перекоса для каждого сателлита. Дан пример расчета перекоса оси сателлита, а также его отклонения от параллельности в результате деформации водила. Отклонения учтены в формулах, описывающих распределение нагрузки по ширине зубчатых венцов. Разработана уточненная методика расчета коэффициента неравномерности распределения нагрузки по длине контактных линий с учетом действующих нагрузок на оси сателлитов, а также конструктивных особенностей водила. Показана зависимость коэффициента неравномерности распределения нагрузки по длине контактных линий от деформативности водила.

Ключевые слова: планетарная передача, водило, деформация, коэффициент неравномерности, распределение нагрузки, ширина венца.

Ссылка при цитировании:

А.К. Пшизов. Влияние деформации водила на распределение нагрузки по ширине зубчатых венцов планетарного редуктора // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 124–133. DOI: 10.18721/JEST.25112.

A.K. Pshizov

Public joint-stock company «ZAREM», Maykop, Russia

EFFECT OF CARRIER DEFORMATION ON LOAD DISTRIBUTION ALONG THE FACE WIDTH OF PLANETARY GEARBOX

We have studied the deformability of a planetary carrier from the standpoint of its effect on misalignment angles of the satellite axis. The formulae for calculating the values of these angles for each satellite engagement are shown separately. Carrier deformation has been calculated based on the numerical method. Examples of calculation of satellite axis misalignment and its parallel misalignment as a result of carrier deformation have been given. These deviations are included in the formulae for calculation of the face load factor. We have developed a refined method for calculating the face load factor as a result of carrier deformation. The method takes into account the loads on satellite axis and construction characteristics of the planetary carrier. The dependence of the face width factor on the deformability of the planetary carrier has been shown in the article.

Keywords: planetary gear, carrier, deformation, face load factor, load distribution, face width.

Citation:

A.K. Pshizov, Effect of carrier deformation on load distribution along the face width of planetary gearbox, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 124–133, DOI: 10.18721/JEST.25112.



Введение

Вопросу снижения материалоемкости продукции всегда уделяется особое внимание. Планетарные передачи как один из видов механических передач наилучшим образом отвечают этому требованию за счет многопоточности [1, 2] и находят наиболее широкое применение в таких отраслях машиностроения, в которых задача оптимизации массогабаритных характеристик изделия является первостепенной. Из всего многообразия планетарных передач наибольшее распространение получили передачи, проектируемые на базе механизма A [3]. В том числе такие редукторы могут быть выполнены по дифференциально-замкнутой схеме. Однако их свойства и факторы, влияющие на их несущую способность, до сих пор являются объектами исследования [4–6]. К таким факторам относятся: погрешности изготовления и сборки звеньев механизма; деформативность и податливость деталей; распределение нагрузки между несущими элементами планетарной передачи. Если говорить об отклонениях размеров при изготовлении планетарных передач, то эти вопросы довольно подробно рассмотрены в [7]. Влияние деформативности (податливости) ободьев центральных колес и сателлитов, а также неравномерного распределения нагрузки между несущими элементами передачи на работоспособность привода рассмотрено в [3, 8–11]. О положительном эффекте податливости звена, например водила, говорится в работе [12].

Влиянию деформативности водила планетарной передачи на распределение нагрузки по ширине зубчатых венцов уделено значительное внимание в работах [3, 13, 14]. В [3] приведена методика расчета деформации водила, которая основана на экспериментальном исследовании группы авторов [13]. Данная методика позволяет получить значение деформации (перемещения) водила в целом — без привязки к конкретному зацеплению сателлита с центральными колесами. Для определения

деформации водила и углов перекоса оси каждого сателлита с центральными колесами целесообразно применять численный метод, с помощью которого можно рассчитывать перемещение любой точки детали, интересующей исследователя, а также деформацию детали в результате сложного, совокупного нагружения. Например, к усилиям от зацеплений сателлитов с центральными колесами можно добавить реакцию от подшипников в опорах, установленных на водиле.

Цель работы — установить влияние деформативности водила на значение угла перекоса образующих зубьев в плоскости зацепления сателлитов с центральными колесами и выразить это влияние через значение коэффициента неравномерности распределения нагрузки по длине контактных линий.

Расчетное исследование

Рассмотрим водило тихоходного планетарного ряда редуктора, встроенного в барабан грузовой одноканатной лебедки (рис.1). Конструкция рассматриваемого изделия показана на рис. 2. Водило не вращается и крепится болтами М24 к опорной стойке рамы лебедки. На цилиндрическую поверхность $\varnothing 320$ установлен шарикоподшипник. Характер изменения нагрузки на подшипник рассмотрен в [15].

На каждую ось сателлита действует сила $F = 2F_{rw}$ в направлении, указанном на рис. 2. Принято считать, что окружные силы F_{rw} во всех зацеплениях центральных колес с сателлитами одинаковы и составляют $F_{rw} = 98845$ Н.

Расчет деформации водила выполнен с помощью прикладной программы «T-FlexCAD», в которую интегрирована среда конечно-элементных расчетов «T-Flex Анализ», обеспечивающая автоматическое построение тетраэдральных конечно-элементных сеток.

В качестве особенности такого метода следует выделить возможность определения деформаций, перемещений, напряжений и коэффициентов запаса в нужной расчетчику точке.

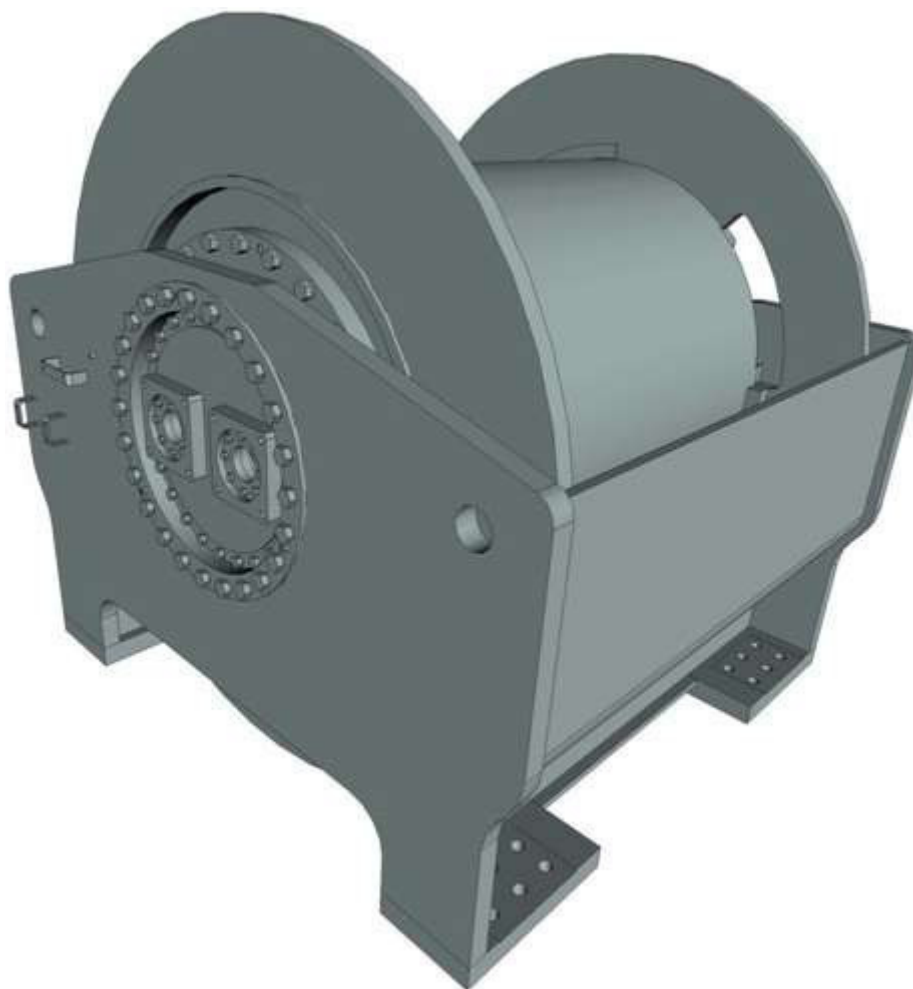


Рис. 1. Модель конструкции лебедки со встроенным планетарным редуктором
Fig. 1. Model of winch construction with integrated planetary gearbox

Для расчета смещения одной щеки водила относительно другой методом конечных элементов необходимо иметь 3D модель исследуемого объекта (рис. 3, *a*), а затем произвести замену исходной модели на дискретную математическую, которая отражает все физические свойства изделия (рис. 3, *б*).

Конструкция водила в математической модели — это совокупность конечных элементов, аппроксимирующих исходную форму изделия и связанных между собой в граничных точках-узлах. Внешние нагрузки, действующие на водило, приведены к эквивалентным, которые приложены к узлам конечных элементов. Ограничения (закрепления) перемещений наложены аналогичным образом.

В качестве геометрической формы конечных элементов, генерирующих расчетную сетку, выбран 10-узловой тетраэдр. Такой конечный элемент удобен тем, что позволяет наиболее точно повторить форму изделия самой сложной формы, каковым является водило.

Одним из важнейших параметров генерируемой сетки является ее размер — чем он меньше, тем более точна аппроксимация модели. Принято значение относительного размера сетки 0,015, которое следует понимать как долю самого большого ребра прямоугольника, охватывающего всю модель. Сгенерированная модель состоит из 232080 элементов и 367561 узла.

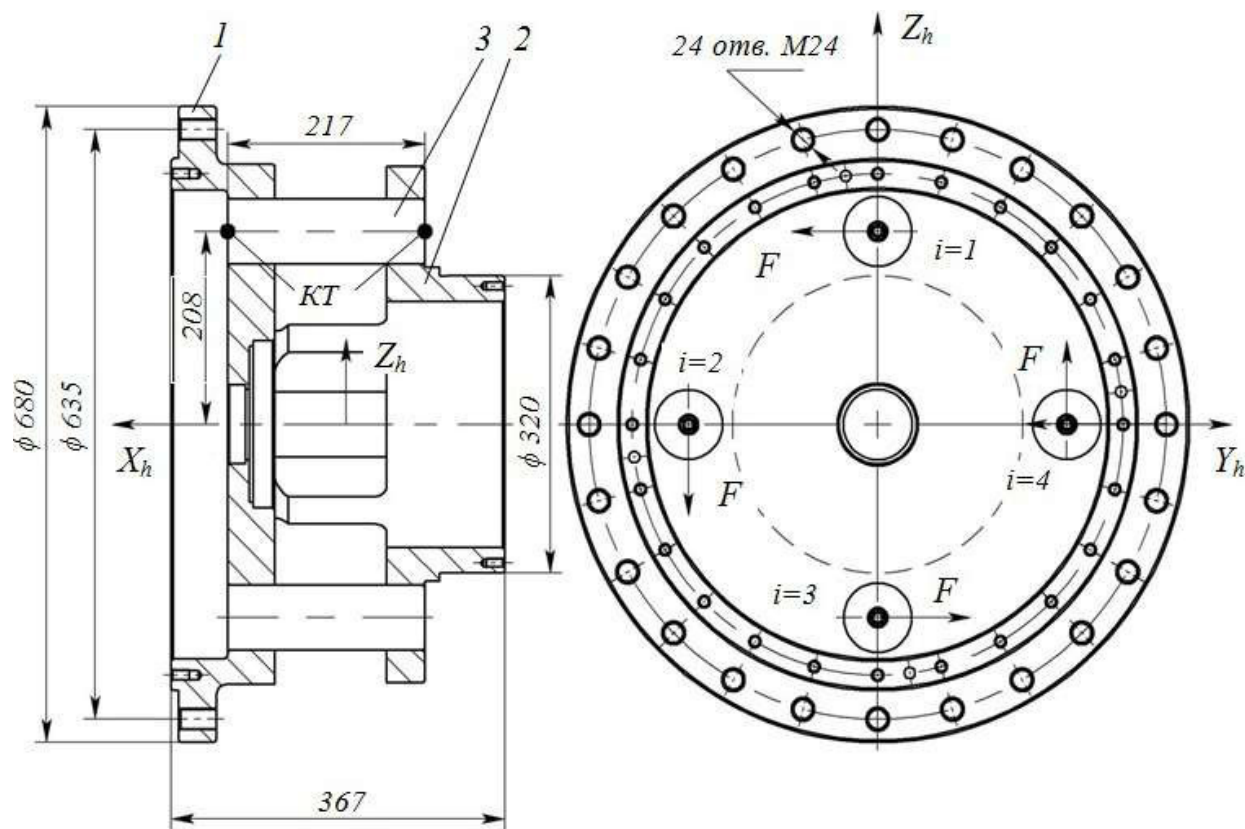


Рис. 2. Конструкция водила
Fig. 2. Carrier construction

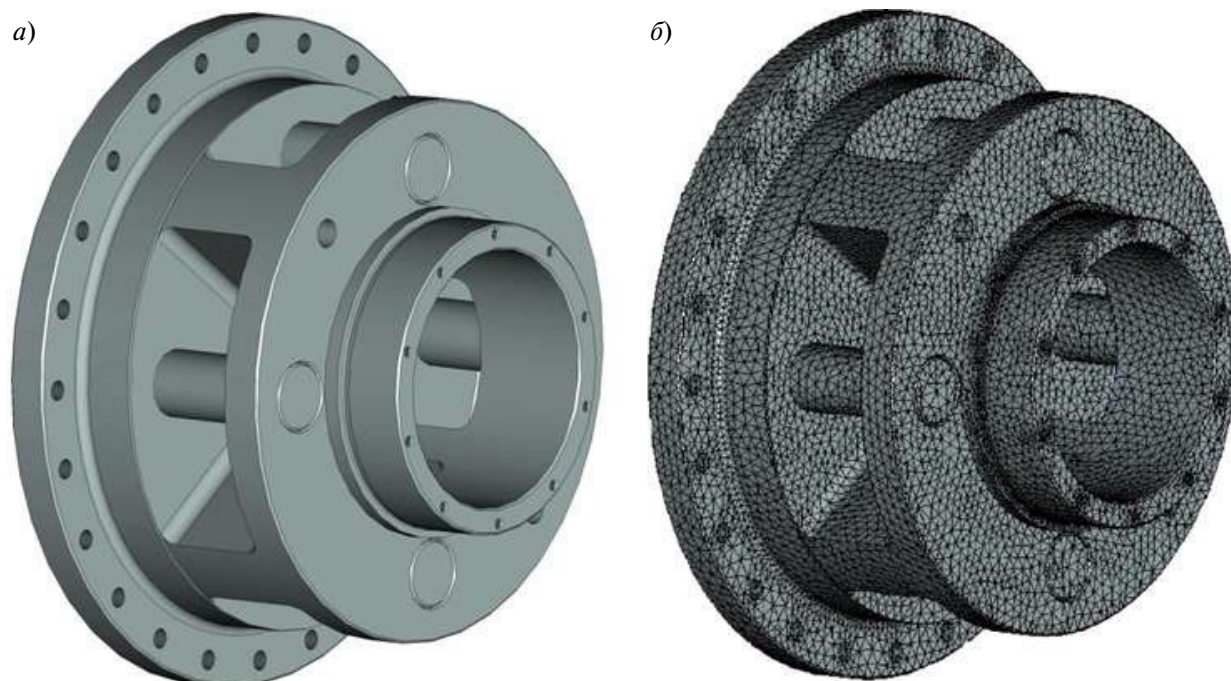


Рис. 3. 3D модель рассчитываемого водила (а) и аппроксимированная математическая модель водила (б)
Fig. 3. 3D model of calculated carrier (а) and approximated mathematical carrier model (б)

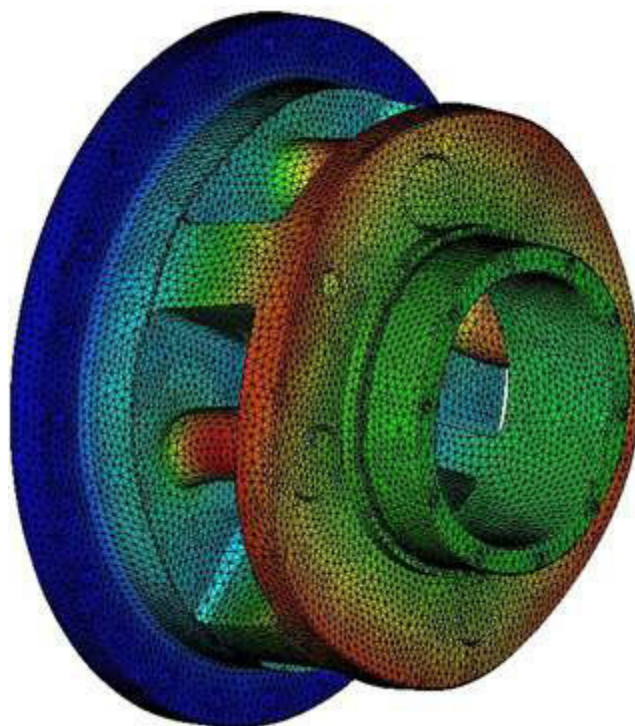


Рис. 4. Деформированное состояние водила

Fig. 4. Deformed carrier condition

Таблица 1

Значения перемещений в контрольных точках

Table 1

Value of displacements in control points

Номер КТ	$\nu_i, ^\circ$	$\Delta_{yi}, \text{мм}$	$\Delta_{zi}, \text{мм}$	$V_i, \text{мм}$	$U_i, \text{мм}$
1	90	-0,0260	0,0002	0,026	-0,00015
2	180	0,00015	-0,02660	0,0266	0,00015
3	270	0,0260	0,0001	0,026	0,0001
4	360	0,0013	0,0260	0,026	-0,0013
5	90	-0,01130	-0,00013	0,0113	0,00013
6	180	0,0002	-0,0108	0,0108	0,0002
7	270	0,010	-0,00014	0,01	-0,00014
8	360	0,0006	0,010	0,01	-0,0006

На рис. 4 можно увидеть деформированное состояние водила в результате приложения нагрузки на оси сателлитов.

В итоге выполнения расчетов, результаты которых приведены в табл. 1, определены деформационные перемещения в контрольных точках (КТ), расположенных на торцах осей

сателлитов. В местах расположения КТ (см. рис. 2) в модели установлены виртуальные датчики, позволяющие считывать информацию в нужной точке КТ. Они расположены на торцах осей со стороны щеки 2 и имеют номера от 1 до 4 в соответствии с нумерацией осей ($i = 1, 2, 3, 4$), показанной на рис. 2. КТ, рас-



положенные на торцах осей со стороны щеки 1, имеют номера от 5 до 8. Деформационные перемещения рассчитываются в системе координат $X_h Y_h Z_h$, которая связана с водилом.

Расчет с помощью МКЭ в среде «Т-Flex Анализ» позволяет моделировать задачу максимально близко к реальным условиям работы изделия. Исходя из этой возможности целесообразно изменить некоторые моменты расчетной модели. В частности ограничение (закрепление) модели было принято производить без каких-либо допущений. Для этого тело водила жестко зафиксировано по отверстиям М24 щеки 1 (см. рис. 2). Это означает, что значения перемещений в КТ, расположенных со стороны щеки 1, будут отличаться от нуля. Значения перемещений Δ вдоль осей OY_h и OZ_h всех КТ приведены в табл. 1.

Из данных табл. 1 следует, что в результате деформации водила под действием сил в зацеплениях сателлитов с центральными колесами происходит смещение щеки 2 относительно щеки 1, когда последняя жестко закреплена.

При расчете на прочность зацеплений $a-g$ и $b-g$ используется местная система координат $X_i Y_i Z_i$, которая связана с осью i -го сателлита. В этой системе координат необходимо определить угол отклонения оси сателлита от плоскости $Z_i O_i X_i$, в которой номинально располагаются оси сателлита и водила (перекос осей γ_{hzi}), а также вычислить угол отклонения оси сателлита от параллельности относительно номинального положения оси водила (отклонение от параллельности γ_{hyi}). Для определения этих углов были вычислены перемещения КТ в окружном и радиальном направлениях:

$$V_i = -\Delta_{yi} \sin v_i + \Delta_{zi} \cos v_i; \quad (1)$$

$$U_i = -\Delta_{yi} \cos v_i - \Delta_{zi} \sin v_i, \quad (2)$$

где Δ_{yi} , Δ_{zi} — деформационные перемещения КТ в направлении осей OY_h и OZ_h ; v_i — угол, координирующий положение оси сателлита и соответствующих КТ относительно оси OY_h .

Для объективной оценки влияния перемещения КТ в результате деформации водила на

нагрузочную способность планетарного редуктора следует определить перекосы осей сателлитов и степень изменения $K_{нр}$.

Перекас оси сателлита представляет собой разность окружных перемещений, отнесенную к расстоянию L между КТ, расположенными на противоположных торцах осей сателлитов ($L = 217$ мм):

$$\gamma_{hzi} = [V_i - V_{(n+i)}] / L. \quad (3)$$

Отклонение от параллельности представляет собой разность радиальных перемещений, отнесенную к расстоянию L между КТ:

$$\gamma_{hyi} = [U_{(n+i)} - U_i] / L. \quad (4)$$

Расчетная схема к определению перекоса осей и отклонения от параллельности представлена на рис. 5.

Далее перекас и отклонение от параллельности рассматриваются как векторы, определяемые по правилу правого винта. Если $\gamma_{hzi} > 0$, то при $\gamma_{hyi} = 0$ удельная нагрузка концентрируется у левого торцового сечения зубчатого венца. Если $\gamma_{hyi} > 0$, то при $\gamma_{hzi} = 0$ удельная нагрузка концентрируется у левого торцового сечения зубчатого венца в зацеплении $a-g$ и у правого торцового сечения в зацеплении $b-g$.

Совместное влияние углов γ_{hzi} и γ_{hyi} на концентрацию удельной нагрузки оценивается частным углом перекоса образующих зубьев в плоскости зацепления. Этот угол, учитывающий влияние деформации водила на неравномерность распределения нагрузки по ширине зубчатых венцов, рассчитывается по формулам (5) и (6) для зацеплений $a-g$ и $b-g$ соответственно:

$$\Delta\gamma'_{tai} = \gamma_{hzi} \cos \alpha_{nw} + \gamma_{hyi} \sin \alpha_{nw}; \quad (5)$$

$$\Delta\gamma'_{tbi} = \gamma_{hzi} \cos \alpha_{nw} - \gamma_{hyi} \sin \alpha_{nw}, \quad (6)$$

где α_{nw} — угол зацепления. Здесь и далее разностью углов зацепления в зубчатых парах $a-g$ и $b-g$ пренебрегаем и в расчете учитываем среднее значение $\alpha_{nw} = (\alpha_{(nw)a} + \alpha_{(nw)b}) / 2$, где $\alpha_{(nw)a}$ и $\alpha_{(nw)b}$ — углы зацепления для зубчатых пар $a-g$ и $b-g$.

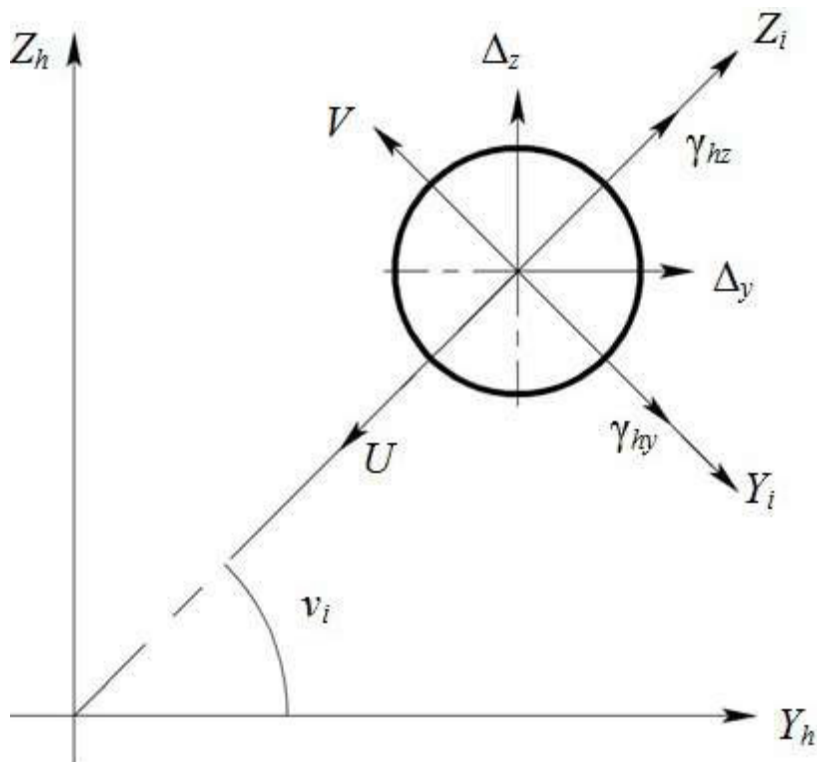


Рис. 5. К определению перекоса и отклонения от параллельности
Fig. 5. For axis misalignment and parallel misalignment determination

Положительные величины углов $\Delta\gamma_{tai}'$ и $\Delta\gamma_{tbi}'$ соответствуют концентрации удельной нагрузки у левого торцового сечения ($x = b_w/2$). Как видно, в зацеплениях сателлита с номерами $i = 1$ и $i = 3$ при деформации водила удельная нагрузка в зацеплениях $a-g$ и $b-g$ концентрируется к одному и тому же торцовому сечению. В зацеплениях сателлита с номерами $i = 2$ и $i = 4$ при деформации водила удельная нагрузка в зацеплениях $a-g$ и $b-g$ концентрируется к противоположным торцовым сечениям.

Частное влияние деформации водила на неравномерность распределения нагрузки по ширине зубчатых венцов в зацеплениях $a-g$ и $b-g$ можно оценивать по углу перекоса осей сателлитов согласно следующей зависимости:

$$\Delta K = 0,4b_w\Delta f_{ky}c' \cos \alpha_{tw} / (F_t K_A K_\Omega K_{HV} Z_\epsilon^2), \quad (7)$$

где фактическое отклонение положения контактных линий в начальный период работы передачи $\Delta f_{ky} = b_w \Delta \gamma$.

Формула (7) применительно к зацеплениям $a-g$ и $b-g$ принимает следующий вид:

$$\Delta K_a = k_a \Delta \gamma_{tai}', \quad (8)$$

$$\Delta K_b = k_b \Delta \gamma_{tbi}'. \quad (9)$$

Здесь безразмерные коэффициенты пропорциональности определены в зависимости от геометрических и нагрузочных параметров зацеплений:

$$k_a = 0,4b_w^2 c' \cos \alpha_{tw} / (F_t K_A K_\Omega K_{HV} Z_{\epsilon a}^2); \quad (10)$$

$$k_b = 0,4b_w^2 c' \cos \alpha_{tw} / (F_t K_A K_\Omega K_{HV} Z_{\epsilon b}^2). \quad (11)$$

В табл. 2 показаны значения частных коэффициентов, связанные с деформацией водила. Эти значения получены с учетом зависимостей (1)–(11) и данных табл. 1. В расчетах принято равномерное распределение нагрузки между сателлитами.



Таблица 2

**Частные углы перекоса образующих зубьев
в плоскости зацепления и частные коэффициенты,
учитывающие влияние перекоса на неравномерность
распределения нагрузки по ширине зубчатого венца**

Table 2

**Special case of misalignment angles of teeth generatrix
in plane of action and special case of coefficients
which take into consideration influence of misalignment
on unevenness of load distribution on the face width**

№	$\Delta\gamma_{tai}'$, рад	$\Delta\gamma_{tbi}'$, рад	ΔK_a	ΔK_b
1	6,97E-05	6,88E-05	0,0516477	0,0522192
2	6,85E-05	6,83E-05	0,0507585	0,0518397
3	6,89E-05	6,96E-05	0,0510549	0,0528264
4	7,04E-05	6,82E-05	0,0521664	0,0517638

Исходные геометрические данные для расчета частных углов перекоса образующих зубьев в плоскости зацепления и коэффициентов, учитывающих влияние перекоса на неравномерность распределения нагрузки по ширине зубчатых венцов, приведены на рис. 1. Для упрощения расчетов в настоящей работе не учитывалась реакция от подшипника, установленного на цилиндрическую поверхность $\varnothing 320$ мм.

В уточненных расчетах необходимо учитывать все действующие на водило нагрузки и прикладывать их к модели. Зависимости (1)–(11) актуальны для корректного получения результатов перемещений КТ и не зависят от числа сателлитов. Отметим, что в случае, когда водило должно вращаться при работе редукто-

ра, следует задаться условием его неподвижности при проведении расчетов.

Заключение

Установлено влияние деформации водила на значение углов перекоса образующих зубьев в плоскости зацепления сателлитов с центральными колесами. При принятых допущениях и исходных данных в результате деформации водила значение коэффициента неравномерности распределения нагрузки по длине контактных линий увеличится равномерно на 5 % в каждом зацеплении сателлитов с центральными колесами. В проведенных расчетах было принято, что нагрузка между сателлитами распределена равномерно. В реальных расчетах необходимо учитывать фактор неравномерности, в том числе при симуляции нагрузок на модель.

Углы перекоса вычислены для каждого сателлита отдельно. Методика расчета представлена.

Предложенный метод оценки также эффективен для расчета деформации водила при действии совместных сил. Такой подход к расчету несущей способности передач планетарного привода, встроенного в барабан грузовой лебедки, в совокупности с анализом, проведенным в работе [15], позволил разместить вторую опору барабана внутри редуктора и сократить осевой размер конструкции.

Благодарность

Автор всемерно благодарен доктору технических наук, профессору А.Л. Филипенкову за ценные советы и совместную работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудрявцев В.Н. Планетарные передачи. Москва, Ленинград: Машиностроение, 1966.
2. Решетов Л.Н. Конструирование рациональных механизмов. Изд 2-е, переработанное и дополненное. М.: Машиностроение, 1972.
3. Планетарные передачи: Справочник / В.Н. Кудрявцев, Ю.Н. Кирдяшев, Е.Г. Гинзбург, Ю.А. Державец, А.Н. Иванов, Е.С. Кисточкин, И.С. Кузь-

мин, А.Л. Филипенков; Под ред. В.Н. Кудрявцева и Ю.Н. Кирдяшева. Ленинград: Машиностроение, 1977.

4. Андрианов Е.Н., Иванов А.Н. Общие вопросы проектирования схем конкурентноспособных распределительных механизмов крановых и судовых приводов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2016. Т. 8. № 2. С. 118–127.

5. Андрианов Е.Н., Иванов А.Н. Исследование свойств дифференциальных механизмов с точки зрения функционирования в специальных судовых и крановых приводах // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9. № 1. С. 165–175.
6. Филипенков А.Л., Пшизов А.К. Планетарные редукторы, встраиваемые в барабаны грузовых лебедок судовых кранов // Вестник ИжГТУ. 2017. Т. 20. № 2. С. 90–93.
7. Кудрявцев В.Н., Кузьмин И.С., Филипенков А.Л. Расчет и проектирование зубчатых редукторов / Под ред. В.Н. Кудрявцева. СПб.: Политехника, 1993.
8. Jonas Pollaschek, Christoph Lopenhaus, Christian Brecker. Inclusion-Based bending strength calculation of gears // Gear Technology. 2017. No 5. P. 56–66.
9. Boiadjev I., Witzig J., Tobie T., Stahl K. Tooth flank fracture – basic principles and calculation model for a sub-surface-initiated fatigue failure mode of case-hardened gears // Gear Technology. 2015. No 8. P. 58–64.
10. Lois Mignot, Loic Bonnard, Vincent Abousleiman. Analysis of load distribution in planet gear bearings // Gear Technology. 2011. No 9. P. 44–50.
11. Детали машин / Н.А. Бильдюк, С.И. Каратушин, Г.Д. Малышев, В.Н. Ражиков, В.И. Смирнов, В.Ф. Федоров, А.А. Федорущенко, А.Л. Филипенков; под ред. В.Н. Ражикова. СПб.: Политехника, 2015.
12. Сунцов А.С. Податливость щек водила планетарной передачи и ее влияние на распределение нагрузки в зацеплениях колес // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2016. № 4 (72). С. 20–22.
13. Кудрявцев В.Н. Прочность и надежность механического привода / Под ред. В.Н. Кудрявцева и Ю.А. Державца. Л.: Машиностроение, 1977.
14. Редукторы энергетических машин/ Б.А. Балашов, Р.Р. Гальпер, Л.М. Гаркави [и др.]; под общ. ред. Ю.А. Державца. Л.: Машиностроение, 1985.
15. Пшизов А.К. К теории проектирования и расчета конструкции судовой лебедки со встроенным планетарным редуктором // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2018. Т. 10. № 1. С. 39–40.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПШИЗОВ Айдамир Казбекович — ведущий инженер-конструктор Публичного акционерного общества «ЗАРЕМ»
E-mail: aydamir_01@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 28.01.2019

REFERENCES

- [1] Kudryavtsev V.N. Planetarnyye peredachi. Moskva, Leningrad: Mashinostroyeniye, 1966. (rus.)
- [2] Reshetov L.N. Konstruirovaniye ratsionalnykh mekhanizmov. Izd 2-ye, pererabotannoye i dopolnennoye. M.: Mashinostroyeniye, 1972. (rus.)
- [3] Planetarnyye peredachi. Spravochnik/ V.N. Kudryavtsev, Yu.N. Kiryashev, Ye.G. Ginzburg, Yu.A. Derzhavets, A.N. Ivanov, Ye.S. Kistochkin, I.S. Kuzmin, A.L. Filipenkov; Pod red. V.N. Kudryavtseva i Yu.N. Kiryasheva. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1977. (rus.)
- [4] Andrianov Ye.N., Ivanov A.N. Obshchiye voprosy proyektirovaniya skhem konkurentnosposobnykh raspredelitelnykh mekhanizmov kranovykh i sudovykh privodov. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2016. T. 8. № 2. S. 118–127. (rus.)
- [5] Andrianov Ye.N., Ivanov A.N. Issledovaniye svoystv differentsialnykh mekhanizmov s tochki zreniya funktsionirovaniya v spetsialnykh sudovykh i kranovykh privodakh. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2017. T. 9. № 1. S. 165–175. (rus.)
- [6] Filipenkov A.L., Pshizov A.K. Planetarnyye reduktory, vstraivayemyye v barabany gruzovykh lebedok sudovykh kranov. Vestnik IzhGTU. 2017. T. 20. № 2. P. 90–93. (rus.)
- [7] Kudryavtsev V.N., Kuzmin I.S., Filipenkov A.L. Raschet i proyektirovaniye zubchatykh reduktorov / Pod red. V.N. Kudryavtseva. SPb.: Politehnika, 1993.
- [8] Jonas Pollaschek, Christoph Lopenhaus, Christian Brecker. Inclusion-Based bending strength calculation of gears. Gear Technology. 2017. No 5. P. 56–66.



- [9] **Boiadjev I., Witzig J., Tobie T., Stahl K.** Tooth flank fracture — basic principles and calculation model for a sub-surface-initiated fatigue failure mode of case-hardened gears. *Gear Technology*. 2015. No 8. P. 58–64.
- [10] **Lois Mignot, Loic Bonnard, Vincent Abousleiman.** Analysis of load distribution in planet gear bearings. *Gear Technology*. 2011. No 9. P. 44–50.
- [11] **Detali mashin/ N.A. Bilyuk, S.I. Karatushin, G.D. Malyshev, V.N. Razhikov, V.I. Smirnov, V.F. Fedorov, A.A. Fedorushchenko, A.L. Filipenkov;** pod red. V.N. Razhikova. SPb.: Politekhnik, 2015. (rus.)
- [12] **Suntsov A.S.** Podatlivost shchek vodila planetarnoy peredachi i yeye vliyaniye na raspredeleniye nagruzki v zatsepleniakh koles. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 2016. № 4 (72). P. 20–22. (rus.)
- [13] **Kudryavtsev V.N.** Prochnost i nadezhnost mekhanicheskogo privoda / pod red. V.N. Kudryavtseva i Yu.A. Derzhavtsa. L.: Mashinostroyeniye, 1977. (rus.)
- [14] **Reduktory energeticheskikh mashin/ B.A. Balashov, R.R. Galper, L.M. Garkavi [i dr.];** Pod obshch. red. Yu.A. Derzhavtsa. L.: Mashinostroyeniye, 1985. (rus.)
- [15] **Pshizov A.K.** K teorii proyektirovaniya i rascheta konstruksii sudovoy lebedki so vstroyennym planetarnym reduktorom. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2018. T. 10. № 1. S. 39–40. (rus.)

THE AUTHORS

PSHIZOV Aydamir K. — *Public joint-stock company «ZAREM»*
E-mail: aydamir_01@mail.ru

Received: 28.01.2019

DOI: 10.18721/JEST.25113
УДК 621.865.8 (075.8)

А.Б. Смирнов, В.Л. Жавнер

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

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ В МЕХАТРОНИКЕ

Рассматриваются вопросы подготовки специалистов в области мехатроники и робототехники. Анализируются проблемы, возникающие при изложении дисциплин для студентов-машиностроителей. Формулируются требования к изложению материалов на базе системного подхода к проектированию технологического оборудования в машиностроении. Подчеркивается, что создание проекта высокоэффективного сложного технического изделия базируется на системном анализе, математическом моделировании и оптимизации. Техническая система как одна из разновидностей искусственной системы характеризуется преобразованием массы, энергии и информации. Мехатроника рассматривается как научно-техническое направление, базирующееся на основных естественнонаучных и технических дисциплинах. Утверждается, что следующий этап развития мехатроники — биомехатроника, в которой ведущую роль будут играть нанотехнологии в области биологии и искусственного интеллекта. Рассматриваются структурно-морфологические признаки и функциональные свойства мехатронных систем. Освещается роль технико-экономических показателей при проектировании мехатронных производственных систем, последовательность этапов проектирования.

Ключевые слова: мехатронная система, структурно-морфологические признаки, функциональные свойства, синергетика, последовательность проектирования, подготовка специалистов.

Ссылка при цитировании:

А.Б. Смирнов, В.Л. Жавнер. Научно-методические аспекты в мехатронике // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 134–142. DOI: 10.18721/JEST.25113.

A.B. Smirnov, V.L. Javner

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL ASPECTS IN MECHATRONICS

The issues of training specialists in the field of mechatronics and robotics are considered. The problems arising from teaching this set of disciplines to engineering students are analyzed. We have formulated requirements for presenting materials based on a systematic approach to design of technological equipment in mechanical engineering. It is emphasized that creating a project for a highly efficient complex technical product is based on system analysis, mathematical modeling and optimization. The technical system as one of the varieties of the artificial system is characterized by transformation of mass, energy and information. Mechatronics is considered as a scientific and technical direction based on the main disciplines of science and technology. It is argued that the next stage in development of mechatronics is biomechatronics, where nanotechnologies in the field of biology and artificial intelligence will play a leading role. Structural and morphological features and functional properties of mechatronic systems have been considered. The role of technical and economic indicators in design of mechatronic production systems and the sequence of design stages have been highlighted.

Keywords: mechatronic system, structural and morphological features, functional properties, synergy, design sequence, training specialists.

Citation:

A.B. Smirnov, V.L. Javner, Scientific and methodological aspects in mechatronics, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 134–142, DOI: 10.18721/JEST.25113.



Введение

Во многих технических вузах появляются специальности по мехатронике. Они в основном организуются на факультетах, где готовят либо механиков, либо электромехаников. На машиностроительных факультетах (институтах) для подготовки бакалавров и магистров по мехатронике и робототехнике необходимо повышать уровень подготовки по дисциплинам, связанным с электроникой, программированием и искусственным интеллектом [1–3]. К сожалению, сильные абитуриенты, увлекающиеся этими предметами, идут на профильные специальности таких факультетов, как факультет технической кибернетики или другие аналогичные. По этой причине важно найти методики, позволяющие «подтягивать» уровень знаний механиков для усвоения ими указанных дисциплин.

Цель нашей работы — определение научно-методических основ дисциплин по мехатронике. Один из методов, позволяющих повысить уровень обучения, — это когда студентам в доступной и несколько упрощенной форме показывается системный характер мехатроники [4, 5], что, на наш взгляд, наиболее эффективно можно сделать на занятиях по основам мехатроники и робототехники.

Методические аспекты обучения основам мехатроники. Системный подход в мехатронике

Дисциплина «Основы мехатроники и робототехники» относится к дисциплинам, входящим в федеральный компонент. Обязательный минимум содержания дисциплины в области мехатроники включает следующие разделы:

- предпосылки развития мехатроники и области применения мехатронных систем;
- концепция построения мехатронных систем;
- определения и терминология мехатроники;
- структура и принципы интеграции мехатронных систем;
- мехатронные модули движения;
- современные мехатронные системы;
- проблематика и современные методы управления мехатронными модулями и системами.

В одном из самых известных учебных пособий по основам мехатроники [6], написанном Ю.В. Подураевым, этим разделам уделяется большое внимание, во многих разделах фигурируют такие понятия, как мехатронная система, анализ мехатронных систем, синергетика и т. д. Однако для усвоения концепции построения мехатронных систем и принципов интеграции у студентов-механиков явно отсутствуют знания по теории систем и системному анализу. По этой причине на одной из первых лекций желательно давать элементы этой теории. Среди серьезных работ по этому предмету можно указать на книги [7, 8]. К сожалению, мощный логический и математический аппарат теории систем невозможно в полном объеме дать нашим студентам. Важно подчеркнуть, что знания по системному анализу пригодятся студентам при работе над дипломным проектом, т. к. обычно в задании на выпускную квалификационную работу необходимо разработать какую-либо сложную техническую систему, дать ее анализ, применив метод декомпозиции.

Для любого сложного изделия применимо понятие *системы*. Под системой понимают определенное во времени и пространстве множество элементов с известными свойствами и упорядоченными связями между элементами [9]. Система функционирует, взаимодействуя с другими объектами, объединенными понятием «*внешняя среда*». Техническая система как одна из разновидностей искусственной (т. е. созданной человеком) системы характеризуется преобразованием массы, энергии и информации (рис. 1). Основным действием технической системы является преобразование того или иного объекта или свойства. Концепция системного подхода к проектированию заключается в том, что система не должна рассматриваться как простая сумма элементов или подсистем. Создание проекта высокоэффективного сложного технического изделия (космический корабль, автомобиль, технологический автомат и т. д.) имеет в основе [10]:

- системный анализ;
- математическое моделирование;
- оптимизацию.

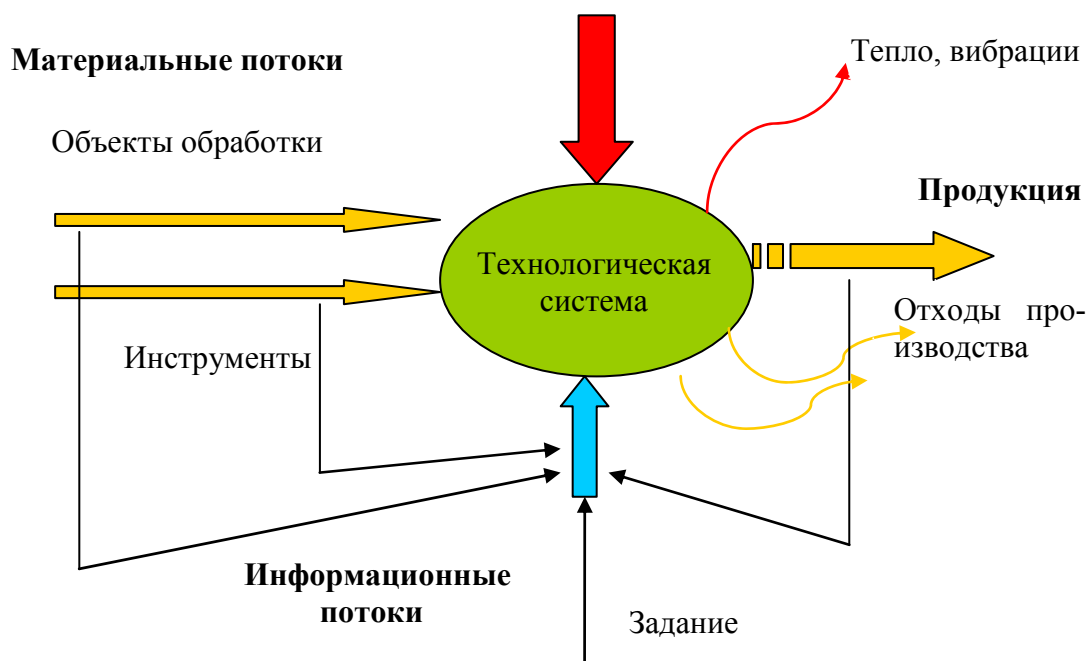


Рис. 1. Потоки в технологической системе

Fig. 1. Flow in the process system

После усвоения этого материала можно легко перейти к понятиям «мехатронная система», «синергетическое объединение» и др. Например, как приведено в [11], мехатронным объектам характерно иерархическое построение. Все мехатронные объекты можно разделить на следующие: мехатронные узлы, мехатронные модули, мехатронные агрегаты, мехатронные системы. *Мехатронный модуль* – основная единица мехатронной системы; это унифицированный мехатронный объект, служащий для реализации одной из функций создаваемой системы (например, мехатронный модуль подачи инструмента, мотор-шпиндель).

Любая система характеризуется входом и выходом. У мехатронных объектов на входе – информационное задание, на выходе – полезное *механическое* воздействие на внешнюю среду (к таким воздействиям можно отнести не только силы и моменты, перемещения, но и давление газа и жидкости, дозы веществ и т. д.). Для понимания этих терминов можно привести следующий пример. В любом компьютере винчестер – это типичный мехатрон-

ный модуль. Встает вопрос: является ли компьютер мехатронной системой? Очевидно, что компьютер нельзя считать мехатронной системой, так как в нем полезным выходным воздействием на внешнюю среду является информация, а не механическое воздействие.

Данную классификацию можно дополнить терминами, применяемыми в приборостроении. *Мехатронный аппарат* – это мехатронный объект, который осуществляет физическое (механическое) воздействие на внешнюю среду (например, аппарат искусственного кровообращения, рентгеновский томограф, где необходимы сложные согласованные движения излучающей головки). *Мехатронный прибор* – это мехатронный объект, осуществляющий измерение механических параметров внешней среды.

По поводу термина «синергетика», которое пришло из медицины, можно считать следующее. *Синергетика* (от греческого «synergos» – «вместе действующий») – совместное и однородное функционирование элементов и систем, при комбинированном действии которых эффект превышает сумму действий всех



в отдельности. Например, известные лекарства тетрациклин и нистатин дают хороший эффект при лечении только при одновременном применении, устраняя нежелательные эффекты. Иными словами, соединение в единую систему элементов дает эффект больший, чем использовании всех этих элементов по отдельности. В качестве технического примера можно привести следующее. Что нового дает совмещение в единую систему автомашины, предназначенной для перевозки тяжелых грузов, и подъемного крана для подъема тяжелых грузов? Автокран имеет новое качество — мобильность производства подъемно-транспортных работ. Также по аналогии мехатронные системы должны давать новое качество.

В «Основах мехатроники и робототехники» важно показать, что мехатроника как научно-техническое направление базируется на основных естественнонаучных и технических дисциплинах (рис. 2). Очевидно, что в XXI веке следующим этапом развития мехатроники станет биомехатроника, в которой огромную

роль будут играть нанотехнологии в области биологии и искусственного интеллекта.

С методической точки зрения существенно понимание основных признаков и свойств мехатронных объектов. Поэтому необходимо показать различия между ними. Для любых сложных систем признаки и свойства являются важнейшими информационными блоками, характеризующими систему. *Признак* — это качество, внешнее проявление, по которому можно отличить объект от других. Совокупность признаков позволяет идентифицировать, выделить данный объект, систему среди других объектов, имеющих множество качеств. *Свойство* — это качество, присущее данному объекту, системе. Свойства системы можно количественно описать параметрами и характеристиками объекта, системы. *Параметры* — это величины, характеризующие признаки и свойства объекта, системы. *Характеристики* — это в общем смысле описание свойств объекта; для описания технических характеристик объекта используют зависимости (или функции) одних параметров объекта (системы) от других.

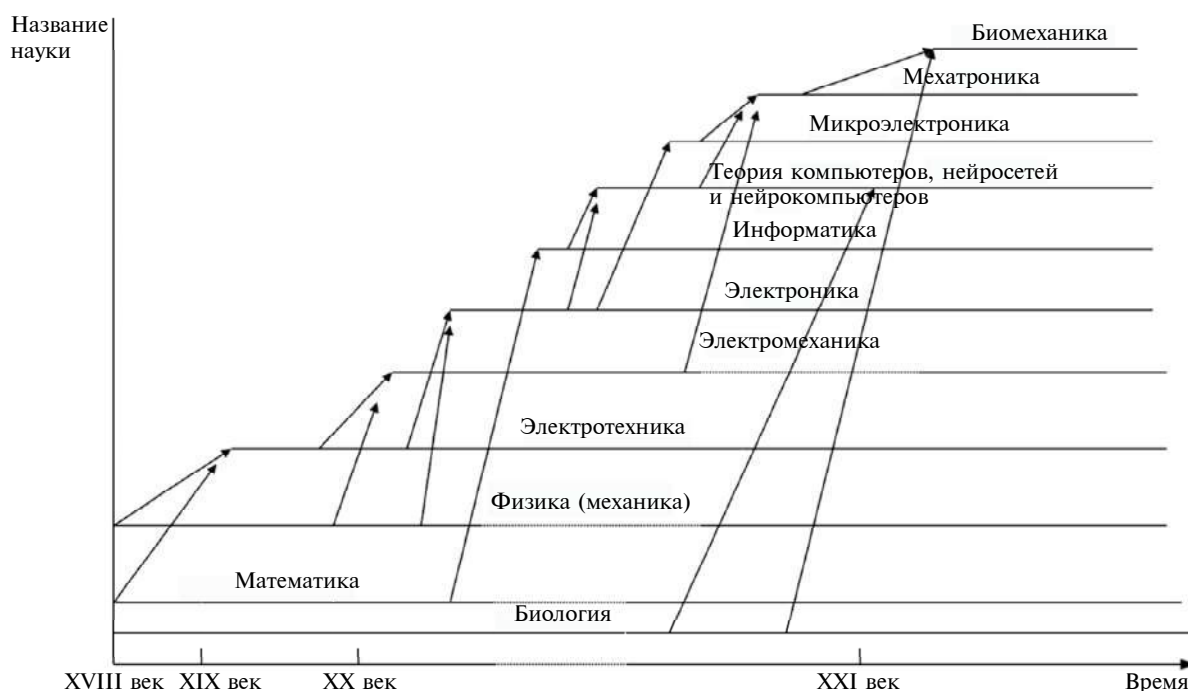


Рис. 2. Базовые науки и дисциплины мехатроники

Fig. 2. The emergence of basic sciences and disciplines mechatronics in time

Проще всего понятия признака и свойств формируется в медицине. Так, признаками начинающегося гриппа служат головная боль, слабость, озноб, повышенная температура, ощущение сухости в носу и т. д. Объективными параметрами признаков являются температура, повышенная скорость оседания эритроцитов. Здесь важно отметить, что для такой сложной системы, как человек, эти признаки могут быть в наличии не все одновременно, а только некоторые из них. К свойствам гриппа можно отнести заразность, возможные осложнения. Характеристикой протекания болезни является график зависимости температуры пациента от времени, параметром — период времени, когда больной заразен.

Признаки и функциональные свойства мехатронных систем

Анализ признаков мехатронной системы лучше всего начинать со *структурно-морфологических признаков*, т. е. признаков, отличающих структуру и строение элементов мехатронной системы от другой технической системы, построенной по другим принципам [12]. Для этих систем характерно следующее:

1. Главный признак — интеграция (структурно-функциональная и структурно-компоновочная) подсистем: механической, электро-механической, микропроцессорной и информационно-измерительной при программном обеспечении и управлении всей системы.

2. Как правило, имеет место большое количество элементов и обратных связей в системе управления, т. е. наличие большого числа датчиков, дающих информацию о различных параметрах состояния системы.

3. Иерархическая структура системы управления, включая возможность внешнего управления через различные средства электронной связи (в том числе через интернет).

4. Модульность всех элементов системы и высокая степень унификации (в том числе возможность наращивания программных модулей).

5. Укороченные и упрощенные кинематические цепи механической и электро-механической подсистем, а также использование параллельных кинематических цепей.

6. Использование высокоточных механических передач в механической подсистеме.

7. Применение разнообразных видов преобразователей энергии, основанных на различных физических эффектах.

8. Использование новых материалов с повышенными механическими и электро-механическими характеристиками.

9. Часто число степеней подвижности в системе превышает необходимое, определяемое наличием дополнительных приводов.

10. Использование электронных миниатюрных компонентов со сверхплотным монтажом.

11. Наличие высокоинформационного интерфейса «человек—машина».

12. Использование бионических принципов построения системы.

Свойства мехатронных систем сильно зависят от их назначения, однако можно найти и общие свойства. *Функциональные свойства* следующие:

повышение доли функций системы, относящихся к системе управления, и уменьшение доли функций, приходящихся на механическую подсистему;

увеличение вариативности функций, выполняемых системой за счет программного обеспечения;

автоматизация переналадки системы;

автоматизация технической диагностики и мониторинг работоспособности всех подсистем;

повышение интеллектуальности программного обеспечения, внедрение искусственного интеллекта.

К свойствам *надежности и качества* мехатронных систем можно отнести следующие:

1. Высокое качество исполнения сложных и точных движений благодаря применению методов адаптивного и интеллектуального управления.



Рис. 3. Последовательность проектирования мехатронного технологического оборудования

Fig. 3. The sequence of the design of mechatronic process equipment

2. Высокая помехозащищенность за счет модульности подсистем.

3. Компактность мехатронных модулей вследствие миниатюризации и укорочения кинематических цепей.

4. Повышение удельной мощности и улучшение динамических характеристик машин благодаря укорочению кинематических цепей и исключению многоступенчатого преобразования энергии и информации.

5. Возможность быстрого комплектования функциональными модулями мехатронных систем, допускающих простую реконфигурацию в зависимости от технических требований.

6. Повышение надежности системы в целом за счет сокращения доли механических подсистем и изменения программным путем функций механической и электромеханической подсистем, а также за счет мониторинга состояния всех элементов системы.

7. Относительно низкая стоимость в силу высокой степени интеграции, унификации и стандартизации всех компонентов мехатронных систем.

Последовательность проектирования и эффективность мехатронных систем

В курсе лекций по мехатронике и робототехнике необходимо подчеркнуть, что для разработки мехатронных систем с указанными качествами важно правильно выбрать последовательность действий (рис. 3). Для производственных машин на первом этапе задаются технологические задачи и определяются цели проектирования. На втором этапе разрабатывается технологический процесс. На третьем этапе производится моделирование процесса, определение его численных характеристик и допустимых предельных отклонений, поиск и выбор особых или критических точек. На четвертом этапе разрабатываются требования к системам: измерительно-информационной (ИИС), приводов (СП), управления (СУ) и к программному обеспечению (ПО). Пятый этап связан с разработкой перечисленных выше систем и программного обеспечения. Кроме того, на этом этапе разрабатываются и отдельные специальные модули, в том числе и мехатронные

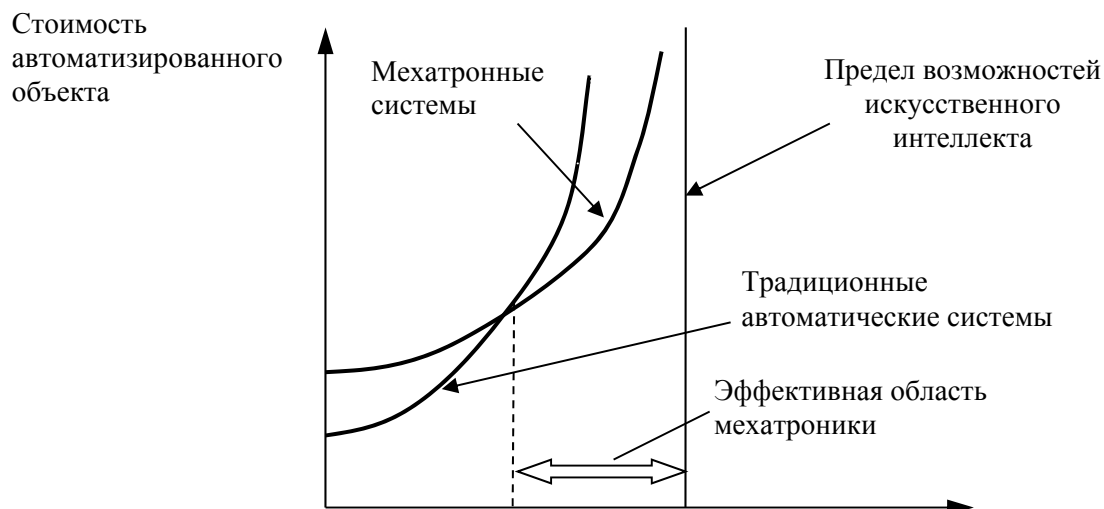


Рис. 4. Область эффективного применения мехатронных систем
Fig. 4. Scope of effective application of mechatronic systems

предназначенные только для данного конкретного оборудования. На последнем этапе производится конструктивное оформление изделия в соответствии со стандартными нормами [13].

В «Основах мехатроники» желательно осветить экономические аспекты использования мехатронных объектов. Для любых отраслей хозяйства встает вопрос об *экономической целесообразности* разработки и использования мехатронных систем. Для разработки новых технических систем, в том числе мехатронных, необходимо иметь потребность в них, т. е. должна быть экономическая целесообразность их создания и производства [14, 15]. Она в первую очередь зависит от степени использования функциональных возможностей объектов, т. е. от того, насколько рационально выбрана та или иная концепция автоматической системы. Анализ экономических показателей при создании новых технических объектов дает следующую качественную зависимость стоимости объекта от его технических возможностей (рис. 4).

Предел технических возможностей определяется возможностями искусственного интеллекта. Мехатронные системы становятся более эффективными по сравнению с традиционными автоматическими системами только при

высоких функциональных и технических требованиях к ним. Логический вывод: современном этапе экономически выгодно использовать принципы мехатроники для технических систем, выполняющих сложные задачи, в простых же случаях внедрять интегрированные системы не всегда целесообразно.

Заключение

Изложенные аспекты методики позволяют, на наш взгляд, улучшить понимание принципов построения мехатронных систем. Необходимо четко структурировать основные понятия мехатроники, признаки и свойства мехатронных систем. Анализ базисных наук, на которые опирается мехатроника, дает возможность составить объективную картину развития мехатроники как научно-технического направления в целом, предсказать наиболее перспективные технические решения. Важным фактором эффективности применения мехатронных систем служит оценка экономической целесообразности применения мехатронных систем. Рациональная последовательность их проектирования позволяет грамотно использовать ресурсы автоматизации машиностроения и ускорить процесс разработки.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mechatronics Technology – LabVolt [Электр. ресурс]. URL: https://www.labvolt.com/downloads/89804_00.pdf (Дата обращения 01.12.2018).
2. Development of Mechatronics Engineering Degree Program – IJEE [Электр. ресурс]. URL: <https://www.ijee.ie/articles/Vol19-4/IJEE1423.pdf> (Дата обращения 01.12.2018).
3. Krasinsky A.Ya., Krasinskaya E.M. The role of theoretical mechanics in training specialists in the field of mechatronics and robotics [Электр. ресурс]. URL: <http://engjournal.ru/articles/1346/eng/1346.pdf> (Дата обращения 01.12.2018).
4. Memis Acar. Mechatronics Challenge for the Higher Education World [Электр. ресурс]. URL: <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/bitstream/2134/27170/1/Mechatronics%20Challenge%20for%20HE%20World.pdf> (Дата обращения 01.12.2018).
5. Yevhenii O. Modlo, Serhiy O. Semerikov, Ekaterina O. Shmeltzer. Modernization of Professional Training of Electromechanics Bachelors: ICT-based Competence Approach [Электр. ресурс]. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2257/paper15.pdf> (Дата обращения 01.12.2018).
6. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. М.: Машиностроение, 2007. 256 с.
7. Klaus Janschek. Mechatronic Systems Design: Methods, Models, Concepts. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. 805 p.
8. Волкова В.Н., Денисов А.А. Теория систем и системный анализ. М.: Изд-во Юрайт, 2017. 462 с.
9. Дитрих Я. Проектирование и конструирование: Системный подход / Пер. с польск. М.: Мир, 1981. 456 с.
10. Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов. Т 1. СПб.: НИЦ «МОРИНТЕХ», 2014. 822 с.
11. Аршанский М.М., Шалобаев Е.В. Мехатроника: основы глоссария // Мехатроника. 2003. № 4. С. 47–48.
12. Жавнер В.Л., Смирнов А.Б. Мехатронные системы. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 131 с. URL: <http://elibrary.spbstu.ru/dl/2/3879.pdf/view> (Дата обращения 01.12.2018).
13. Жавнер В.Л., Смирнов А.Б. Мехатронные принципы проектирования технологического оборудования // Конструктор-машиностроитель. 2008. № 3. С. 12–15.
14. Patrick O.J. Kaltjob. Mechatronic Systems and Process Automation: Model-Driven Approach and Practical Design Guidelines. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2018. 447 p.
15. Harald Sporer. Mechatronic System Development: an Automotive Industry Approach for Small Teams: Doctoral Thesis / Graz, March 2016. [Электр. ресурс]. URL: <https://diglib.tugraz.at/download.php?id=5891c8351e03a&location=browse> (Дата обращения 01.12.2018).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СМИРНОВ Аркадий Борисович – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: 123smirnov@list.ru

ЖАВНЕР Виктор Леонидович – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: vjavner@outlook.com

Дата поступления статьи в редакцию: 25.01.2019

REFERENCES

- [1] Mechatronics Technology – LabVolt : https://www.labvolt.com/downloads/89804_00.pdf (Accessed 01.12.2018).
- [2] Development of Mechatronics Engineering Degree Program – IJEE : <https://www.ijee.ie/articles/Vol19-4/IJEE1423.pdf> (Accessed 01.12.2018).
- [3] Krasinsky A.Ya., Krasinskaya E.M. The role of theoretical mechanics in training specialists in the field of mechatronics and robotics. URL : <http://engjournal.ru/articles/1346/eng/1346.pdf> (Accessed 01.12.2018).
- [4] Memis Acar. Mechatronics Challenge for the Higher Education World URL: <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/bitstream/2134/27170/1/Mechatronics%20Challenge%20for%20HE%20World.pdf> (Accessed 01.12.2018).
- [5] Yevhenii O. Modlo, Serhiy O. Semerikov, Ekaterina O. Shmeltzer. Modernization of Professional Training

of Electromechanics Bachelors: ICT-based Competence Approach. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2257/paper15.pdf> (Accessed 01.12.2018).

[6] **Podurayev Yu.V.** Mekhatronika: osnovy, metody, primeneniye [Mechatronics: bases, methods, application]. M.: Mashinostroyeniye, 2007. 256 s. (rus.)

[7] **Klaus Janschek.** Mechatronic Systems Design: Methods, Models, Concepts. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. 805 p.

[8] **Volkova V.N., Denisov A.A.** Teoriya sistem i sistemnyy analiz [Systems Theory and Systems Analysis]. M.: Izdatelstvo Yurayt, 2017. 462 s. (rus.)

[9] **Ditrikh Ya.** Proyektirovaniye i konstruirovaniye: Sistemnyy podkhod [Design and construction: a systematic approach]. Per. s polsk. M.: Mir, 1981. 456 s. (rus.)

[10] **Gaykovich A.I.** Teoriya proyektirovaniya vodoizmeshchayushchikh korably i sudov. T1 [Theory of designing displacement ships and vessels. T1]. SPb.: NITs «MORINTEKh», 2014. 822 s. (rus.)

[11] **Arshanskiy M.M., Shalobayev Ye.V.** Mekhatronika: osnovy glossariya [Mechatronics: glossary basics]. Mekhatronika. 2003. №4. S. 47–48. (rus.)

[12] **Zhavner V.L., Smirnov A.B.** Mekhatronnyye sistemy [Mechatronic systems]. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2011. 131 s. URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/3879.pdf/view> (Data obrashcheniya 01.12.2018). (rus.)

[13] **Zhavner V.L., Smirnov A.B.** Mekhatronnyye printsipy proyektirovaniya tekhnologicheskogo oborudovaniya [Mechatronic Design Principles for Technological Equipment]. Konstruktor-mashinostroyitel. 2008. № 3. S. 12–15. (rus.)

[14] **Patrick O.J.** Kaltjob. Mechatronic Systems and Process Automation: Model-Driven Approach and Practical Design Guidelines. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2018. 447 p.

[15] **Harald Sporer.** Mechatronic System Development: an Automotive Industry Approach for Small Teams: Doctoral Thesis. / Graz, March 2016. URL: <https://diglib.tugraz.at/download.php?id=5891c8351e03a&location=browse> (Accessed 01.12.2018).

THE AUTHORS

SMIRNOV Arkadii B. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: 123smirnov@list.ru

JAVNER Viktor L. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: vjavner@outlook.com

Received: 25.01.2019

DOI: 10.18721/JEST.25114
УДК 66.03

В.Ф. Першин, К.А. Аль-Шиблави, А.А. Баранов, Т.В. Пасько

Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия

ПОЛУЧЕНИЕ МАЛОСЛОЙНОГО ГРАФЕНА СПОСОБОМ ЖИДКОФАЗНОЙ СДВИГОВОЙ ЭКСФОЛИАЦИИ

Цель предлагаемой работы — исследование влияния режимных параметров на процесс жидкофазной эксфолиации и проверка эффективности модифицирования бетона графеновыми структурами, полученными механическим способом. Процесс эксфолиации проводили на статор-ротор аппарате при скольжении лопастей по внутренней поверхности ротора. В процессе экспериментов изменяли исходную концентрацию графита в водной суспензии и скорость вращения ротора. Изучалось влияние указанных параметров на время обработки и концентрацию малослойных графеновых структур, образованных в результате эксфолиации. Готовую суспензию использовали при изготовлении бетонных образцов для проведения испытаний на сжатие и изгиб. Установлено, что при содержании графеновых структур 1 мг/мл в воде, которая используется при приготовлении бетона, его прочность на сжатие повышается в 1,7–2,5 раза, а на изгиб — в 1,2–1,5 раза. Максимальная концентрация (1,7 мг/мл) графеновых структур в суспензии достигается за минимальное время при исходной концентрации графита 50 мг/мл и скорости вращения ротора 10000 об/мин.

Ключевые слова: графит, графен, сдвиг, эксфолиация, бетон.

Ссылка при цитировании:

В.Ф. Першин, К.А. Аль-Шиблави, А.А. Баранов, Т.В. Пасько. Получение малослойного графена способом жидкофазной сдвиговой эксфолиации // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 143–154. DOI: 10.18721/JEST.25114.

V.F. Pershin, K.A. Al-Shiblawi, A.A. Baranov, T.V. Pasko

Tambov state technical university, Tambov, Russia

PRODUCTION OF LOW-LAYER GRAPHENE BY LIQUID PHASE SHEAR EXFOLIATION

The goal of this study is in investigating the effect of operating parameters on liquid-phase exfoliation and in testing the effectiveness of concrete modification with mechanically obtained graphene structures. Exfoliation was carried out with a rotor-stator mixer with the blades sliding on the inner surface of the rotor. The initial concentration of graphite in the aqueous suspension and the rotor speed were changed during the experiments. We have presented the results of the effect of these parameters on the processing time and the concentration of multilayer graphene structures formed through exfoliation. The finished suspension was used to prepare concrete samples for testing in compression and bending. It was established for the content of graphene structures of 1 mg/ml in water, used to prepare the concrete that its compressive strength increases by 1.7–2.5 times, bending strength by 1.2–1.5 times. The maximum concentration of graphene

structures in the suspension is 1.7 mg/ml for the minimum time achieved at an initial graphite concentration of 50 mg/ml and a rotor speed of 10,000 rpm.

Keywords: graphite, graphene, shear, exfoliation, concrete.

Citation:

V.F. Pershin, K.A. Al-Shiblawi, A.A. Baranov, T.V. Pasko, Production of low-layer graphene by liquid phase shear exfoliation, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 143–154, DOI: 10.18721/JEST.25114.

Введение

Малослойный графен широко используется при создании новых конструкционных и функциональных материалов. Современное состояние и перспективы модифицирования эпоксидных смол наноматериалами, включая графен, проанализированы в работе [1]. В работе [2] доказана большая эффективность модифицирования эпоксидных смол графеном по сравнению с углеродными нанотрубками. Как известно, графен можно получить с помощью различных методов [3], из которых наиболее часто исследуемый маршрут следующий: графит → оксид графита → графен [4]. Эта технология достаточно легко масштабируется, а полученный продукт используется для модифицирования полимерных материалов. Разработаны различные методы синтеза оксида графена из графита [5, 6]. Но свойства графена в его окисленной форме существенно отличаются от свойств графена. Кислородсодержащие группы можно удалить восстановлением, однако структура и электрические показатели восстанавливаются неполностью [7]. Одним из перспективных путей одновременного достижения эксфолиации и восстановления оксида графена является микроволновое воздействие. Графен, полученный микроволновым воздействием, содержит некоторое количество поверхностных функциональных групп, что положительно влияет на его распределение в полимерной матрице [8]. Графен, полученный микроволновой эксфолиацией и восстановлением оксида графена (MERGO) [9], за счет функциональных групп не только хорошо диспергируется в полимер-

ной матрице, но и обеспечивает образование активных химических связей между нанопластинками графена и полимерной матрицей [10]. Несмотря на достоинства MERGO, данная технология при использовании ее в промышленных масштабах имеет весьма существенный недостаток — загрязнение окружающей среды. Дело в том, что для окисления графита по методу Хамерса–Оффермана используется смесь серной кислоты H_2SO_4 , нитрата натрия $NaNO_3$ и перманганата калия $KMnO_4$. Естественно, что утилизация отходов производства существенно повышает стоимость готового продукта.

Одна из наиболее масштабных областей применения малослойного графена в качестве модификатора — строительная индустрия. Наноматериалы не только значительно повышают эксплуатационные характеристики строительных материалов, но и уменьшают загрязнения окружающей среды [11, 12]. Внимание многих исследователей [13–19] было сосредоточено на изучении влияния наноматериалов на характеристики бетона. Так, например, использование углеродных нанотрубок привело к 50 %, а оксида графена к 33 % увеличению прочности бетона на сжатие. Основным препятствием использования графена при модифицировании бетона до недавнего времени была его высокая стоимость. Группа ученых из Ирландии и Великобритании [20] разработала способ получения малослойного графена способом жидкофазной эксфолиацией графита, а другая группа использовала его для модифицирования бетона [21]. На наш взгляд, жидкофазная эксфолиация



ция является одной из перспективных промышленных технологий получения малослойного графена, особенно для тех применений, где он может быть использован в виде суспензии. Эффективность использования малослойного графена, полученного непосредственно из графита путем жидкофазной эксфолиации, была проверена экспериментально на бетонных изделиях [20].

Результаты испытаний показали, что при содержании графена в затворной воде порядка 0,8 г/л прочность на сжатие увеличилась на 146 %, а на изгиб – 79,5 %.

Цель работы – исследовать влияние режимных параметров на процесс жидкофазной эксфолиации и проверить эффективность модифицирования бетона графеновыми структурами, полученными механическим способом.

Материалы и методика эксперимента

Исходные материалы. Для получения малослойного графена в данной работе в качестве исходного материала мы использовали графит марки ГСМ-2 по ГОСТ 18191-78 «Графит специальный малозольный. Технические условия». По физико-химическим показателям он соответствует требованиям, указанным в таблице. Выбор материала обоснован его использованием на ООО «НаноТех-Центр» (г. Тамбов) для получения малослойного графена путем жидкофазной эксфолиации и ультразвуковой обработки оксида графита, полученного по методу Хамерса–

Офеманна [5]. В принципе, в качестве исходного материала может быть использован кристаллический графит марок ГС-1, ГС-2, ГСМ-1, ГСМ-3, ГСМ-4. Данные марки графита в основном отличаются только зольностью, а структура их одинакова.

Приготавливая суспензию, использовали воду по ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия», в которую добавляли поверхностно-активное вещество ОП-7 по ГОСТ 8433-81 «Вещества вспомогательные ОП-7 и ОП-10. Технические условия». Концентрация ОП-7 составляла 0,3 % по отношению к воде. В качестве поверхностно-активной добавки можно использовать и другие вещества, препятствующие агломерации малослойного графена, в том числе модификаторы бетона по ГОСТ Р 56178-2014 «Модификаторы органоминеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей. Технические условия».

Экспериментальная установка. Как и в работах [20, 21], жидкофазную эксфолиацию мы проводили на статор-ротор аппарате, схема которого представлена на рис. 1. Аппарат состоит из цилиндрического статора 1, ротора 2 и привода вращения ротора 3. Внутренний диаметр статора – 40 мм, высота – 50 мм, а радиальный зазор Δ между статором и лопастями ротора равен 0,05 мм. Скорость вращения ротора изменялась от 5000 до 15000 об/мин.

Физико-химические показатели графита

Physical and chemical indexes of graphite

Марка графита	Норма показателя и метод испытания			
	Зольность, % (не более)	Массовая доля влаги, % (не более)	Выход летучих веществ, в том числе от флотореагентов, % (не более)	Остаток на сетке №2, % (не менее)
	ГОСТ 17818.4	ГОСТ 17818.1	ГОСТ 17818.3	ГОСТ 17818.2
ГСМ-1	0,1	0,2	0,2	70
ГСМ-2	0,5	0,2	0,2	Не нормируется

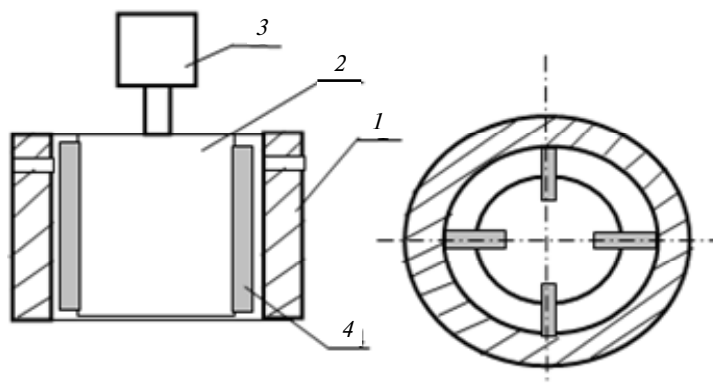


Рис. 1. Схема статор-ротор аппарата:

1 – статор; 2 – ротор; 3 – привод; 4 – лопасть; 5 – крышка

Fig. 1. Scheme of the stator-rotor device:

1 – stator; 2 – rotor; 3 – drive; 4 – blade; 5 – cap

В отличие от аппарата, который использовали в работах [20, 21], мы установили на статор крышку 5, отверстия разместили только в верхней части цилиндрической оболочки, а ротор снабдили сменными лопастями из полимерного материала. Лопасти устанавливались таким образом, чтобы скользили по внутренней поверхности статора практически без зазора. Авторы [20] считают, что эксфолиация происходит, в основном, когда частицы, проходя через отверстия в статоре, подвергаются воздействию лопастей. Мы предполагаем, что эксфолиация происходит в зазоре между лопастью и внутренней поверхностью статора. Крышка 5 обеспечивает устойчивый циркуляционный контур движения суспензии, которая поступает в зону обработки только через нижний торец статора, а выходит через отверстия. Расположение отверстий в верхней части статора обеспечивает максимальное время пребывания частиц в зоне контакта лопастей с внутренней поверхностью статора.

На жидкость и частицы, находящиеся в зоне между статором, вращающимся ротором и соседними лопастями, действуют центробежные силы. Под действием этих сил частицы прижимаются к внутренней поверхности статора, и окружная скорость их движения уменьшается. При попадании в зону между статором и движущейся лопастью на частицу начинают действовать сдвигающие силы, в результате действия

которых внутри частицы, кроме нормальных напряжений, возникают касательные напряжения, что приводит к сдвигу графеновых слоев относительно друг друга. Предположим, что частица состоит из пяти графеновых слоев. В результате сдвига из одной частицы образуются две. В рассматриваемом случае возможны следующие варианты: 1 слой + 4 слоя; 2 слоя + 3 слоя. По всей видимости, вероятности каждого из указанных вариантов одинаковы.

Методика проведения экспериментов. Исследования процесса эксфолиации проводили следующим образом. Готовили 5 литров водной суспензии кристаллического графита ГС-1 с концентрацией от 3 до 6 %, заливали ее в цилиндрическую емкость, устанавливали аппарат и начинали обработку суспензии. Каждые 10 минут останавливали процесс и отбирали 100 мл суспензии. Суспензию центрифугировали, удаляли осадок и определяли концентрацию графеновых наноструктур в оставшейся суспензии. После проведения анализа пробу выливали в емкость и продолжали процесс эксфолиации. Процесс продолжали до тех пор, пока концентрация графеновых структур прекращала возрастать. В процессе экспериментов изменяли скорость вращения ротора: 5000, 10000, 12000, 15000 об/мин. По окончании процесса эксфолиации проводили центрифугирование суспензии и уда-

ляли осадок. Очищенную суспензию использовали в качестве затворной воды при приготовлении бетонных образцов для испытаний на сжатие и изгиб. Испытания проводили в соответствии с методикой, описанной выше.

Результаты жидкофазной эксфолиации

При каждом сочетании скорости вращения ротора и концентрации графита в исходной суспензии по шесть раз готовили суспензию и каждый раз определяли промежуточные значения концентрации графеновых структур. На рис. 2 представлены характерные зависимости концентраций графеновых структур от времени обработки при разных исходных концентрациях графита в суспензии, для приготовления которой использовали статор-ротор смеситель с лопастями, скользящими по внутренней поверхности статора без зазора. Анализируя результаты, можно сделать вывод, что с увеличением исходной концентрации уменьшается время, за которое концентрация гра-

феновых структур достигает практически предельной величины – 1,7 мг/мл, однако следует учитывать, что одновременно увеличивается количество нерасщепленного графита.

Учитывая, что при уменьшении концентрации на 20 % (с 50 до 40 мг/мл) необходимое время обработки увеличивается на 75 %, а при увеличении концентрации на 20 % (с 50 до 60 мг/мл) время уменьшается всего на 25 %, принято решение в дальнейших исследованиях использовать исходную концентрацию графита 50 мг/мл. На рис. 3 показаны зависимости изменения концентрации графеновых структур от времени при разных скоростях вращения ротора. Из представленных зависимостей видно, что при скорости вращения ротора 5000 об/мин максимальная концентрация графеновых структур достигается за 50 мин, а при скоростях 10000, 12000 и 15000 об/мин – за 25–30 минут. С учетом данного факта было принято решение готовить суспензию при скорости вращения ротора 10000 об/мин.

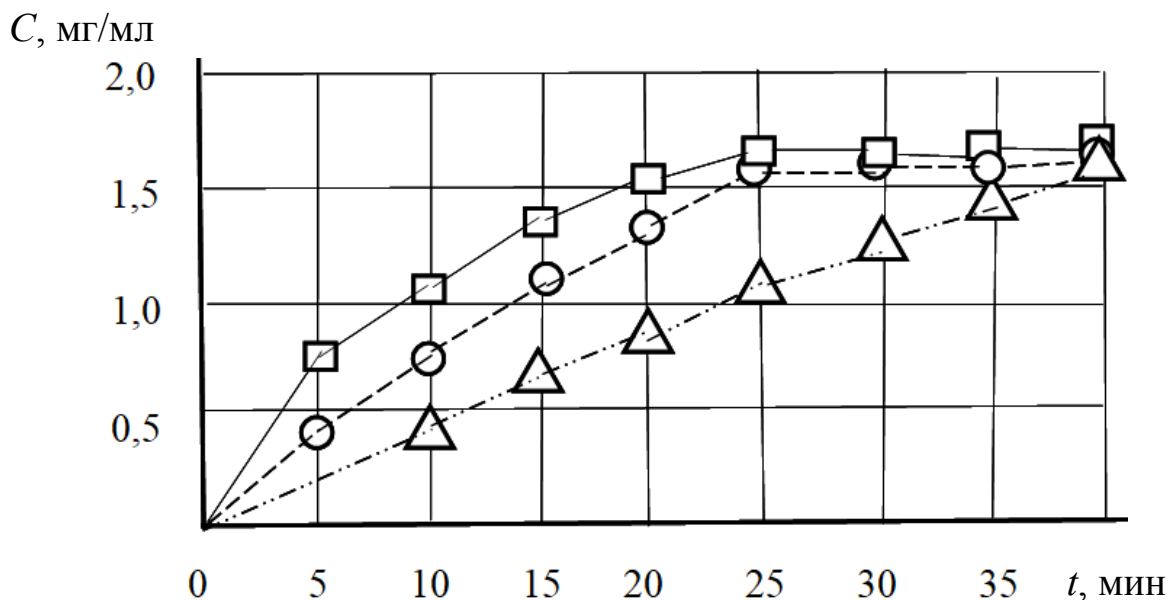


Рис. 2. Зависимость концентрации C графеновых структур от времени обработки при разных исходных концентрациях графита, мг/мл:

△ – 40; ○ – 50; □ – 60

Fig. 2. The dependence of the concentration C of graphene structures on the processing time at different initial concentrations of graphite, mg/ml:

△ – 40; ○ – 50; □ – 60

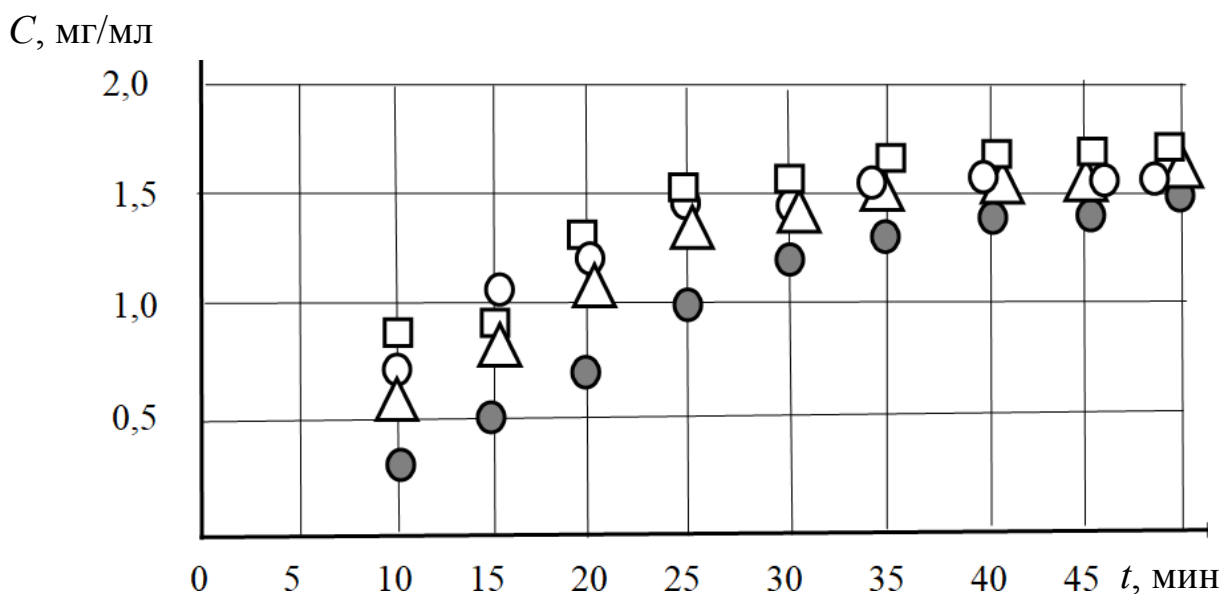


Рис. 3. Зависимости изменения концентрации C графеновых структур от времени при разных скоростях вращения ротора, об/мин:

● – 5000; ▲ – 10000; ○ – 12000; □ – 15000

Fig. 3. Dependences of graphene concentration changes C on time at different rotor revolution speed, rpm:

● – 5000; ▲ – 10000; ○ – 12000; □ – 15000

В работе [20] отмечается, что только порядка 0,1 % исходного графита удастся перевести в графеновые структуры, но с повторными эксфолиациями осадка, который образуется в результате центрифугирования, этот выход удастся поднять до 3 %. В результате анализа полученных результатов установлено, что в нашем случае удастся расщепить не менее 6 % исходного графита.

Были проведены исследования с меньшими объемами исходной суспензии (3 и 4 литра). Установлено, что время обработки до достижения максимальной концентрации графеновых структур (1,7 мг/мл) пропорционально объему обрабатываемой суспензии и составляет примерно 5 минут на один литр. Результаты проведенных исследований позволили определить параметры процесса, при которых гарантировано достигается концентрация 1,7 мг/мл за минимальное время: исходная концентрация графита – 50 мг/мл; скорость вращения ротора – 10000 об/мин.

На рис. 4 представлены результаты изменения концентрации графеновых структур от времени обработки для прототипа и предлагаемого аппарата.

Максимальная концентрация графеновых структур в суспензии при использовании прототипа составляет 0,8–1,0 мг/мл, что хорошо согласуется с результатами, полученными в работе [21]. По результатам, представленным на рис. 4, можно сделать выводы, что при использовании модернизированного статор-ротор смесителя концентрация графеновых структур в суспензии в 1,5–1,7 раза больше, чем при использовании прототипа, при одинаковом времени обработки суспензии. На рис. 5 представлены снимки графеновых структур в готовой суспензии, полученной при следующих параметрах: объем обрабатываемой суспензии – 5 литров; исходная концентрация графита – 50 мг/мл; скорость вращения ротора – 10000 об/мин; время обработки – 25 мин. Как видно из изображений, в результате

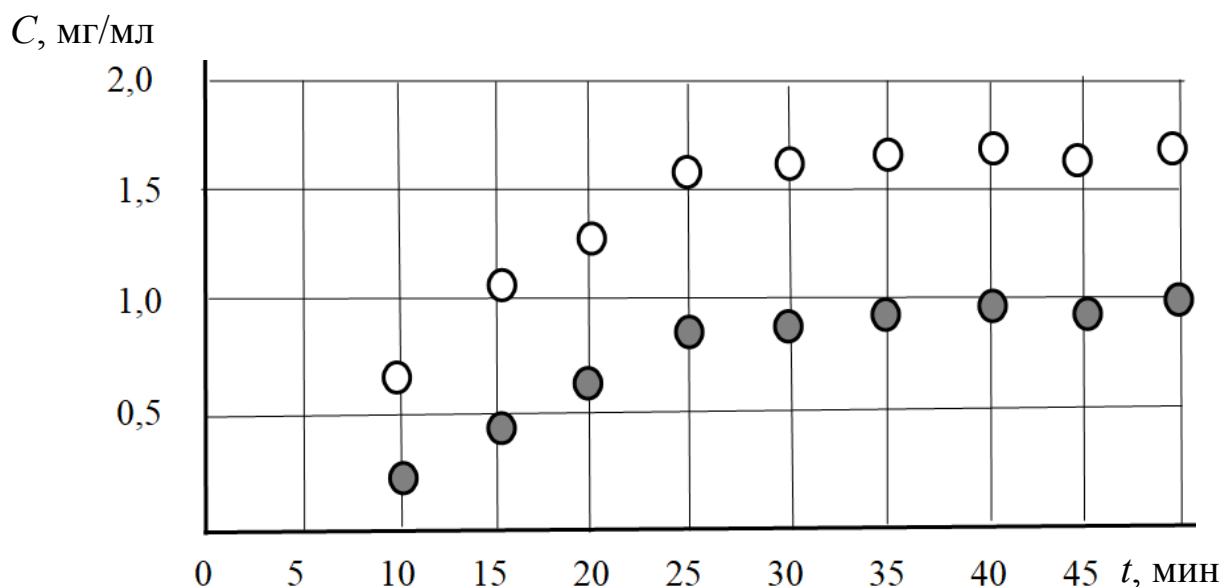


Рис. 4. Изменение концентрации графеновых структур в суспензии от времени обработки в установке-прототипе (●) и в предлагаемом аппарате (O)

Fig. 4. Processing time effect on the graphene concentration in suspension

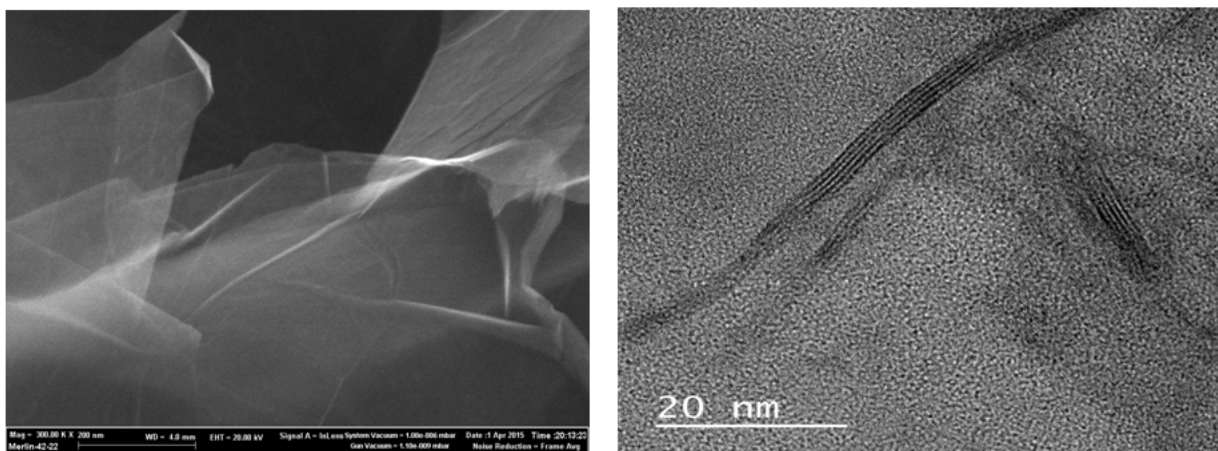


Рис. 5. СЭМ и ТЭМ изображения графена, полученного жидкофазной эксфолиацией графита

Fig. 5. SEM and TEM images of graphene obtained via liquid-phase graphite exfoliation

сдвиговой эксфолиации получены водные суспензии, содержащие малослойный графен, который по качеству и числу слоев сопоставим с малослойным графеном, производимым ООО «НаноТехЦентр» путем обработки ультразвуком предварительно окисленного графита по модифицированному методу Хамерса—Офемана.

Следует особо отметить, что суспензия, полученная сдвиговой эксфолиацией графита, неоднородна и содержит как малослойный графен, так и многослойный. Данный факт подтверждает рамановский спектр графеновых структур, полученных жидкофазной эксфолиацией графита (рис. 6).

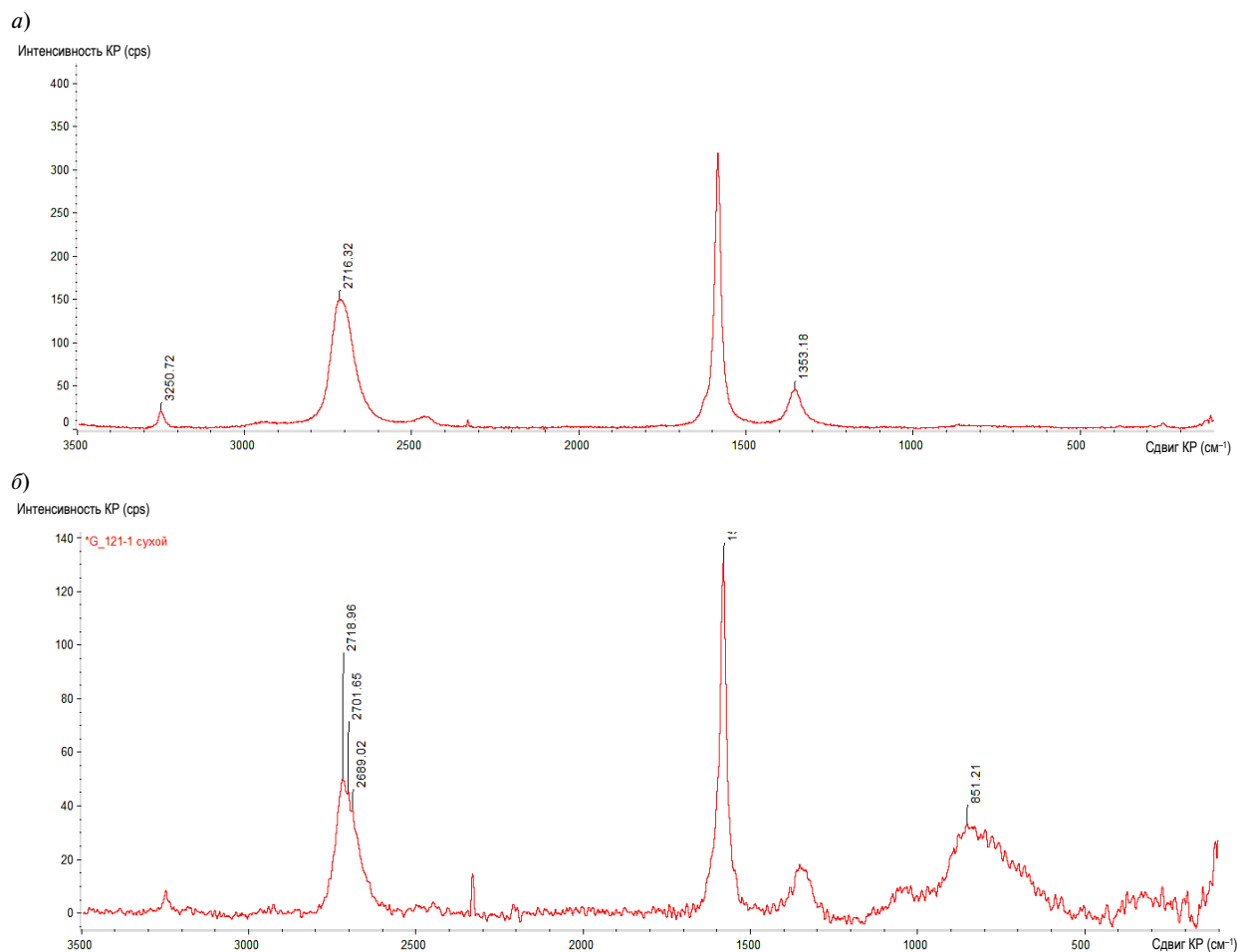


Рис. 6. Рамановские спектры: *а* – графит; *б* – сухой графен, полученный методом жидкофазной сдвиговой эксфолиации

Fig. 6. Raman spectra recorded for: *a* – graphite; *b* – dry graphene obtained via liquid-phase shear exfoliation

Из сравнения спектров следует, что в результате жидкофазной эксфолиации произошло смещение пика 2D и появились дополнительные пики 2701 и 2689 см^{-1} . Именно это смещение свидетельствует об образовании графеновых наноструктур [22, 23]. В частности, в работе [23] указывается, что пик 2696 см^{-1} характерен для двухслойного графена. Следует отметить, что достаточно сложно получить реальные (не искаженные) рамановские спектры для графена, полученного жидкофазной эксфолиацией, поскольку при сушке графеносодержащей водной суспензии происходит агрегация малослой-

ного графена и его содержание в пробе уменьшается. Учитывая это, эффективность данного способа получения графеновых наноструктур лучше оценивать по влиянию на улучшение эксплуатационных характеристик конкретных материалов при их модифицировании.

Испытания бетонных образцов

Готовые суспензии использовали при изготовлении бетонных образцов для испытаний. Концентрацию графеновых структур в воде, которую использовали при приготовлении бетона, изменяли от 0,4 до 1,5 мг/мл.



Испытания проводились на сжатие и изгиб. Для сжатия готовились бетонные кубики 100×100×100 мм из обычного портландцемента типа П, мелкого сухого песка, 10 мм гравия в отношении 1:2:3. Соотношение «вода : цемент» для всех партий было одинаковым – 0,57. Время смешивания бетона составляло 10 мин и формы подвергали вибрации в течение 6 мин, используя стандартную вибрационную машину. Кубы извлекались из формы через 24 часа после приготовления и помещались в воду на 7, 14 или 28 суток. Тесты проводились на стандартном прессе при скорости нагружения на образцы 1000 Н/с.

Балочки длиной 150 мм и с поперечными размерами 40×40 мм готовились по той же технологии, но скорость нагружения была 100 Н/с.

В результате испытаний установлено, что максимальное повышение прочности на сжатие и изгиб наблюдается при концентрациях 1 мг/мл. Дальнейшее увеличение концентрации не приводит к увеличению прочности. С учетом этого было принято решение рекомендовать данную концентрацию для модифицирования бетона графеновыми структурами, полученными путем жидкофазной сдвиговой эксфолиации графита. Экспериментально установлено, что при концентрации графено-

вых структур 1 мг/мл прочность на сжатие увеличивается в 1,7–2,5 раза, а на изгиб – в 1,2–1,5 раза. Следует отметить, что большие значения повышения прочности получены при модифицировании бетона класса В7,5, а меньшие – В20.

Выводы

Жидкофазная сдвиговая эксфолиация кристаллического графита позволяет получать графеносодержащие суспензии, повышающие прочность бетона на сжатие и изгиб. При содержании графеновых структур 1 мг/мл в воде, которая используется при приготовлении бетона, его прочность на сжатие повышается в 1,7–2,5 раза, а на изгиб – в 1,2 – 1,5 раза. Максимальная концентрация графеновых структур в суспензии (1,7 мг/мл) достигается за минимальное время при исходной концентрации графита 50 мг/мл и скорости вращения ротора 10000 об/мин.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки в приоритетных областях научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы» (Государственный договор № 14.577.21.0253, 2017, «Уникальный идентификатор прикладных научных исследований» RFMEFI57717X0253).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Al-Shiblawi K.A., Pershin V.F., Yartsev V.P. Modification of Epoxy Resins: Modern Condition and Prospects. Part I. Modification of Nanoparticles // *Advanced Materials & Technologies*. 2018. No 2. P. 68–78.
2. Gallego M.M., Bernal M.M., Hernandez M., Verdejo R., Lopez-Manchado M.A. Comparison of filler percolation and mechanical properties in graphene and carbon nanotubes filled epoxy nanocomposites // *Eur. Polym. J.* 2013. Vol. 49. P. 1347–1353.
3. Veerappan M., Shen M.C., Bih S.L. Three Dimensional Graphene Oxide-Carbon Nanotubes and Graphene-Carbon Nanotubes Hybrids // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2013. Vol. 8. No 10. P. 11641–11660.
4. Daniel R.B., Erika G.H., Ignacio M.G. Impressive Fatigue Life and Fracture Toughness Improvements in Graphene Oxide/Epoxy Composites // *Macromolecules*. 2012. Vol. 45. No 1. P. 238–245.
5. Hummers W.S., Offeman R.E. Preparation of Graphitic Oxide // *J. Am. Chem. Soc.* 1958. Vol. 80. No 6. P. 1339 –1339.
6. Daniela C.M., Dmitry V.K., Jacob M.B., Alexander S., Zhengzong S.S. [et al.]. Improved Synthesis of Graphene Oxide // *ACS Nano*. 2010. Vol. 4. No 8. P. 4806–4814.
7. Dorsa P., Sriya D., Tanvir Ahmed H.S., Fahmida I., Sanjoy B., Micah J.G. Dispersions of Non-Covalently Functionalized Graphene with Minimal Stabilizer // *ACS Nano*. 2012. Vol. 6. No 10. P. 8857–8867.
8. Li Y., Diyuan P., Shoubin C., Wang Q., Guangqin P., Wang T. In situ polymerization and mechanical, ther-

mal properties of polyurethane/graphene oxide/epoxy nanocomposites // Mater. Des. 2013. Vol. 47. P. 850–856.

9. Bindu Sharmila T.K., Ajalesh B. Nair, Beena T. Abraham, P.M. Sabura Beegum, Eby Thomas Thachil. Microwave exfoliated reduced graphene oxide epoxy nanocomposites for high performance applications // Polymer. 2014. No 55. P. 3614–3627.

10. Chen L., SongGang C., Kai L., Nanying N., Jian G., Qianfa L. [et al.]. Enhanced Epoxy/Silica Composites Mechanical Properties by Introducing Graphene Oxide to the Interface // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2012. Vol. 4. No 8. P. 4398–4404.

11. Lee J., Mahendra S., Alvarez P.J. Nanomaterials in the Construction Industry: A Review of Their Applications and Environmental Health and Safety Considerations // ACS Nano. 2010. Vol. 4 (7). P. 3580–3590.

12. Rawaz Kurda, José D Silvestre, Jorge de Brito. Toxicity and environmental and economic performance of fly ash and recycled concrete aggregates use in concrete // Journal Heliyon. 2018. No 1/4. P. e00611.

13. Gholampour A., Kiamahalleh M.V., Tran D.N.H., Ozbakkaloglu T., Losic D. Revealing the dependence of the physiochemical and mechanical properties of cement composites on graphene oxide concentration // RSC Adv. 2017. Vol. 7. P. 55148–55156.

14. Wengui Li, Xiangyu Li, Shu Jian Chen, Yan Ming Liu, Wen Hui Duan. Effects of graphene oxide on early-age hydration and electrical resistivity of Portland cement paste // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 78. P. 234–242.

15. Sedaghat A., Ram M.K., Zayed A., Kamal R., Shanahan N. Investigation of physical properties of graphene-cement composite for structural applications // Open J. Compos. Mater. 2014. Vol. 4. No 1.

16. Li Zhao, Xinli Guo, Yuanyuan Liu, Chuang Ge, Liping Guo, Xin Shu, Jiaping Liu. Synergistic effects of silica nanoparticles/polycarboxylate superplasticizer

modified graphene oxide on mechanical behavior and hydration process of cement composites // RSC Adv. 2017. No 7. P. 16688–16702.

17. Rafiee M.A., Narayanan T.N., Hashim D.P., Sakhavand N., Shahsavari R., Vajtai R., Ajayan P.M. Hexagonal Boron Nitride and Graphite Oxide Reinforced Multifunctional Porous Cement Composites // Advanced Functional Materials. 2013. No 23. P. 5624.

18. Mokhtar M.M., Abo-El-Eneinb S.A., Hassaanc M.Y., Morsya M.S., Khalila M.H., Babak F., Abolfazl H., Alimorad R., Parviz G. Enhancement of Physico-Mechanical Characteristics of Graphene Nano Sheets Reinforced Cement // International Journal of Emerging Research in Management & Technology. ISSN: 2278-9359. Volume-6, Issue-8. P. 79–84.

19. Панина Т.И., Ткачев А.Г., Михалева З.А. Влияние полифункционального наномодификатора на морозоустойчивость мелкозернистого бетона // Вестник ТГТУ. 2014. Т. 20. № 2. С. 349–355.

20. Keith R. Paton [et al.]. Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids // Nature materials. 2014. Vol. 13. P. 624–630.

21. Dimov D., Amit I., Gorrie O., Barnes M.D., Townsend N.J., Neves A.I.S., Withers F., Russo S., Felicia Cracium M. Ultrahigh Performance Nanoengineered Graphene–Concrete Composites for Multifunctional Applications // Adv. Funct. Mater. 2018, 1705183.

22. Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Hofmann M. Raman spectroscopy as a probe of graphene and carbon nanotubes // Phil. Trans. R. Soc. A. 2008. Vol. 366. P. 231–236.

23. Тимофеева Т.Е., Смагулова С.А., Попов В.И. Применение вейвлет-преобразования к задаче обнаружения и определения положений лоренцианов 2D полосы рамановского спектра двухслойного графена // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. Вып. 6. С. 834–838.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПЕРШИН Владимир Федорович — доктор технических наук профессор Тамбовского государственного технического университета

E-mail: pershin.home@mail.ru

АЛЬ-ШИБЛАВИ Карам Али — аспирант Тамбовского государственного технического университета

E-mail: eng.karamali@yahoo.com

БАРАНОВ Андрей Алексеевич — кандидат технических наук доцент Тамбовского государственного технического университета

E-mail: barr2@yandex.ru

ПАСЬКО Татьяна Владимировна — кандидат технических наук доцент Тамбовского государственного технического университета

E-mail: tpasko@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 31.10.2018



REFERENCES

- [1] Al-Shiblawi K.A., Pershin V.F., Yartsev V.P. Modification of Epoxy Resins: Modern Condition and Prospects. Part I. Modification of Nanoparticles. *Advanced Materials & Technologies*. 2018. No 2. P. 68–78.
- [2] Gallego M.M., Bernal M.M., Hernandez M., Verdejo R., Lopez-Manchado M.A. Comparison of filler percolation and mechanical properties in graphene and carbon nanotubes filled epoxy nanocomposites. *Eur. Polym. J.* 2013. Vol. 49. P. 1347–1353.
- [3] Veerappan M., Shen M.C., Bih S.L. Three Dimensional Graphene Oxide-Carbon Nanotubes and Graphene-Carbon Nanotubes Hybrids. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2013. Vol. 8. No 10. P. 11641–11660.
- [4] Daniel R.B., Erika G.H., Ignacio M.G. Impressive Fatigue Life and Fracture Toughness Improvements in Graphene Oxide/Epoxy Composites. *Macromolecules*. 2012. Vol. 45. No 1. P. 238–245.
- [5] Hummers W.S., Offeman R.E. Preparation of Graphitic Oxide. *J. Am. Chem. Soc.* 1958. Vol. 80. No 6. P. 1339–1339.
- [6] Daniela C.M., Dmitry V.K., Jacob M.B., Alexander S., Zhengzong S.S. [et al.]. Improved Synthesis of Graphene Oxide. *ACS Nano*. 2010. Vol. 4. No 8. P. 4806–4814.
- [7] Dorsa P., Sriya D., Tanvir Ahmed H.S., Fahmida I., Sanjoy B., Micah J.G. Dispersions of Non-Covalently Functionalized Graphene with Minimal Stabilizer. *ACS Nano*. 2012. Vol. 6. No 10. P. 8857–8867.
- [8] Li Y., Diyuan P., Shoubin C., Wang Q., Guangqin P., Wang T. In situ polymerization and mechanical, thermal properties of polyurethane/graphene oxide/epoxy nanocomposites. *Mater. Des.* 2013. Vol. 47. P. 850–856.
- [9] Bindu Sharmila T.K., Ajalesh B. Nair, Beena T. Abraham, P.M. Sabura Beegum, Eby Thomas Thachil. Microwave exfoliated reduced graphene oxide epoxy nanocomposites for high performance applications. *Polymer*. 2014. No 55. P. 3614–3627.
- [10] Chen L., SongGang C., Kai L., Nanying N., Jian G., Qianfa L. [et al.]. Enhanced Epoxy/Silica Composites Mechanical Properties by Introducing Graphene Oxide to the Interface. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2012. Vol. 4. No 8. P. 4398–4404.
- [11] Lee J., Mahendra S., Alvarez P.J. Nanomaterials in the Construction Industry: A Review of Their Applications and Environmental Health and Safety Considerations. *ACS Nano*. 2010. Vol. 4 (7). P. 3580–3590.
- [12] Rawaz Kurda, José D Silvestre, Jorge de Brito. Toxicity and environmental and economic performance of fly ash and recycled concrete aggregates use in concrete. *Journal Heliyon*. 2018. No 1/4. P. e00611.
- [13] Gholampour A., Kiamahalleh M.V., Tran D.N.H., Ozbakkaloglu T., Losic D. Revealing the dependence of the physiochemical and mechanical properties of cement composites on graphene oxide concentration. *RSC Adv*. 2017. Vol. 7. P. 55148–55156.
- [14] Wengui Li, Xiangyu Li, Shu Jian Chen, Yan Ming Liu, Wen Hui Duan. Effects of graphene oxide on early-age hydration and electrical resistivity of Portland cement paste. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 78. P. 234–242.
- [15] Sedaghat A., Ram M.K., Zayed A., Kamal R., Shanahan N. Investigation of physical properties of graphene-cement composite for structural applications. *Open J. Compos. Mater*. 2014. Vol. 4. No 1.
- [16] Li Zhao, Xinli Guo, Yuanyuan Liu, Chuang Ge, Liping Guo, Xin Shu, Jiaping Liu. Synergistic effects of silica nanoparticles/polycarboxylate superplasticizer modified graphene oxide on mechanical behavior and hydration process of cement composites. *RSC Adv*. 2017. No 7. P. 16688–16702.
- [17] Rafiee M.A., Narayanan T.N., Hashim D.P., Sakhavand N., Shahsavari R., Vajtai R., Ajayan P.M. Hexagonal Boron Nitride and Graphite Oxide Reinforced Multifunctional Porous Cement Composites. *Advanced Functional Materials*. 2013. No 23. P. 5624.
- [18] Mokhtar M.M., Abo-El-Eneinb S.A., Hassaane M.Y., Morsya M.S., Khalila M.H., Babak F., Abolfazl H., Alimorad R., Parviz G. Enhancement of Physico-Mechanical Characteristics of Graphene Nano Sheets Reinforced Cement. *International Journal of Emerging Research in Management & Technology*. ISSN: 2278-9359. Volume-6, Issue-8. P. 79–84.
- [19] Panina T.I., Tkachev A.G., Mikhaleva Z.A. Vliyaniye polifunktsionalnogo nanomodifikatora na morozoustoychivost melkozernistogo betona. *Vestnik TGTU*. 2014. T. 20. № 2. S. 349–355. (rus.)
- [20] Keith R. Paton [et al.]. Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids. *Nature materials*. 2014. Vol. 13. P. 624–630.
- [21] Dimov D., Amit I., Gorrie O., Barnes M.D., Townsend N.J., Neves A.I.S., Withers F., Russo S., Felicia Craciun M. Ultrahigh Performance Nanoengi-

neered Graphene–Concrete Composites for Multifunctional Applications. *Adv. Funct. Mater.* 2018, 1705183.

[22] **Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Hofmann M.** Raman spectroscopy as a probe of graphene and carbon nanotubes. *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2008. Vol. 366. P. 231–236.

[23] **Timofeeva T.E., Smagulova S.A., Popov V.I.** Primenenie wavelet-preobrazovaniya k zadache obnaruzheniya i opredeleniya polozheniy lorencianov 2D polosy Raman spectra dvuhsloynogo grafena, *Fizika i tehnika poluprovodnikov*. 2015. T. 49. № 6. S. 834–838. (rus.)

THE AUTHORS

PERSHIN Vladimir F. — *Tambov state technical university*

E-mail: pershin.home@mail.ru

AL-SHIBLAWI Karam A. — *Tambov state technical university*

E-mail: eng.karamali@yahoo.com

BARANOV Andreii A. — *Tambov state technical university*

E-mail: barr2@yandex.ru

PASKO Tatiiana V. — *Tambov state technical university*

E-mail: tpasko@yandex.ru

Received: 31.10.2018



DOI: 10.18721/JEST.25115
УДК 539.216

*А.А. Возняковский¹, Т.С. Кольцова², С.В. Кидалов¹,
О.В. Толочко², А.П. Возняковский³, А.Л. Кумсков⁴*

1 – Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

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

3 – Научно-исследовательский институт синтетического каучука, Санкт-Петербург, Россия

4 – Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

СИНТЕЗ ПОРОШКОВОГО ГИБРИДНОГО МАТЕРИАЛА СОСТАВА ДНА-МУНТ И ЕГО УСТОЙЧИВЫХ ВОДНЫХ НАНОЖИДКОСТЕЙ

По всему миру активно синтезируют и исследуют гибридные углеродные наноматериалы на базе углеродных нанотрубок (УНТ) и детонационных наноалмазов (ДНА). Мотивацией служит желание совместить в гибридном материале лучшие свойства ДНА и УНТ. Имея принципиально новые свойства, гибридные материалы могут применяться в различных областях промышленности – от микроэлектроники и биотехнологии до материаловедения. Однако большинство синтезированных на данный момент гибридных материалов состава ДНА-УНТ представляют собой пленки, что не позволяет использовать их во множестве перспективных применений, например в качестве наполнителей при создании композиционных материалов. В предлагаемой работе показана возможность синтеза гомогенного гибридного материала состава ДНА-УНТ в виде порошка, причем УНТ выращены на поверхности ДНА с помощью CVD метода (химическое осаждение из газовой фазы). Массовая доля УНТ составила 32 масс. %. Было установлено: УНТ равномерно покрывают поверхность агломератов ДНА, что оказывает сильное влияние на свойства гибридного материала. Также была получена устойчивая обратимая водная суспензия гибридного материала со средним размером частиц 50–60 нм. Разработанная методика синтеза гибридного материала состава ДНА-УНТ позволит расширить области применения таких материалов, а также экспериментально оценить их эффективность.

Ключевые слова: гибридный материал, детонационные наноалмазы, углеродные нанотрубки, порошок, наножидкости.

Ссылка при цитировании:

А.А. Возняковский, Т.С. Кольцова, С.В. Кидалов, О.В. Толочко, А.П. Возняковский, А.Л. Кумсков. Синтез порошкового гибридного материала состава ДНА-МУНТ и его устойчивых водных наножидкостей // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 155–162. DOI: 10.18721/JEST.25115.

*A.A. Vozniakovskii¹, T.S. Koltsova², S.V. Kidalov¹,
O.V. Tolochko², A.P. Voznyakovskii³, A.L. Kumskov⁴*

1 – Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

2 – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

3 – Institute of synthetic rubber, St. Petersburg, Russia

4 – National research center «Kurchatov institute», Moscow, Russia

SYNTHESIS OF HYBRID POWDER NANOMATERIAL CONSISTING OF DETONATION NANODIAMONDS/CARBON NANOTUBES AND ITS STABLE REVERSIBLE WATER NANOFLUIDS

Researchers around the world are actively synthesizing and exploring hybrid carbon nanomaterials based on carbon nanotubes (CNT) and detonation nanodiamonds (DND). The motivation for study of such materials is the desire to combine the best properties of DND and CNT in a hybrid material. Modern industry

can use hybrid materials in various areas of modern industry: from microelectronics and biomedicine to additives in composite materials. However, most of the currently synthesized hybrid materials of the DND–CNT composition are films, which makes it impossible to use them in many promising applications, for example, as additives in composite materials. This work shows the possibility of synthesizing a homogeneous hybrid material of the DNA–CNT composition in the form of powder by growing the CNT on the surface of the DNA using the CVD (chemical vapor deposition) method. Mass fraction of CNT was 32 wt. %. It was found that CNTs evenly cover the surface of DND agglomerates. A stable, reversible, aqueous suspension of a hybrid material with an average particle size of 50–60 nm was also obtained. The method of synthesis of the hybrid material with the DND–CNT composition, which we proposed in this work, will make it possible to expand the possible applications of such materials, as well as experimentally evaluate their effectiveness.

Keywords: hybrid materials, detonation nanodiamonds, carbon nanotubes, powder, nanofluids.

Citation:

A.A. Vozniakovskii, T.S. Koltsova, S.V. Kidalov, O.V. Tolochko, A.P. Voznyakovskii, A.L. Kumskov, Synthesis of hybrid powder nanomaterial consisting of detonation nanodiamonds/carbon nanotubes and its stable reversible water nanofluids, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 155–162, DOI: 10.18721/JEST.25115.

Введение

Развитие современной промышленности постоянно требует создания новых материалов со все более высокими характеристиками. Одним из наиболее перспективных направлений в решении этой задачи является создание композиционных материалов (КМ) [1]. Сочетая в КМ свойства исходной матрицы и модифицирующей добавки (наполнитель), можно получить новый материал с важными эксплуатационными свойствами. При создании КМ в качестве наполнителей активно используются углеродные наноматериалы, такие, как детонационные наноалмазы (ДНА) [2–4] и углеродные нанотрубки (УНТ) [5, 6].

Не менее перспективны в качестве наполнителей в КМ так называемые гибридные углеродные материалы, состоящие из двух или более видов наноуглеродов. Такие материалы могут демонстрировать синергетические свойства, что открывает новые перспективы использования КМ. Для синтеза гибридных материалов активно применяют методы PECVD (плазменно-химическое осаждение из газовой фазы) [7] и HFCVD (газофазное химическое осаждение с активацией горячей нитью) [8, 9], которые позволяют получать однородные гибридные материалы состава ДНА–УНТ. Одна-

ко синтезированные этими методами в указанных работах гибридные материалы представляют собой пленочные структуры, что делает невозможным их использование в качестве наполнителя при создании КМ в форме порошка или взвесей/суспензий.

В связи с этим для применения гибридных материалов ДНА–УНТ как в научных, так и в промышленных целях необходимо разработать методику синтеза, которая позволит получать большие объёмы материала в виде порошка, обеспечивая при этом его высокую однородность, что и является целью данной работы.

Методика синтеза

Для синтеза гибридного материала состава ДНА–УНТ мы использовали CVD метод по аналогии с работой [10], где на поверхности частиц алюминия, покрытых никелевым катализатором, были выращены углеродные нановолокна.

В качестве исходного материала были взяты ДНА марки «ТАН» производства СКТБ «Технолог» (Санкт-Петербург, Россия). На первой стадии на поверхность ДНА из водной фазы осаждался нитрат кобальта ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2$) и сушился в сушильном шкафу при температуре 100 °С. На второй стадии ДНА с осажженным нитратом кобальта отжигался при температуре

400 °C в течение 1 часа, добиваясь разложения нитрата кобальта до оксида кобальта (CoO). На третьей стадии порошок ДНА отжигался в атмосфере водорода (H₂) в течение 2 часов при температуре 750 °C с целью восстановления оксида кобальта до чистого кобальта (Co). Концентрация кобальта составила 0,02 масс. %. На последней стадии на поверхностях ДНА, покрытых кобальтом, который выступал в качестве металла-катализатора, выращивались УНТ методом CVD. В качестве источника углерода использовался ацетилен. Концентрация УНТ в гибридном материале составила 32 масс. %.

Методы исследования

Исследование структуры образцов проводилось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Supra55VP-3259 (Zeiss, Германия) и просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) Osiris (FEI, США). Рентгеноструктурные исследования проводились на приборе XRD-7000 (Shimadzu, Япония) CuK α ($\lambda = 0,154051$ нм). Рамановские исследования проводились на приборе Horiba Yobin Yvon LabRam HR 800 (лазер 532 нм) (HORIBA Scientific, Япония). Измерение размера частиц

проводили методом динамического рассеяния света (DLS) на приборе ZetaSizer Nano ZS Malvern (США) и методом лазерной дифракции на приборе MasterSizer 2000 (США). Измерение электропроводности и дзета-потенциала проводили методом DLS на приборе ZetaSizer Nano ZS Malvern (США).

Результаты и обсуждение

Синтезированный материал представлял собой высокодисперсный порошок черного цвета. Несмотря на то, что в виде порошка ДНА представляют собой крупные пористые агрегаты размером до нескольких десятков микрон, методика нанесения металла-катализатора через водную фазу позволила нам осаждать катализатор на всю поверхность устойчивых агломератов ДНА со средним размером 10–100 нм, из которых и состоят агрегаты. Равномерность же распределения УНТ по поверхности агломератов ДНА зависит от однородности распределения металла-катализатора по поверхности частиц исходного порошка, как показано в [11].

На рис. 1 представлены микрофотографии синтезированного гибридного материала.

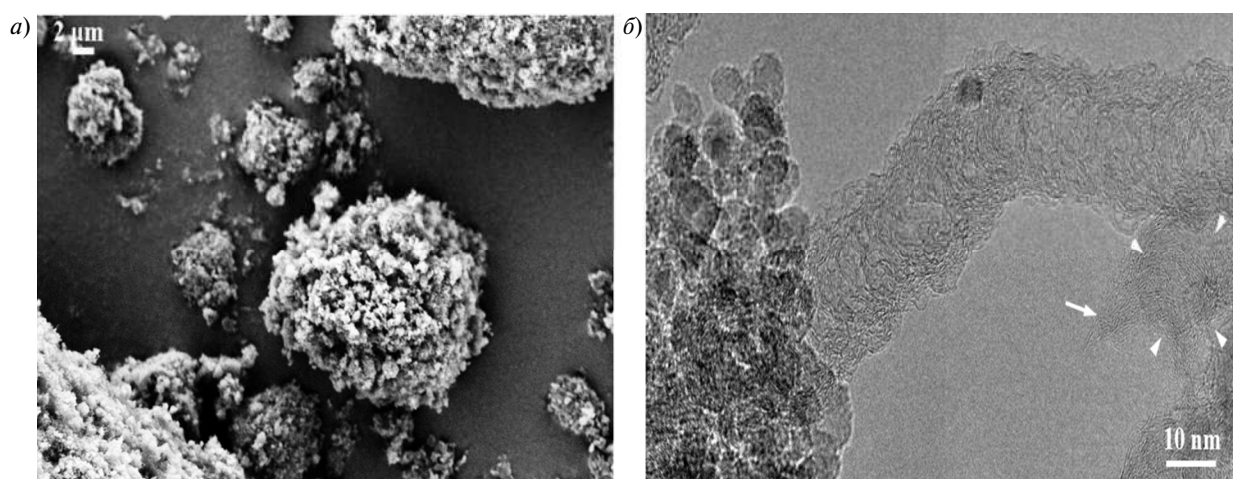


Рис. 1. Изображения гибридного материала состава ДНА-УНТ: *а* – СЭМ изображение гибридного материала; линейная шкала равна 2 мкм; *б* – ПЭМ изображение гибридного материала; линейная шкала равна 10 нм

Fig. 1. Images of the hybrid material of the composition of the DNA-CNT: *a* – SEM image of the hybrid material; linear scale equal to 2 microns; *b* – TEM image of the hybrid material, the linear scale is 10 nm

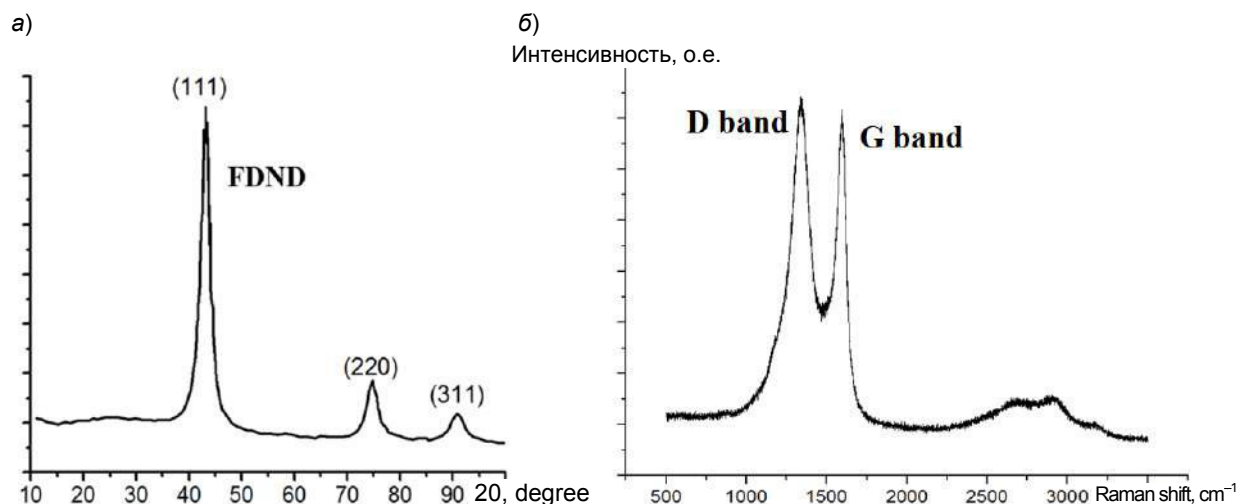


Рис. 2. Результаты рентгеноструктурного анализа (а) и спектроскопии комбинационного анализа (б) FDND
Fig. 2. Results of X-ray (a) and Raman (b) studies of FDND

На рис. 1, а представлено СЭМ изображение гибридного материала. Видно, что УНТ равномерно покрывают агломераты ДНА, обеспечивая высокую гомогенность гибридного материала. В виде порошка эти агломераты агрегируют и образуют частицы размером около 10 мкм. На рис. 1, б представлено ПЭМ изображение гибридного материала. Виден агломерат ДНА, состоящий из частиц ДНА размером 4–8 нм, к поверхности которого прикреплена бамбуковидная многостенная УНТ. Подобные многостенные УНТ наблюдались в исследовании [12]. Также на рис. 1, б белыми стрелками обозначена УНТ, ось которой направлена параллельно электронному лучу, что позволяет увидеть плоскости графита в виде концентрических окружностей. Таким образом, рис. 1 показывает, что УНТ полностью покрывают поверхность ДНА. В дальнейшем полученный гибридный материал будет обозначаться как FDND.

Измерение удельной площади поверхности по методу БЭТ показало, что у исследуемого образца она составляет 225 м²/г. Полученное значение хорошо согласуется с относительно небольшим значением удельной поверхности, характерным для многостенных УНТ. В [13], например, было исследовано 10 образцов мно-

гостенных УНТ и показано, что у большинства из них удельная площадь поверхности не превышает 200 м²/г. Такие низкие значения удельной поверхности многостенных УНТ обусловлены сильной зависимостью этого показателя от количества слоев УНТ. В работе [14] показано, что УНТ, состоящие из 15 и более слоев, имеют удельную поверхность менее 150 м²/г.

Объем пор в образце FDND в зависимости от их размера оказался следующим:

Тип пор (размер пор)	Объем в порах, см³/г
Микропоры (менее 2 нм).....	0,01393
Мезопоры (2–50 нм).....	0,44737
Макропоры (более 50 нм).....	0,20358
Итого.....	0,66488

Гибридный материал был исследован методами рентгеноструктурного анализа (X-RAY) и спектроскопии комбинационного анализа (Raman).

На рис. 2, а четко видны три пика, соответствующих алмазу, что свидетельствует о наличии ДНА в гибридном материале. Для оценки качества синтезированных многостенных УНТ были проведены рамановские исследования образцов FDND. На рис. 2, б представлен типичный рамановский спектр полученных образцов. Он аналогичен спектрам наблюдаемых в [15] многостенных УНТ. Соотношение

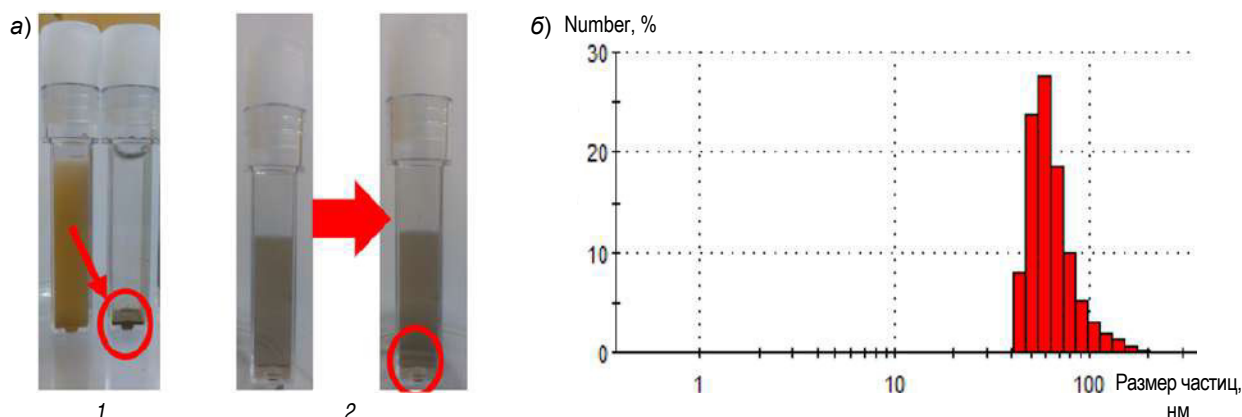


Рис. 3. Водные суспензии FDND: *a* – результаты исследования устойчивости суспензии исходного ДНА (1) и FDND (2) сразу после УЗ обработки и после 72 часов отстаивания; *б* – результаты исследования размеров частиц водной суспензии FDND

Fig. 3. Water suspensions of FDND: *a* – results of a study of the stability of the suspension of the initial DND (1) and FDND (2) immediately after the ultrasonic treatment and after 72 hours of settling; *б* – the results of the study of the particle size of an water suspension of FDND

пиков D и G составляет примерно 1:1. В работе [16] было показано, что подобное соотношение интенсивностей типично для многостенных УНТ, выращенных методами CVD и CCVD, и свидетельствует о большом количестве структурных дефектов в таких многостенных УНТ.

Из полученного порошка была приготовлена водная суспензия путем ультразвукового (УЗ) облучения. Концентрация FDND в суспензии составила 1 масс. %. На рис. 3 представлены результаты исследования устойчивости водной суспензии FDND и определение размера частиц методом DLS.

Из рис. 3, *a*, 2 видно, что, в отличие от исходного ДНА (рис. 3, *a* 1), порошок FDND образует устойчивую водную суспензию. При этом признаки выпадения осадка в водной суспензии ДНА не наблюдались даже после отстаивания в течение 20 дней. Этот факт является неожиданным, учитывая гидрофобный характер УНТ. Такая устойчивость может быть объяснена тем, что во время технологического цикла восстановления оксида кобальта до чистого кобальта в атмосфере водо-

рода происходит гидрирование поверхности ДНА, за счет чего гибридный материал становится стабильным в воде даже после синтеза гидрофобных многостенных УНТ на поверхности ДНА. Возможность стабилизации суспензий ДНА путем гидрирования его поверхности была показана в [17]. Отсутствие осадка в нашем случае доказывает, что многостенные УНТ прочно связаны с поверхностью ДНА и не отрываются под воздействием УЗ облучения.

Установлено также, что после сушки суспензии FDND до порошка возможно обратимо получать устойчивую водную суспензию FDND путем легкой УЗ обработки. При воздействии УЗ облучения агрегаты FDND микронных размеров, имеющиеся в сухом порошке (см. рис. 1), дезагрегируют до устойчивых в воде частиц размером 50–60 нм, что показано на рис. 3, *б*.

Заключение

Разработана методика синтеза гибридного материала состава ДНА-УНТ, основанная на выращивании УНТ на поверхности агломера-

тов ДНА методом CVD. Данная методика позволяет синтезировать гомогенный гибридный материал в виде порошка, а также в виде стабильной обратимой водной суспензии. Благодаря масштабируемости предложенного метода получения гибридного материала, открывается реальная возможность исследования влияния

гибридного материала на свойства КМ и внедрения их в промышленность.

Работа выполнена в рамках государственных тематических исследований ФТИ им. А. Ф. Иоффе по теме № 0040-2014-0013 «Физико-химические основы технологии новых функциональных материалов на основе углеродных наноструктур».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудской А.И., Волков К.Н., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Физические процессы и технологии получения металлических порошков из расплава. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. 610 с.
2. Mochalin V.N., Gogotsi Y. Nanodiamond-polymer composites // *Diamond Relat. Mater.* 2015. Vol. 58. P. 161–171.
3. Woo D.J., Heer F.C., Brewer L.N., Hooper J.P., Osswald S. Synthesis of nanodiamond-reinforced aluminum metal matrix composites using cold-spray deposition // *Carbon*. 2015. Vol. 86. P. 15–25.
4. Livramento V., Correia J.B., Shohoji N., Osawa E. Nanodiamond as an effective reinforcing component for nano-copper // *Diamond Relat. Mater.* 2007. Vol. 16(2). P. 202–204.
5. Moghadam D., Omrani E., Menezes P.L., Rohatgi P.K. Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene—a review // *Composites Part B*. 2015. Vol. 77. P. 402–420.
6. Mittal G., Dhand V., Rhee K.Y., Park S.J., Lee W.R. A review on carbon nanotubes and graphene as fillers in reinforced polymer nanocomposites // *Ind. Eng. Chem.* 2015. Vol. 21. P. 11–25.
7. Xiao X., Elam J.W., Trasobares S., Auciello O., Carlisle J.A. Synthesis of a Self-Assembled Hybrid of Ultrananocrystalline Diamond and Carbon Nanotubes // *Adv. Mater.* 2005. Vol. 17(12). P. 1496–1500.
8. Yang Q., Xiao C., Chen W., Hirose A. Selective growth of diamond and carbon nanostructures by hot filament chemical vapor deposition // *Diamond Relat. Mater.* 2004. Vol. 13(3). P. 433–437.
9. Shankar N., Glumac N.G., Yu M.F., Vanka S.P. Growth of nanodiamond/carbon-nanotube composites with hot filament chemical vapor deposition // *Diamond Relat. Mater.* 2008. Vol. 17(1). P. 79–83.
10. Kol'tsova T.S., Shakhov F.M., Voznyakovskii A.A., Lyashkov A.I., Tolochko O.V., Nasibulin A.G., Mikhailov V.G. Fabrication of a compacted aluminum-carbon nanofiber material by hot pressing // *Tech. Phys.* 2014. Vol. 59(11). P. 1626–1630.
11. He C.N., Zhao N.Q., Shi C.S., Song S.Z. Mechanical properties and microstructures of carbon nanotube-reinforced Al matrix composite fabricated by in situ chemical vapor deposition // *J. Alloys Comp.* 2009. Vol. 487. P. 258–262.
12. Baaziz W., Melinte G., Ersen O., Pham-Huu C., Janowska I. Effect of nitriding/nanostructuring of few layer graphene supported iron-based particles; catalyst in graphene etching and carbon nanofilament growth // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2014. Vol. 59(16). P. 15988–15993.
13. Poulsen S.S., Jackson P., Kling K., Knudsen K.B., Skaug V., Kyjovska Z.O., Thomsen B.L., Clausen P.A., Atluria R., Berthling T., Bengtson S., Wolffe H., Jensen K.A., Wallinad H., Vogel U. Multi-walled carbon nanotube physicochemical properties predict pulmonary inflammation and genotoxicity // *Nanotoxicology*. 2016. Vol. 10(9). P. 1263–1275.
14. Bokobza L., Zhang J. Raman spectroscopic characterization of multiwall carbon nanotubes and of composites // *eXPRESS Polym. Lett.* 2012. Vol. 6 (7). P. 601–608.
15. Ivanova M.V., Lamprecht C., Loureiro M.J., Huzil J.T., Foldvari M. Pharmaceutical characterization of solid and dispersed carbon nanotubes as nanoexcipients // *Int. J. Nanomed.* 2012. No 7. P. 403–415.
16. Neverovskaya Y., Voznyakovskii A.P., Dolmatov V.Y. Structure of the dispersive medium and sedimentation resistance of suspensions of detonation nanodiamonds // *Phys. Solid State*. 2004. Vol. 46(4). P. 662–664.
17. Williams O.A., Hees J., Dieker C., Jäger W., Kirste L., Nebel C.E. Size-Dependent Reactivity of Diamond Nanoparticles // *ACS nano*. 2010. Vol. 4(8). P. 4824–4830.



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВОЗНЯКОВСКИЙ Алексей Александрович — младший научный сотрудник Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе

E-mail: alexey_inform@mail.ru

КОЛЬЦОВА Татьяна Сергеевна — кандидат технических наук инженер Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: annelet@yandex.ru

КИДАЛОВ Сергей Викторович — кандидат физико-математических наук старший научный сотрудник Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе

E-mail: kidalov@mail.ioffe.ru

ТОЛОЧКО Олег В. — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: ol_tol@hotmail.com

ВОЗНЯКОВСКИЙ Александр Петрович — доктор химических наук заведующий сектором Научно-исследовательского института синтетического каучука

E-mail: voznap@mail.ru

КУМСКОВ Александр Леонидович — старший научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

E-mail: faneva@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 16.01.2019

REFERENCES

- [1] Rudskoy A.I., Volkov K.N., Kondratiev S.Yu., Sokolov Yu.A. Physical processes and technologies for obtaining metal powders from the melt. SPb.: Polytechnic Publishing House. University, 2018. 610 s. (rus.)
- [2] Mochalin V.N., Gogotsi Y. Nanodiamond—polymer composites. *Diamond Relat. Mater.* 2015. Vol. 58. P. 161–171.
- [3] Woo D.J., Heer F.C., Brewer L.N., Hooper J.P., Osswald S. Synthesis of nanodiamond-reinforced aluminum metal matrix composites using cold-spray deposition. *Carbon*. 2015. Vol. 86. P. 15–25.
- [4] Livramento V., Correia J.B., Shohoji N., Osawa E. Nanodiamond as an effective reinforcing component for nano-copper. *Diamond Relat. Mater.* 2007. Vol. 16(2). P. 202–204.
- [5] Moghadam D., Omrani E., Menezes P.L., Rohatgi P.K. Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene—a review. *Composites Part B*. 2015. Vol. 77. P. 402–420.
- [6] Mittal G., Dhand V., Rhee K.Y., Park S.J., Lee W.R. A review on carbon nanotubes and graphene as fillers in reinforced polymer nanocomposites. *Ind. Eng. Chem.* 2015. Vol. 21. P. 11–25.
- [7] Xiao X., Elam J.W., Trasobares S., Auciello O., Carlisle J.A. Synthesis of a Self-Assembled Hybrid of Ultrananocrystalline Diamond and Carbon Nanotubes. *Adv. Mater.* 2005. Vol. 17(12). P. 1496–1500.
- [8] Yang Q., Xiao C., Chen W., Hirose A. Selective growth of diamond and carbon nanostructures by hot filament chemical vapor deposition. *Diamond Relat. Mater.* 2004. Vol. 13(3). P. 433–437.
- [9] Shankar N., Glumac N.G., Yu M.F., Vanka S.P. Growth of nanodiamond/carbon-nanotube composites with hot filament chemical vapor deposition. *Diamond Relat. Mater.* 2008. Vol. 17(1). P. 79–83.
- [10] Kol'tsova T.S., Shakhov F.M., Voznyakovskii A.A., Lyashkov A.I., Tolochko O.V., Nasibulin A.G., Mikhailov V.G. Fabrication of a compacted aluminum-carbon nanofiber material by hot pressing. *Tech. Phys.* 2014. Vol. 59(11). P. 1626–1630.
- [11] He C.N., Zhao N.Q., Shi C.S., Song S.Z. Mechanical properties and microstructures of carbon nanotube-reinforced Al matrix composite fabricated by in situ chemical vapor deposition. *J. Alloys Comp.* 2009. Vol. 487. P. 258–262.
- [12] Baaziz W., Melinte G., Ersen O., Pham-Huu C., Janowska I. Effect of nitriding/nanostructuring of few

layer graphene supported iron-based particles; catalyst in graphene etching and carbon nanofilament growth. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2014. Vol. 59(16). P. 15988–15993.

[13] Poulsen S.S., Jackson P., Kling K., Knudsen K.B., Skaug V., Kyjovska Z.O., Thomsena B.L., Clausena P.A., Atluria R., Berthinga T., Bengtsona S., Wolffe H., Jensena K.A., Wallinad H., Vogel U. Multi-walled carbon nanotube physicochemical properties predict pulmonary inflammation and genotoxicity. *Nanotoxicology*. 2016. Vol. 10(9). P. 1263–1275.

[14] Bokobza L., Zhang J. Raman spectroscopic characterization of multiwall carbon nanotubes and of composites. *eXPRESS Polym. Lett.* 2012. Vol. 6 (7). P. 601–608.

[15] Ivanova M.V., Lamprecht C., Loureiro M.J., Huzil J.T., Foldvari M. Pharmaceutical characterization of solid and dispersed carbon nanotubes as nanoexcipients. *Int. J. Nanomed.* 2012. No 7. P. 403–415.

[16] Neverovskaya Y., Voznyakovskii A.P., Dolmatov V.Y. Structure of the dispersive medium and sedimentation resistance of suspensions of detonation nanodiamonds. *Phys. Solid State*. 2004. Vol. 46(4). P. 662–664.

[17] Williams O.A., Hees J., Dieker C., Jäger W., Kirste L., Nebel C.E. Size-Dependent Reactivity of Diamond Nanoparticles. *ACS nano*. 2010. Vol. 4(8). P. 4824–4830.

THE AUTHORS

VOZNIAKOVSKII Aleksei A. — *Ioffe institute*

E-mail: alexey_inform@mail.ru

KOLTSOVA Tatiiana S. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: annelet@yandex.ru

KIDALOV Sergei V. — *Ioffe institute*

E-mail: kidalov@mail.ioffe.ru

TOLOCHKO Oleg V. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: ol_tol@hotmail.com

VOZNYAKOVSKII Aleksandr P. — *Institute of synthetic rubber*

E-mail: voznep@mail.ru

KUMSKOV Aleksandr L. — *National research center «Kurchatov institute»*

E-mail: faneva@mail.ru

Received: 16.01.2019



DOI: 10.18721/JEST.25116
УДК 539.2-022.532

Т.П. Дьячкова¹, Д.В. Таров², Д.Е. Кобзев¹

1 – Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия

2 – ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Показана эффективность применения добавок функционализированных стеаратом титана углеродных нанотрубок (УНТ) для модифицирования термостойкого полиэтилена РЕ-РТ. Для этого были определены прочностные характеристики, твердость по Шору, термическая стабильность, тепло- и температуропроводность композитов РЕ-РТ с техническим углеродом, исходными и функционализированными нанотрубками при различных концентрациях модификаторов. Показано слабое влияние углеродных наполнителей (0,01–1,5 масс. %) на величины коэффициентов тепло- и температуропроводности. Установлено, что улучшение физико-механических показателей композитов наблюдается при концентрациях исходных и функционализированных УНТ, равных соответственно 1–1,5 и 0,01–0,1 масс. %. Применение функционализированных стеаратом титана УНТ позволяет увеличить твердость по Шору на 7 единиц, устойчивость к весовому износу – на 54 %, прочностные характеристики – на 8–12 %, а также снизить суточное влагопоглощение до нуля. Таким образом, данный способ функционализации позволяет снизить расходные нормы УНТ на порядок и более при устойчивом положительном влиянии на свойства полиэтиленовых композитов.

Ключевые слова: функционализация, углеродные нанотрубки, полиэтилен, композит, физико-механические свойства, стеарат-титанатные группы.

Ссылка при цитировании:

Т.П. Дьячкова, Д.В. Таров, Д.Е. Кобзев. Исследование свойств полиэтиленовых композитов на основе функционализированных углеродных нанотрубок // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 163–173. DOI: 10.18721/JEST.25116.

T.P. Dyachkova¹, D.V. Tarov², D.E. Kobzev¹

1 – Tambov State Technical University, Tambov, Russia

2 – «Nanotechcenter» Ltd, Tambov, Russia

STUDY OF PROPERTIES OF POLYETHYLENE COMPOSITES BASED ON FUNCTIONALIZED CARBON NANOTUBES

The efficiency of using additives of carbon nanotubes (CNTs) functionalized by titanium stearate for modification of heat-resistant polyethylene PE-RT is shown. For this purpose, we have determined strength characteristics, Shore hardness, thermal stability, thermal conductivity and thermal diffusivity of PE-RT composites with technical carbon, raw and functionalized nanotubes at different concentrations of modifiers. The influence of carbon fillers (0.01–1.5 mass. %) on the values of thermal conductivity coefficients and thermal diffusivity is weak. Physical and mechanical properties of composites have been observed to improve at the concentrations of raw and functionalized CNTs equal to 1–1.5 and 0.01–0.1 mass. % respectively. Application of CNTs functionalized by titanium stearate allows to increase Shore hardness by 7 units, resistance to weight wear by 54%, strength characteristics by 8–12 %, as well as to reduce daily moisture absorption to zero. Thus, this method of functionalization reduces the consumption rate of CNTs by an order of magnitude and more with a stable positive effect on the properties of polyethylene composites.

Keywords: functionalization, carbon nanotube, polyethylene, composites, physico-mechanical properties, stearate-titanate groups.

Citation:

T.P. Dyachkova, D.V. Tarov, D.E. Kobzev, Study of properties of polyethylene composites based on functionalized carbon nanotubes, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 163–173, DOI: 10.18721/JEST.25116.

Введение

Ковалентная и нековалентная функционализации углеродных нанотрубок (УНТ) — один из общепринятых методов решения проблемы распределения УНТ в полимерах и растворителях [1–3]. Например, для модифицирования эпоксидных связующих успешно используются УНТ с кислородсодержащими [4, 5] и азотсодержащими [6, 7] группами. Для использования в составе композитов на основе полиэтилена (ПЭ) подходят функционализированные УНТ, обладающие сродством к неполярным матрицам. В частности, эффективными модификаторами ПЭ являются алкилированные [8], фторированные [9] и силанизированные [10] УНТ. Однако реализация представленных методов функционализации УНТ технологически сложна из-за большого количества стадий, использования дорогостоящих и/или токсичных реагентов. Более экологичным и экономичным является описанный в [11–13] способ функционализации стеаратом титана, способствующий получению олеофильных УНТ.

Целью настоящей работы было исследование эффективности применения добавок функционализированных стеаратом титана УНТ для модифицирования термостойкого полиэтилена PE-RT. Для этого были определены прочностные характеристики, твердость по Шору, термическая стабильность, тепло- и температуропроводность композитов PE-RT с техническим углеродом, исходными и функционализированными нанотрубками при различных концентрациях модификаторов.

Материалы и методы

В работе использованы углеродные многослойные цилиндрические углеродные нанотрубки «Таунит-М» производства ООО «Нанотехцентр» (Россия, г. Тамбов) диаметром 10–20 нм, длиной не менее 2 мкм, полученные CVD-методом на катализаторе Co-Mo/Mg-Al. Их

функционализацию стеарат-титанатными группами осуществляли по методике [11]. Для этого сначала 10 г УНТ подвергали обработке в 500 мл концентрированной азотной кислоты (квалификации «хч») при 110 °С в течение 5 часов, после чего промывали на фильтре дистиллированной водой до нейтрального *pH*. При этом была получена 40 %-ная (масс.) водная паста карбоксилированных УНТ с содержанием COOH-групп, равным (по данным титриметрии) 0,6 ммоль/г. К ней было добавлено 1,5 г триэтаноламина и 200 мл дистиллированной воды, после чего смесь механически перемешивали до образования однородной суспензии, обрабатывали ультразвуком на установке ИЛ-100 в течение 0,5 часа и охлаждали. Затем в нее при перемешивании было добавлено 100 мл раствора, содержащего 7 г триэтаноламинтитаната, и 150 мл раствора, содержащего 11 г стеариновой кислоты и 6,5 г триэтаноламина. Полученную смесь перемешивали в течение 2 часов. Одновременно в нее пропускали углекислый газ со скоростью 1 л/мин. По окончании процесса продукт представлял собой осадок, который промывали на фильтре дистиллированной водой и высушивали в вакуумном сушильном шкафу при 80 °С до прекращения потери массы. В результате было получено 22,2 г функционализированных УНТ, в которых массовая доля стеарата титана составила около 55 %.

ПЭМ-изображения (полученные на просвечивающем электронном микроскопе Jeol JEM 2100) исходных и функционализированных УНТ представлены на рис. 1. В последнем случае на поверхности нанотрубок идентифицирован модифицирующий слой стеарата титана толщиной до 2 нм.

Усиление пика D (при $\sim 1300 \text{ см}^{-1}$) относительно G (при $\sim 1500 \text{ см}^{-1}$) на спектрах КР (рис. 2) функционализированных УНТ по сравнению с исходными обусловлено тем, что алкильные группы стеарата титана образованы атомами углерода в sp^3 -состоянии.

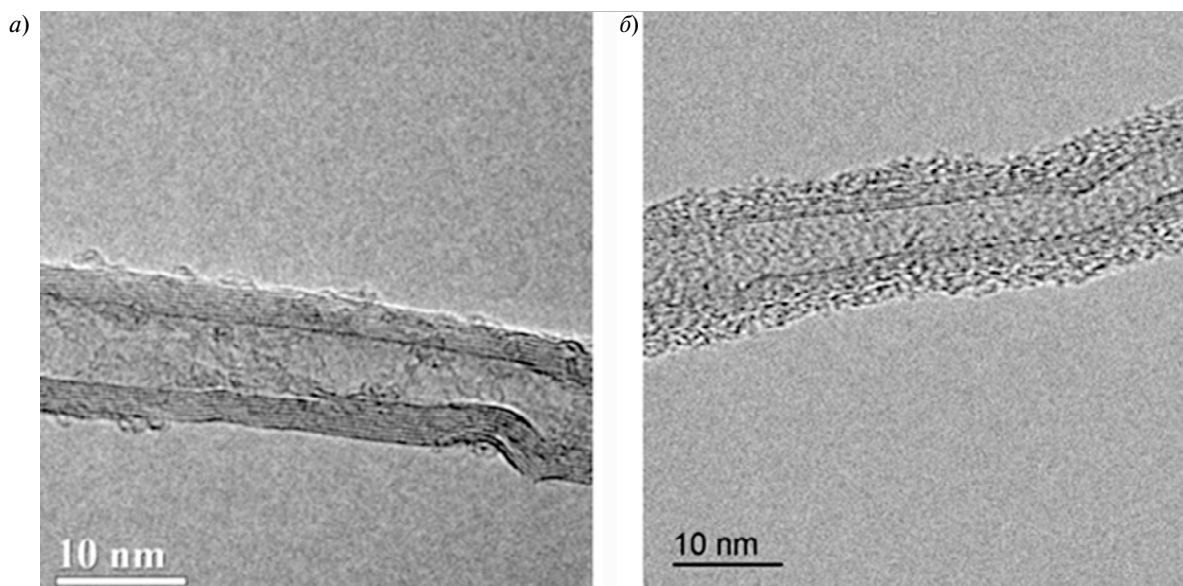


Рис. 1. ПЭМ-изображения исходных (а) и функционализированных стеаратом титана (б) УНТ
 Fig. 1. TEM-images of the raw (a) and functionalized by titanium stearate (b) SNTs

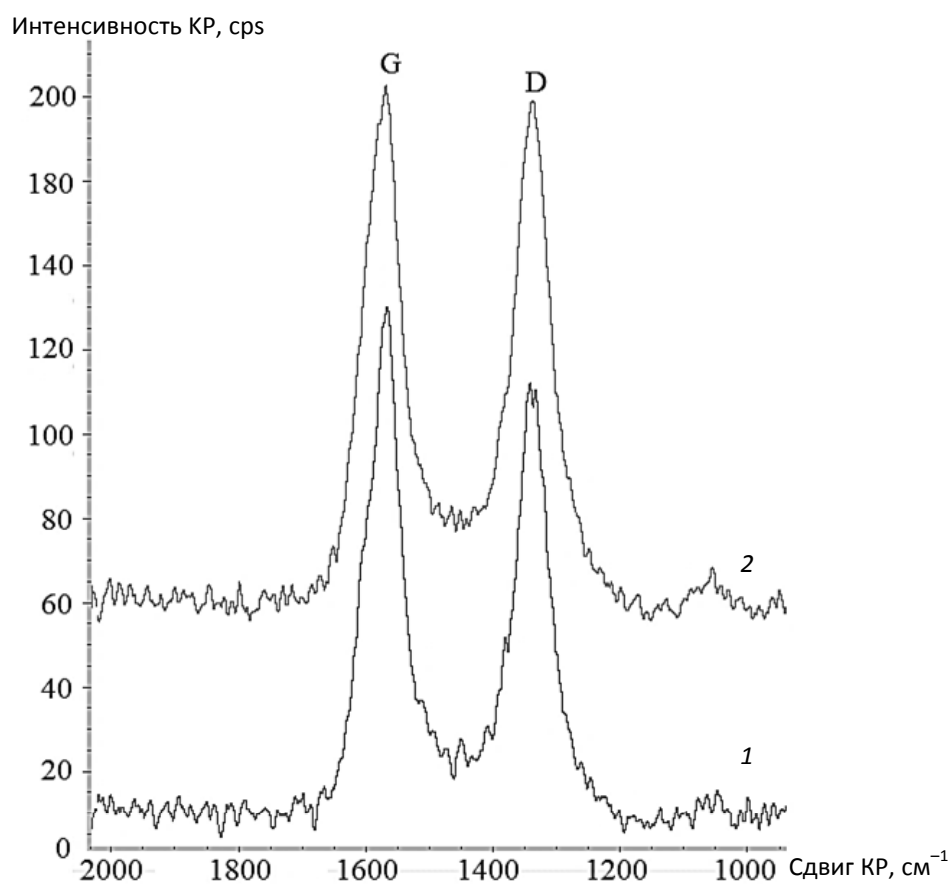


Рис. 2. Фрагмент спектра КР (DXR Raman Microscope, $\lambda = 532$ нм)
 исходных (1) и функционализированных стеаратом титана (2) УНТ
 Fig. 2. Fragment of the spectrum КР (DXR Raman Microscope, $\lambda = 532$ nm)
 of the raw (1) and functionalized by titanium stearate (2) CNTs

Для сравнения в качестве наполнителя использован технический углерод П-234.

Модифицированию подвергался термостойкий полиэтилен марки PE-RT SP 988 (LG Chem, Южная Корея). Концентрация наполнителя (УНТ, функционализированные УНТ, технический углерод) составляла 0,01–1,5 масс. %. Смешение модифицирующих добавок с гранулированным полиэтиленом осуществляли в расплаве в роторном смесителе «Брабендер». Необходимые для исследования образцы получали методом литья под давлением.

Исследования твердости композитов по Шору (шкала Д) проводили на приборе модели ИТ 5069 УХЛ 4,2 (ГОСТ 23677–79). Прочностные характеристики оценивали на машине для испытания полимеров DBVMTCL-500 kg (Testometric, Великобритания). Погрешность измерений на этом приборе составляет ± 5 %.

Исследование триботехнических характеристик проводили на машине трения определением весового износа [15]. Образцы цилиндрической формы, диаметром 35 мм, высотой 6,5 мм закреплялись винтом в центре на столе машины трения. В качестве контртела использовалась сетка абразивная P150 (75–106 мкм), диаметр рабочей зоны контртела составлял 120 мм. Весовой износ определяли по разнице массы образца до и после испытания. Время проведения эксперимента составляло 20 минут, нагрузку на образец задавали усилием 0,5 кг с плечом 200 мм от оси механизма опускания патрона и контролировали пружинными весами на протяжении всего времени эксперимента. Частота вращения контртела составляла 12,5 об/мин.

Суточное водопоглощение композитов оценивали по ГОСТ 4650–2014.

Исследование тепло- и температуропроводности проводили с помощью информационно-измерительной системы теплофизических свойств твердых материалов (ИИС НК

ТФСМ) [14], которая предварительно калибровалась на эталонных материалах (полиметилметакрилат и рипор). Цилиндрический образец диаметром 35 мм помещали на лабораторный стол, сверху устанавливали измерительный зонд. После 10 минут термостатирования производили измерение теплопроводности. Время между экспериментами составляло 15 минут.

Термическую стабильность композитов оценивали на основании анализа ТГ/ДСК-кривых, полученных на приборе синхронного термического анализа STA 449 F3 Jupiter (Netzsch). Во время измерений печь заполняли воздухом с расходом 30 мл/мин. Температурная программа включала выдержку при температуре 30 °С в течение 10 минут, нагрев от 30 до 900 °С со скоростью 10 °С/мин и охлаждение образцов до комнатной температуры со скоростью 15 °С/мин.

Экспериментальное исследование

Результаты механических испытаний полиэтиленовых композитов с различными типами углеродных модификаторов (технический углерод П-234, исходные и функционализированные УНТ) представлены в таблице.

Необходимо отметить, что введение как технического углерода, так и УНТ, как правило, способствует улучшению физико-механических показателей полиэтилена.

Увеличение твердости по Шору может достигать 3,5 и 7 единиц в присутствии соответственно П-234 и углеродных нанотрубок. Однако необходимо отметить, что данный показатель наблюдается при концентрации исходных УНТ в композите, равной 1,5 масс. %. Функционализированных УНТ для достижения аналогичного эффекта требуется всего 0,1 масс. %, т. е. в 15 раз меньше. Максимальный скачок твердости наблюдается при наиболее низком содержании модификатора, затем происходит ее плавное снижение, увеличение или стабилизация.



Физико-механические свойства полиэтиленовых композитов

Physico-mecanical properties of the polyethylene composites

Модификатор	Масс. доля, %	Твердость по Шору	Весовой износ, г	Максимальное напряжение, Н/мм ²	
				при срезе	при изгибе
Отсутствует (исходное состояние)	—	56	0,0409	17,1	37,9
П-234	0,01	58	0,0356	17,2	38,9
	0,1	57,5	0,0321	16,6	41,5
	0,5	57,5	0,0289	17,1	37,1
	1,0	59,5	0,0336	18,2	42,5
	1,5	59,5	0,0347	17,1	42,2
УНТ	0,01	60	0,0293	17,2	38,4
	0,1	61	0,0261	17,2	37,7
	0,5	61	0,0241	17,5	38
	1,0	62	0,0238	17,5	37,5
	1,5	63	0,0248	17,5	38
Функционализированные УНТ	0,01	62,5	0,0187	18,5	38,9
	0,1	63	0,0191	17,3	41,5
	0,5	62,5	0,0219	17,5	37,1
	1,0	62	0,0227	16,5	42,5
	1,5	62	0,0223	17,5	42,2

Устойчивость к весовому износу также заметно повышается в присутствии уже 0,01 масс. % углеродных материалов. Причем самыми эффективными оказываются функционализированные УНТ при самой низкой концентрации. Они позволяют снизить весовой износ композита на 54 %.

Показатели максимального напряжения полиэтилена на изгиб и срез под действием углеродных модификаторов меняются не столь однозначно. При некоторых концентрациях П-234, исходных и функционализированных УНТ возможно ухудшение данных свойств. В лучшем случае можно достичь прироста максимального напряжения в условиях среза на 8,2 % в присутствии 0,01 масс. % функционализированных УНТ, а в условиях сгиба — на 12,1 % в присутствии 1 масс. % П-234 или функционализированных УНТ.

Зависимость суточного водопоглощения полиэтиленового композита от концентрации углеродного модификатора представлена на рис. 3. Введение П-234 и УНТ способствует гидрофобизации материала. Причем зависимость показателя водопоглощения композита от концентрации наполнителя может быть различной. В присутствии П-234 она имеет минимум при 0,1 масс. %. При добавлении нефункционализированных УНТ минимальное водопоглощение композита наблюдается при 0,1 масс. %. Зависимость данного показателя от концентрации функционализированных УНТ носит изменчивый характер. Первый минимум водопоглощения (0 %) наблюдается при 0,01 %-ном содержании модификатора, затем происходит незначительное увеличение до 0,06 %, а при 1 и 1,5 %-ном содержании функционализированных УНТ снова наблюдается нулевой показатель.

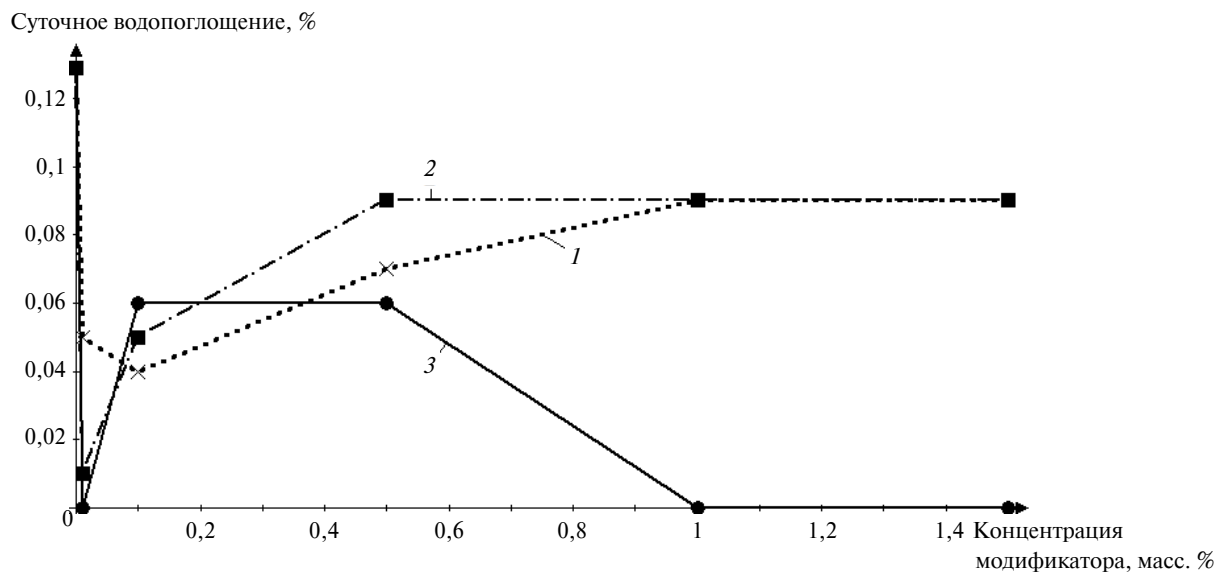


Рис. 3. Влияние концентрации технического углерода П-234 (1), исходных (2) и функционализированных (3) УНТ на суточное водопоглощение полиэтиленовых композитов
 Fig. 3. Influence of concentrations of technical carbon П-234 (1), raw (2) and functionalized (3) CNTs on the daily moisture absorption of polyethylene composite

Согласно данным, представленным на рис. 4, теплофизические характеристики полиэтилена при модифицировании как техническим углеродом, так и функционализированными нанотрубками изменяются незначительно (не на порядки). Вместо ожидаемого повышения коэффициента теплопроводности λ в большинстве случаев при введении П-234 и УНТ происходит его некоторое снижение. Температуропроводность α материала возрастает примерно на 34 % в присутствии 1 масс. % функционализированных нанотрубок.

Анализ ТГ/ДСК-кривых (рис. 5) композитов «полиэтилен — функционализированные УНТ» показывает их высокую термостабильность. Плавление материала происходит при 140–150 °С. Это заметно превосходит температурный интервал эксплуатации изделий из полиэтилена PE-RT SP 988. Остальные присутствующие на кривых рис. 5 пики и характерные участки при более высоких температурах характеризуют термоокислительную деструкцию различных фракций полиэтилена.

Обсуждение результатов

Таким образом, углеродные материалы способствуют улучшению ряда физико-механических параметров полиэтилена. Однако показатели эффективности зависят от типа применяемого углеродного модификатора, его концентрации и предварительной химической обработки (функционализации).

С позиций улучшения механических свойств более высокая эффективность УНТ по сравнению с техническим углеродом П-234 обусловлена их структурой и уникальными свойствами [16]. Функционализированные УНТ обладают повышенным химическим сродством к модифицируемой матрице, благодаря чему для достижения необходимых показателей композитов требуется их расход, на порядок и более сниженный по сравнению с исходными УНТ. Необходимо отметить, что в ранее опубликованных работах [17] для повышения твердости и устойчивости к износу в композиты на основе полиэтилена вводилось до 5–10 масс. % углеродных нанотрубок.

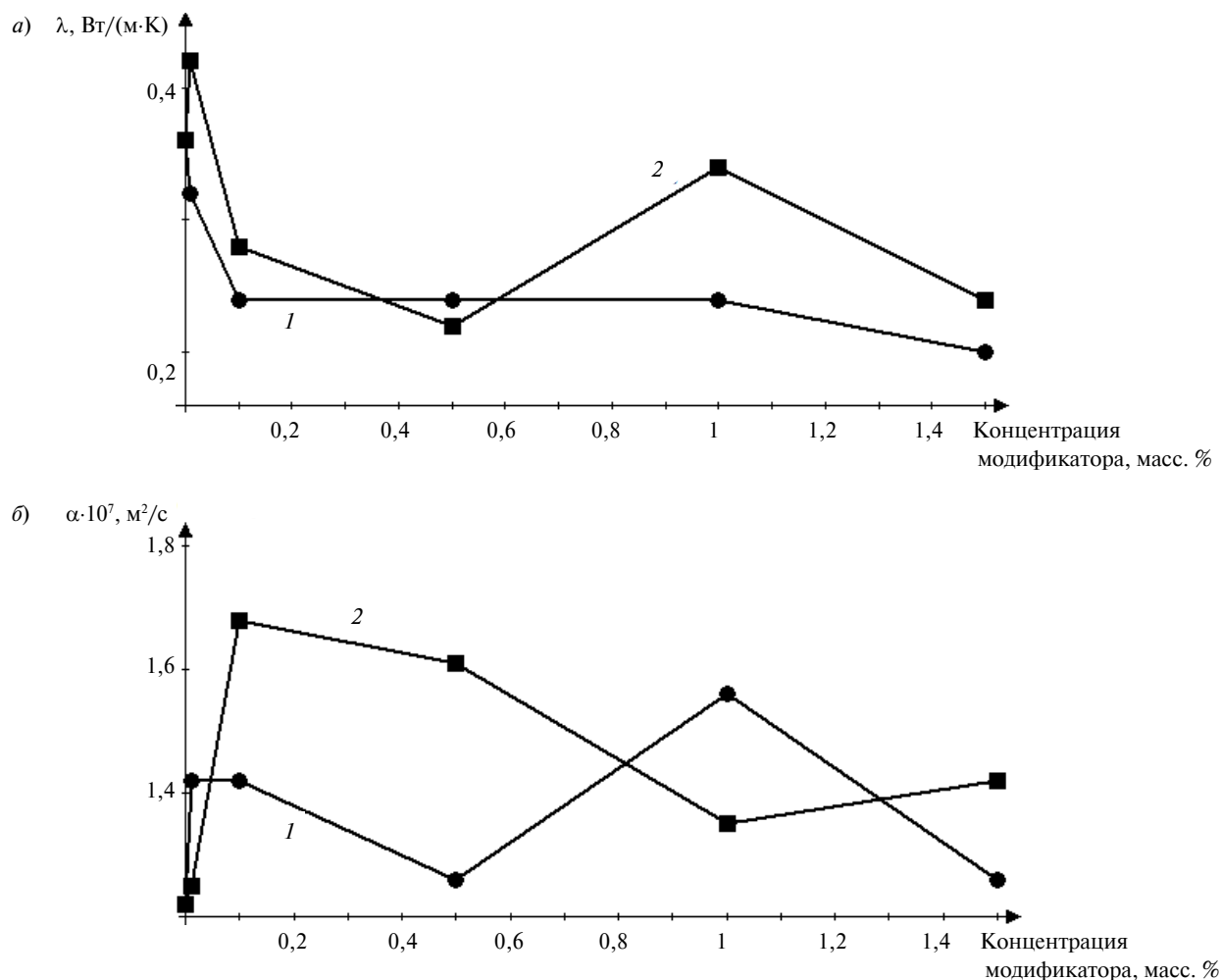


Рис. 4. Изменение коэффициентов теплопроводности λ (а) и температуропроводности α (б) полиэтилена в присутствии технического углерода П-234 (1) и функционализированных УНТ (2)

Fig. 4. Change in values of the coefficients of thermal conductivity λ (a) and thermal properties α (b) of polyethylene technical carbon П-234 (1) and functionalized CNTs (2)

Другим положительным моментом при применении функционализированных УНТ в составе полиэтиленовых композитов является возможность повышения устойчивости к воздействию влаги. Уже при минимальном содержании (0,01 масс. %) углеродных нанотрубок с титан-стеаратными группами суточное влагопоглощение может снижаться до нуля. Это может быть обусловлено как более равномерным диспергированием функционализированных УНТ в полимерной матрице, так и их более высокими гидрофобными свойствами. Для сравнения в [18] для придания полиэтилену устойчивости к влаге в него вводят 1,5 масс. % УНТ.

Слабое влияние использованных в работе углеродных модификаторов на теплофизические характеристики композитов можно объяснить двумя причинами. Во-первых, это высокая агломерация и недостижение порога перколяции для П-234 и исходных УНТ. В случае использования функционализированных УНТ в дополнение к этой причине влияние может оказывать усиленное взаимодействие с матрицей, в результате чего УНТ перестают контактировать друг с другом, будучи разделены прослойками из менее проводящего полимера. Однако заметим: учитывая, что слишком высокая теплопроводность материала может

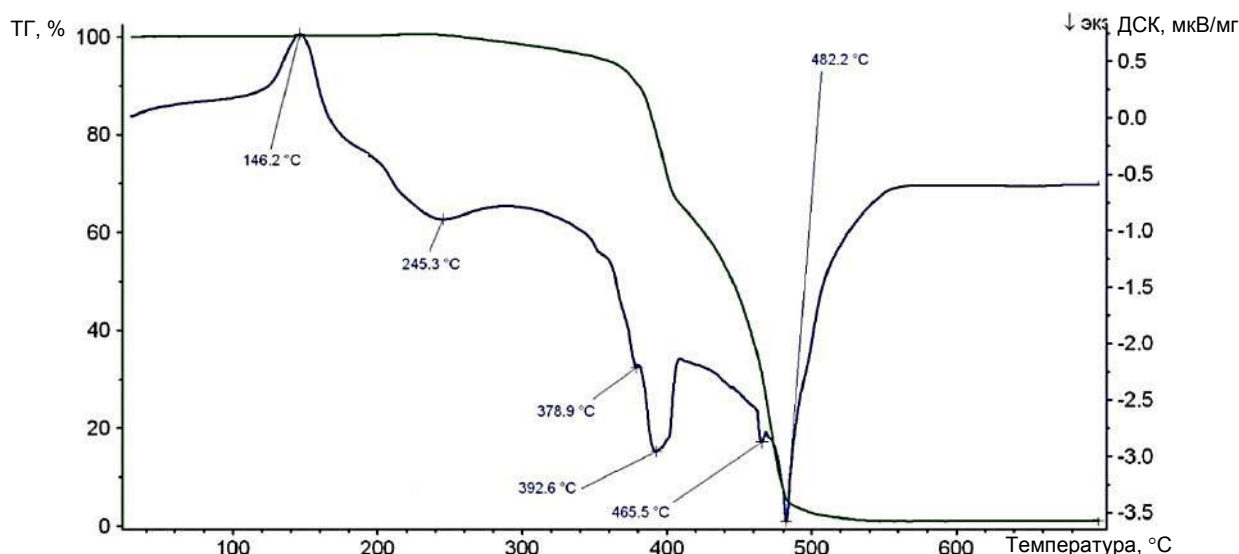


Рис. 5. ТГ/ДСК-кривые композита «полиэтилен – 0,01 масс. % функционализированных УНТ»
Fig. 5. ТГ/ДС-curve of composite «polyethylene – 0,01 mass. % functionalized CNTs»

способствовать потерям тепла в окружающую среду, при применении полиэтилена, например для изготовления труб горячего водоснабжения, низкая теплопроводность является скорее преимуществом, чем недостатком.

Выводы

Функционализация углеродных нанотрубок титанат-стеаратными группами способствует их адаптации к полимерной матрице на основе полиэтилена и эффективному применению в составе композитов, обладающих повышенной твердостью, устойчивостью к износу и воздействию влаги. Данные эффекты достаточно выражены при концентрациях функционализированных нанотрубок, равных 0,01–0,1 масс. %.

Аналогичных результатов с исходными (нефункционализированными) УНТ удастся достичь при концентрациях на порядок и более высоких, чем указанные.

Таким образом, использование функционализированных УНТ для модифицирования термостойкого полиэтилена РЕ-RT SP 988 целесообразно и способствует улучшению эксплуатационных характеристик изделий на его основе, например труб ХВС, ГВС и отопления.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (2018–2019 гг.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Punetha V.D., Rana S., Yoo H.J., Chaurasia A., McLeskey J.T., Ramasamy M.S., Sahoo N.G., Cho J.W. Functionalization of carbon nanomaterials for advanced polymer nanocomposites: A comparison study between CNT and graphene // *Progress in Polymer Science*. 2017. Vol. 67. P. 1–47.
2. Dyachkova T.P., Rukhov A.V., Tkachev A.G., Tugolukov E.N. Functionalization of Carbon Nanotubes: Methods, Mechanisms and Technological Realization // *Advanced Materials and Technologies*. 2018. No 2. P. 18–41.
3. Ma P.-C., Siddiqui N.A., Marom G., Kim J.-K. Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010. Vol. 41. P. 1345–1367.



4. Gantayat S., Rout D., Swain S.K. Mechanical properties of functionalized multiwalled carbon nanotube/epoxy nanocomposites // *Materials Today: Proceedings*. 2017. Vol. 4, Issue 2, Part A. P. 4061–4064.
5. Cha J., Jin S., Shim J.H., Park C.S., Ryu H.J., Hong S.H. Functionalization of carbon nanotubes for fabrication of CNT/epoxy nanocomposites // *Materials & Design*. 2016. Vol. 95. P. 1–8.
6. Neves J.C., de Castro V.G., Assis A.L.S., Veiga A.G., Rocco M.L.M., Silva G.G. In situ determination of amine/epoxy and carboxylic/epoxy exothermic heat reaction on surface of modified carbon nanotubes and structural verification of covalent bond formation // *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 436. P. 495–504.
7. Jin F.-L., Ma C.-J., Park S.-J. Thermal and mechanical interfacial properties of epoxy composites based on functionalized carbon nanotubes // *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 528. P. 8517–8522.
8. Ferreira F.V., Franceschi W., Meneses B.R.C., Brito F.S., Lozano K., Coutinho A.R., Cividanes L.S., Thim G.P. Dodecylamine functionalization of carbon nanotube to improve dispersion, thermal and mechanical properties of polyethylene based nanocomposites // *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 410. P. 266–277.
9. Kharitonov A.P., Maksimkin A.V., Mostovaya K.S., Kaloshkin S.D., Gorshenkov M.V., D'yachkova T.P., Tkachev A.G., Aleksei L.N. Reinforcement of bulk ultrahigh molecular weight polyethylene by fluorinated carbon nanotubes insertion followed by hot pressing and orientation stretching // *Composite Science and Technology*. 2015. Vol. 120. P. 26–31.
10. Kuan C.-F., Kuan H.-C., Ma C.-C.M., Chen C.-H., Wu H.-L. The preparation of carbon nanotube/linear low density polyethylene composite by a water-crosslinking reaction // *Materials Letters*. 2007. Vol. 61. P. 2744–2748.
11. Мележик А.В., Хохлов П.А., Ткачев А.Г. Функционализация углеродных нанотрубок органо-титанатами // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация*. 2013. № 1. С. 31–35.
12. Таров Д.В., Гурова Т.В., Шубин И.Н. Аппаратурное оформление функционализации нанотрубок стеаратом титана // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2015. Т. 21, № 2. С. 360–366.
13. Ткачев А.Г., Таров Д.В., Таров В.П., Шубин И.Н. Технологические основы функционализации многостенных углеродных нанотрубок стеаратом титана для последующего производства композитов // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2016. Т. 22, № 3. С. 501–509.
14. Селиванова З.М., Самохвалов А.А. Интеллектуальная информационно-измерительная система для определения теплофизических свойств материалов и изделий // *Измерительная техника*. 2012, № 9. С. 38–42.
15. Баронин Г.С., Худяков В.В., Мещерякова Ю.В. Теплофизические и триботехнические свойства фторполимерных молекулярных композитов // *Вестник Тамбовского университета. Научно-теоретический журнал. Серия: Естественные науки*. 2013. Т. 18, № 4. С. 1922–1923.
16. Раков Э.Г. Нанотрубки и фуллерены. М.: Университетская книга, Логос, 2006. 376 с.
17. McNally T., Pötschke P., Halley P., Murthy M., Martin D., Bell S., Brennan G.P., Bein D., Lemoine P., Quinn J.P. Polyethylene multiwalled carbon nanotube composites // *Polymer*. 2005. Vol. 46. P. 8222–8232.
18. Azam M.U., Samad M.A. UHMWPE hybrid nanocomposite coating reinforced with nanoclay and carbon nanotubes for tribological applications under water with/without abrasives // *Tribology International*. 2018. Vol. 124. P. 145–155.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ДЬЯЧКОВА Татьяна Петровна — доктор химических наук профессор Тамбовского государственного технического университета

E-mail: dyachkova_tp@mail.ru

ТАРОВ Дмитрий Владимирович — Заместитель генерального директора ООО «НаноТехЦентр»

E-mail: d_tarov@mail.ru

КОБЗЕВ Дмитрий Евгеньевич — кандидат технических наук доцент Тамбовского государственного технического университета

E-mail: kobzeff.dmitry@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 11.10.2018

REFERENCES

- [1] **Punetha V.D., Rana S., Yoo H.J., Chaurasia A., McLeskey J.T., Ramasamy M.S., Sahoo N.G., Cho J.W.** Functionalization of carbon nanomaterials for advanced polymer nanocomposites: A comparison study between CNT and grapheme. *Progress in Polymer Science*. 2017. Vol. 67. P. 1–47.
- [2] **Dyachkova T.P., Rukhov A.V., Tkachev A.G., Tugolukov E.N.** Functionalization of Carbon Nanotubes: Methods, Mechanisms and Technological Realization. *Advanced Materials and Technologies*. 2018. No 2. P. 18–41.
- [3] **Ma P.-C., Siddiqui N.A., Marom G., Kim J.-K.** Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010. Vol. 41. P. 1345–1367.
- [4] **Gantayat S., Rout D., Swain S.K.** Mechanical properties of functionalized multiwalled carbon nanotube/epoxy nanocomposites. *Materials Today: Proceedings*. 2017. Vol. 4, I. 2, Part A. P. 4061–4064.
- [5] **Cha J., Jin S., Shim J.H., Park C.S., Ryu H.J., Hong S.H.** Functionalization of carbon nanotubes for fabrication of CNT/epoxy nanocomposites. *Materials & Design*. 2016. Vol. 95. P. 1–8.
- [6] **Neves J.C., de Castro V.G., Assis A.L.S., Veiga A.G., Rocco M.L.M., Silva G.G.** In situ determination of amine/epoxy and carboxylic/epoxy exothermic heat reaction on surface of modified carbon nanotubes and structural verification of covalent bond formation. *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 436. P. 495–504.
- [7] **Jin F.-L., Ma C.-J., Park S.-J.** Thermal and mechanical interfacial properties of epoxy composites based on functionalized carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 528. P. 8517–8522.
- [8] **Ferreira F.V., Franceschi W., Meneses B.R.C., Brito F.S., Lozano K., Coutinho A.R., Cividanes L.S., Thim G.P.** Dodecylamine functionalization of carbon nanotube to improve dispersion, thermal and mechanical properties of polyethylene based nanocomposites. *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 410. P. 266–277.
- [9] **Kharitonov A.P., Maksimkin A.V., Mostovaya K.S., Kaloshkin S.D., Gorshenkov M.V., D'yachkova T.P., Tkachev A.G., Alekseiko L.N.** Reinforcement of bulk ultrahigh molecular weight polyethylene by fluorinated carbon nanotubes insertion followed by hot pressing and orientation stretching. *Composite Science and Technology*. 2015. Vol. 120. P. 26–31.
- [10] **Kuan C.-F., Kuan H.-C., Ma C.-C.M., Chen C.-H., Wu H.-L.** The preparation of carbon nanotube/linear low density polyethylene composite by a water-crosslinking reaction // *Materials Letters*. 2007. Vol. 61. P. 2744–2748.
- [11] **Melezhik A.V., Khokhlov P.A., Tkachev A.G.** Funktsionalizatsiya uglerodnykh nanotrubok organo-titanatami [Functionalization of carbon nanotubes by organic titanium compounds – in Russian]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya*. 2013. № 1. P. 31–35.
- [12] **Tarov D.V., Gurova T.V., Shubin I.N.** Apparaturnoye oformleniye funktsionalizatsii nanotrubok stearatom titana [Hardware design of the functionalization of nanotubes by titanium stearate – in Russian]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Transactions of TSTU)*. 2015. T. 21, № 2. P. 360–366.
- [13] **Tkachev A.G., Tarov D.V., Tarov V.P., Shubin I.N.** Tekhnologicheskiye osnovy funktsionalizatsii mnogostennykh uglerodnykh nanotrubok stearatom titana dlya posleduyushchego proizvodstva kompozitov [Technological basis for the functionalization of multi-walled carbon nanotubes by titanium stearate for the subsequent production of composites – in Russian]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Transactions of TSTU)*. 2016. T. 22, № 3. S. 501–509.
- [14] **Selivanova Z.M., Samokhvalov A.A.** Intel'lektual'naya informatsionno-izmeritel'naya sistema dlya opredeleniya teplofizicheskikh svoystv materialov i izdeliy [Intelligent information-measuring system for determining the thermophysical properties of materials and products – in Russian]. *Izmeritel'naya tekhnika*. 2012, № 9. P. 38–42.
- [15] **Baronin G.S., Khudyakov V.V., Meshcheryakova Yu.V.** Teplofizicheskiye i tribotekhnicheskiye svoystva fluoropolimernykh molekulyarnykh kompozitov [Thermophysical and tribological properties of fluoropolymer molecular composites – in Russian]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Nauchno-teoreticheskiy zhurnal, Seriya: Yestestvennyye nauki*. 2013. T. 18, № 4. P. 1922–1923.
- [16] **Rakov E.G.** Nanotrubki i fullereny (Nanotubes and fullerenes – in Russian). M.: Universitetskaya kniga, Logos, 2006. 376 s.



[17] McNally T., Pötschke P., Halley P., Murthy M., Martin D., Bell S., Brennan G.P., Bein D., Lemoine P., Quinn J.P. Polyethylene multiwalled carbon nanotube composites // Polymer. 2005. Vol. 46. P. 8222–8232.

[18] Azam M.U., Samad M.A. UHMWPE hybrid nanocomposite coating reinforced with nanoclay and carbon nanotubes for tribological applications under water with/without abrasives. Tribology International 2018. Vol. 124. P. 145–155.

THE AUTHORS

DYACHKOVA Tatiana P. — *Tambov state technical university*

E-mail: dyachkova_tp@mail.ru

TAROV Dmitriy V. — «*Nanotechcenter*» Ltd.

E-mail: d_tarov@mail.ru

KOBZEV Dmitriy.E. *Tambov state technical university.*

E-mail: kobzeff.dmitry@yandex.ru

Received: 11.10.2018

DOI: 10.18721/JEST.25117
УДК 669.2

А.И. Демидов, И.А. Маркелов

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

ТЕРМОДИНАМИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА ИЗ ОКСИДОВ МОНООКСИДОМ УГЛЕРОДА В СМЕСИ С ДИОКСИДОМ УГЛЕРОДА ПРИ ПОСТОЯННОМ СОДЕРЖАНИИ КИСЛОРОДА В СИСТЕМЕ

Анализ научной литературы по термодинамике процессов окисления металлов и восстановления их оксидов свидетельствует о том, что результаты термодинамических расчётов зависят от записи уравнений химических реакций. Наиболее часто встречается запись реакций на моль кислорода или на моль диоксида углерода; при этом рассчитывают константу равновесия и определяют равновесный состав газовой фазы. Рассчитанные величины стандартных энергий Гиббса имеют в этом случае вспомогательное значение. Нами ранее было показано, что расчёт и сравнение изменения стандартной энергии Гиббса различных реакций возможен только тогда, когда реакции записаны на моль атомов исходных веществ (на моль системы). Только в этом случае возможно обоснованное предпочтение какой-либо реакции. В работе на примере реакций восстановления железа из оксидов монооксидом углерода в смеси с диоксидом углерода при постоянном содержании кислорода в системе показана целесообразность использования предлагаемого метода расчёта. Рассматриваемые реакции имеют важное практическое значение для металлургической промышленности.

Ключевые слова: термодинамика, восстановление, железо, оксиды железа, монооксид углерода, диоксид углерода.

Ссылка при цитировании:

А.И. Демидов, И.А. Маркелов. Термодинамика восстановления железа из оксидов монооксидом углерода в смеси с диоксидом углерода при постоянном содержании кислорода в системе // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 175–180. DOI: 10.18721/JEST.25117.

A.I. Demidov, I.A. Markelov

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

THERMODYNAMICS OF REDUCTION OF IRON OXIDES BY CARBON MONOXIDE MIXED WITH CARBON DIOXIDE AT CONSTANT OXYGEN CONTENT IN THE SYSTEM

Analysis of scientific literature on the thermodynamics of the processes of oxidation of metals and reduction of their oxides indicates that results of thermodynamic calculations depend on the formulation of equations of chemical reactions. Chemical reactions are usually written per mole of oxygen or per mole of carbon dioxide, with the equilibrium constant and equilibrium composition of the gas phase calculated. The calculated values of standard Gibbs energies are used for reference only in this case. It was shown in our previous articles that calculation and comparison of standard Gibbs energies of various reactions is only possible if reactions are written per mole of atoms of the initial substances (per mole of the system). In this paper, the proposed method of calculation is shown using the example of reactions of reduction of iron oxides by carbon monoxide mixed with carbon dioxide at constant oxygen content in the system.

Keywords: thermodynamics, reduction, iron, iron oxides, carbon monoxide, carbon dioxide.

Citation:

A.I. Demidov, I.A. Markelov, Thermodynamics of reduction of iron oxides by carbon monoxide mixed with carbon dioxide at constant oxygen content in the system, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 175–180, DOI: 10.18721/JEST.25117.

Введение

Определение равновесного состава газовой фазы при восстановлении железа из оксидов монооксидом углерода — предмет многочисленных теоретических и экспериментальных исследований [1–8].

В работах [9, 10] мы привели расчет изменений стандартной энергии Гиббса реакций восстановления железа из оксидов графитом и с водородом в интервале температур 900–1600 К, учтя изменение с температурой состава вюститита при постоянном отношении железа к кислороду.

Определенный интерес представляет расчет изменения стандартной энергии Гиббса реакций взаимодействия оксидов железа с монооксидом углерода, находящимся в смеси с диоксидом углерода, при постоянном содержании кислорода в системе.

Методика расчета

Аналогично тому, как это было сделано в работах [9, 10], изученные составы отмечены

точками на поле концентрационного треугольника Гиббса — Розенбома для трехкомпонентной системы Fe–O–C (см. рисунок). Составы системы Fe–O–C, отвечающие приведенным далее реакциям (1)–(10), указаны в табл. 1.

Термодинамический расчет реакций восстановления монооксидом углерода железа из оксидов проводили при изменении составов по сечениям концентрационного треугольника: от составов, соответствующих оксидам железа, до составов на стороне C–O; при этом в каждом сечении содержание кислорода оставалось постоянным.

Расчет изменения стандартной энергии Гиббса реакций проводили на 1 моль атомов исходных веществ, как это было выполнено в работах [11, 12].

Исходные данные для расчетов взяты из справочников [13, 14]. Значения функции G для вюститита, находящегося в равновесии с магнетитом ($\text{FeO}_{(1+x'')}$) или с железом ($\text{FeO}_{(1+x')}$), с учетом изменяющегося с температурой состава вюститита взяты из работ [9, 10, 15].

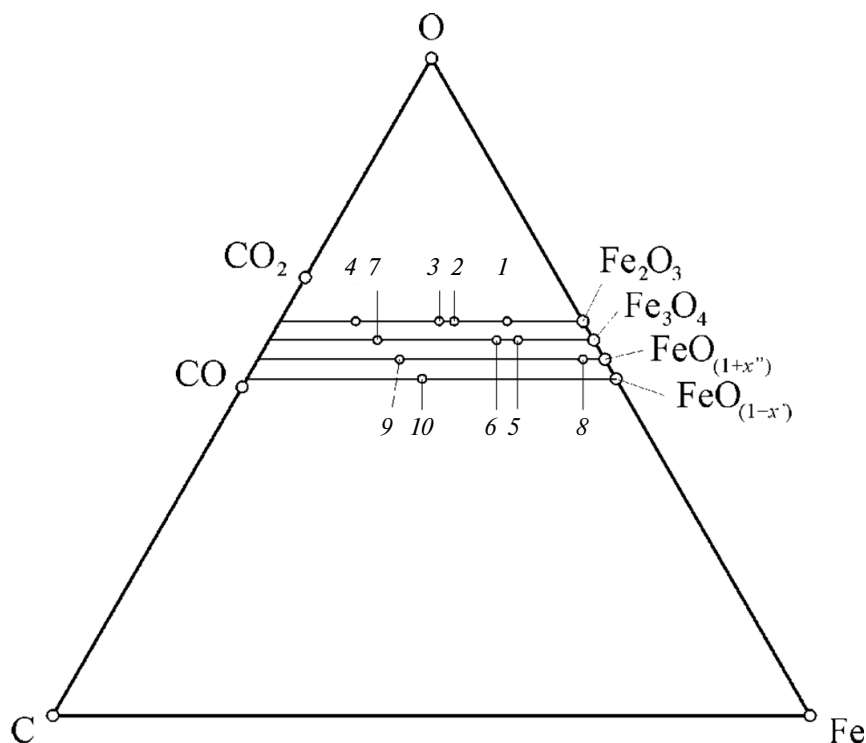


Рис. Концентрационный треугольник Fe–O–C с составами, отвечающими реакциям (1)–(10)

Fig. Fe–O–C concentration triangle with compositions corresponding to reactions (1)–(10)

Таблица 1

Составы системы, отвечающие реакциям (1)–(10), на концентрационном треугольнике Fe–O–C

Table 1

Compositions of the system corresponding to reactions (1)–(10) on the Fe–O–C concentration triangle

Наименование элемента	Содержание элемента, %, в десяти разных реакциях									
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
<i>T = 900 K</i>										
O	60,00	60,00	60,00	60,00	57,14	57,14	57,14	51,87	51,87	51,32
Fe	30,00	21,68	21,15	10,00	30,98	30,21	14,29	46,93	22,20	23,02
C	10,00	18,32	18,85	30,00	11,88	12,65	28,57	1,20	25,93	25,66
<i>T = 1000 K</i>										
O	60,00	60,00	60,00	60,00	57,14	57,14	57,14	52,38	52,38	51,23
Fe	30,00	22,22	21,06	10,00	31,75	30,09	14,29	45,13	21,43	23,16
C	10,00	17,78	18,94	30,00	11,11	12,77	28,57	2,49	26,19	25,61
<i>T = 1100 K</i>										
O	60,00	60,00	60,00	60,00	57,14	57,14	57,14	52,75	52,75	51,19
Fe	30,00	22,63	21,03	10,00	32,34	30,04	14,29	43,89	20,88	23,21
C	10,00	17,37	18,97	30,00	10,52	12,82	28,57	3,36	26,37	25,60
<i>T = 1200 K</i>										
O	60,00	60,00	60,00	60,00	57,14	57,14	57,14	53,06	53,06	51,18
Fe	30,00	23,00	21,02	10,00	32,85	30,02	14,29	42,90	20,41	23,23
C	10,00	17,00	18,98	30,00	10,01	12,84	28,57	4,04	26,53	25,59
<i>T = 1300 K</i>										
O	60,00	60,00	60,00	60,00	57,14	57,14	57,14	53,34	53,34	51,18
Fe	30,00	23,34	21,02	10,00	33,34	30,02	14,29	42,01	19,99	23,23
C	10,00	16,66	18,98	30,00	9,51	12,84	28,57	4,65	26,67	25,59
<i>T = 1400 K</i>										
O	60,00	60,00	60,00	60,00	57,14	57,14	57,14	53,60	53,60	51,18
Fe	30,00	23,67	21,02	10,00	33,82	30,02	14,29	41,19	19,60	23,23
C	10,00	16,33	18,98	30,00	9,04	12,84	28,57	5,21	26,80	25,59
<i>T = 1500 K</i>										
O	60,00	60,00	60,00	60,00	57,14	57,14	57,14	53,88	53,88	51,20
Fe	30,00	24,04	21,03	10,00	34,35	30,05	14,29	40,35	19,18	23,20
C	10,00	15,96	18,97	30,00	8,51	12,81	28,57	5,77	26,94	25,60
<i>T = 1600 K</i>										
O	60,00	60,00	60,00	60,00	57,14	57,14	57,14	54,21	54,21	51,24
Fe	30,00	24,51	21,07	10,00	35,01	30,11	14,29	39,37	18,68	23,14
C	10,00	15,49	18,93	30,00	7,85	12,75	28,57	6,42	27,11	25,62

Расчетные результаты

Уравнения реакций восстановления оксида железа (III) монооксидом углерода в смеси с диоксидом углерода могут быть записаны следующим образом:

$$(3\text{Fe}_2\text{O}_3 + (\text{CO} + \text{CO}_2))/20 = \\ = (2\text{Fe}_3\text{O}_4 + 2\text{CO}_2)/20; \quad (1)$$

$$(\text{Fe}_2\text{O}_3 + (1-2x')(\text{CO} + \text{CO}_2))/(10-10x') = \\ = (2\text{FeO}_{(1+x')} + (2-4x')\text{CO}_2)/(10-10x'); \quad (2)$$

$$(\text{Fe}_2\text{O}_3 + (1-2x'')(\text{CO} + \text{CO}_2))/(10-10x'') = \\ = (2\text{FeO}_{(1+x'')} + (2-4x'')\text{CO}_2)/(10-10x''); \quad (3)$$

$$(\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3(\text{CO} + \text{CO}_2))/20 = (2\text{Fe} + 6\text{CO}_2)/20. \quad (4)$$

Для реакций (1)–(4) содержание кислорода в системе составляет 60 %. При расчётах не учитывали вклад в величину изменения стандартной энергии Гиббса тех изменений, которые связаны с образованием идеальной газовой смеси монооксида углерода с диоксидом углерода, так как этот вклад при температурах 900–1600 К невелик [15].

Как видно из табл. 2, в указанном интервале температур изменения стандартной энергии Гиббса реакций (1)–(4) отрицательны, следовательно, равновесие реакций сдвинуто в сто-

рону образования продуктов реакций. Изменения стандартной энергии Гиббса реакции (2) становятся более отрицательными по сравнению с реакцией (1) при температурах выше 1500 К. Изменения стандартной энергии Гиббса реакции (3) становятся более отрицательными при увеличении температуры от 900 до 1600 К, а у реакции (4) уменьшаются по абсолютному значению при повышении температуры. Расчёты показывают, что при определённом соотношении оксида железа (III) и смеси монооксида углерода и диоксида углерода возможно восстановление оксида железа (III) до железа.

Уравнения реакций восстановления оксида железа (III, II) монооксидом углерода в смеси с диоксидом углерода приведены ниже:

$$(2\text{Fe}_3\text{O}_4 + (1-3x'')(2\text{CO} + \text{CO}_2))/(21-21x'') = \\ = (6\text{FeO}_{(1+x'')} + (3-9x'')\text{CO}_2)/(21-21x''); \quad (5)$$

$$(2\text{Fe}_3\text{O}_4 + (1-3x')(2\text{CO} + \text{CO}_2))/(21-21x') = \\ = (6\text{FeO}_{(1+x')} + (3-9x')\text{CO}_2)/(21-21x'); \quad (6)$$

$$(\text{Fe}_3\text{O}_4 + 2(2\text{CO} + \text{CO}_2))/21 = (3\text{Fe} + 6\text{CO}_2)/21. \quad (7)$$

При равновесии реакций (5)–(7) содержание кислорода составляет 57,14 %.

Таблица 2

Изменения стандартной энергии Гиббса для реакций (1)–(4) в интервале температур 900–1600 К

Table 2

Standard Gibbs free energy changes of reactions (1)–(4) in the temperature range 900–1600 K

T, K	1 + x'	1 + x''	$\Delta G^\circ_{(1)}$, кДж/моль	$\Delta G^\circ_{(2)}$, кДж/моль	$\Delta G^\circ_{(3)}$, кДж/моль	$\Delta G^\circ_{(4)}$, кДж/моль
900	1,0542	1,0777	–4,29	–3,24	–3,04	–1,32
1000	1,0504	1,1000	–4,55	–3,66	–3,38	–1,24
1100	1,0488	1,1164	–4,78	–4,08	–3,71	–1,17
1200	1,0483	1,1303	–5,00	–4,43	–4,11	–1,11
1300	1,0483	1,1431	–5,23	–4,86	–4,44	–1,05
1400	1,0483	1,1551	–5,46	–5,25	–4,75	–0,99
1500	1,0492	1,1682	–5,68	–5,64	–5,06	–0,93
1600	1,0509	1,1839	–5,91	–6,02	–5,37	–0,87

Таблица 3

Изменения стандартной энергии Гиббса для реакций (5)–(10) в интервале температур 900–1600 К

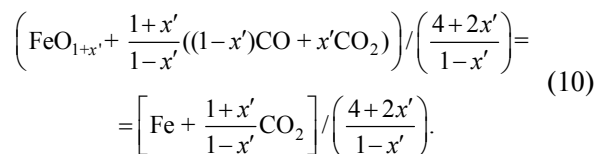
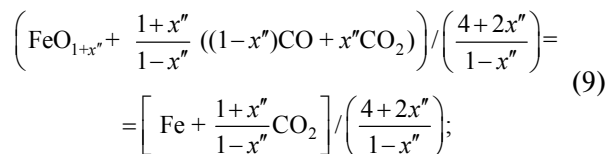
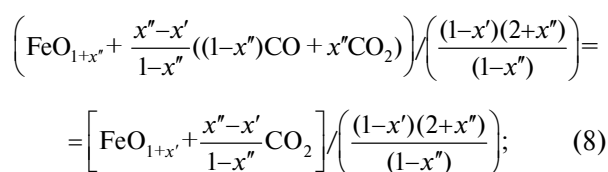
Table 3

Standard Gibbs free energy changes of reactions (5)–(10) in the temperature range 900–1600 K

T, K	$\Delta G_{(5)}^\circ$, кДж/моль	$\Delta G_{(6)}^\circ$, кДж/моль	$\Delta G_{(7)}^\circ$, кДж/моль	$\Delta G_{(8)}^\circ$, кДж/моль	$\Delta G_{(9)}^\circ$, кДж/моль	$\Delta G_{(10)}^\circ$, кДж/моль
900	–0,20	–0,02	0,16	0,27	0,39	0,27
1000	–0,42	–0,27	0,39	0,19	0,87	0,85
1100	–0,68	–0,51	0,61	0,18	1,33	1,38
1200	–0,85	–0,86	0,80	–0,12	1,67	1,97
1300	–1,13	–1,10	0,99	–0,11	2,06	2,46
1400	–1,34	–1,32	1,18	–0,18	2,40	2,95
1500	–1,55	–1,54	1,37	–0,25	2,71	3,42
1600	–1,71	–1,75	1,57	–0,36	2,97	3,88

Как видно из табл. 3, в указанном интервале температур изменения стандартной энергии Гиббса реакций (5) и (6) отрицательны, следовательно, равновесие реакции сдвинуто в сторону образования продуктов реакций. Значения изменения стандартной энергии Гиббса реакции (6) становятся более отрицательными, чем для реакции (5) при температурах выше 1500 К. Изменения стандартной энергии Гиббса реакции (7) в указанном интервале температур положительны, следовательно, равновесие реакции сдвинуто в сторону исходных веществ. Оксид железа (III, II) в указанном интервале температур не может быть восстановлен до железа смесью монооксида углерода с диоксидом углерода при постоянном содержании кислорода в системе.

Уравнения реакций восстановления вюстита на границе с оксидом железа (III, II) ($\text{FeO}_{1+x''}$) и вюстита на границе с железом ($\text{FeO}_{1+x'}$) монооксидом углерода в смеси с диоксидом углерода следующие:



В уравнениях реакций (8)–(10) содержание кислорода незначительно изменяется с увеличением температуры (табл. 2). Как видно из табл. 3, равновесие реакции (8) восстановления вюстита ($\text{FeO}_{1+x''}$) сдвигается в сторону образования продуктов реакции при температурах выше 1100 К. Изменения стандартной энергии Гиббса реакций (9) и (10) в указанном интервале температур положительны и увеличиваются с повышением температуры, следовательно, равновесие реакций сдвигается в сторону исходных веществ. Таким образом, результаты расчётов свидетельствуют о том, что вюстит нельзя восстановить смесью монооксида углерода и диоксида углерода до металла при постоянном содержании кислорода в системе.



Выводы

Термодинамический анализ реакций восстановления железа из оксидов железа монооксидом углерода в смеси с диоксидом углерода при постоянном содержании кислорода

в системе показал, что в этих условиях возможно только восстановление железа из оксида железа (III), в то время как оксид железа (III, II) и вюстит нельзя восстановить до металла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казачков Е.А. Расчёты по теории металлургических процессов: Учеб. пособие для вузов. М.: Металлургия, 1988.
2. Рыжонков Д.И., Арсентьев П.П., Яковлев В.В. [и др.]. Теория металлургических процессов. М.: Металлургия, 1989.
3. Андронов В.Н. Современная доменная плавка. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001.
4. Металлургия чугуна. 3-е изд., перераб. и доп. / Под ред. Ю.С. Юсфина. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004.
5. Михайлов Г.Г., Леонович Б.И., Кузнецов Ю.С. Термодинамика металлургических систем. М.: Изд. дом МИСиС, 2009.
6. Колбасников Н.Г., Кондратьев С.Ю. Структура. Энтропия. Фазовые превращения и свойства металлов / Федеральное агентство по образованию, Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т. СПб., 2006.
7. Совмен В.К., Гуськов В.Н., Белый А.В. [и др.]. Переработка золотоносных руд с применением бактериального окисления в условиях Крайнего Севера. Новосибирск: Наука, 2007.
8. Чекушин В.С., Бакшеев С.П., Олейникова Н.В. Восстановление металлов из сульфидных соединений // Известия вузов. Цветная металлургия. 2007. № 2 (171). С. 29–35.
9. Демидов А.И., Маркелов И.А. Термодинамика взаимодействия оксидов железа с графитом с учетом изменения состава вюстита при изменении температуры в интервале 900–1600 К // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2013. № 2 (171). С. 138–145.
10. Демидов А.И., Маркелов И.А. Термодинамика взаимодействия оксидов железа с водородом с учетом изменения состава вюстита при изменении температуры. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2013. № 3 (178). С. 193–198.
11. Демидов А.И., Маркелов И.А. Термодинамика взаимодействия углерода с кислородом // Журнал прикладной химии. 2005. Т. 78. № 4. С. 721–724.
12. Демидов А.И., Маркелов И.А. Термодинамика горения топлива у фурм доменной печи // Журнал прикладной химии. 2005. Т. 78. № 9. С. 1565–1567.
13. Barin I., Knacke O., Kubaschewski O. Thermochemical properties of Inorganic Substances. New York: Springer-Verlag, 1973.
14. Barin I., Knacke O., Kubaschewski O. Thermochemical properties of Inorganic Substances. Suppl. New York: Springer-Verlag, 1977.
15. Демидов А.И., Маркелов И.А. О термодинамике системы углерод-кислород // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2015. № 3 (226). С. 85–91.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ДЕМИДОВ Александр Иванович — доктор химических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: demidov1902@gmail.com

МАРКЕЛОВ Илья Александрович — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: markelovil@mail.ru

Статья поступила в редакцию 01.02.2019

REFERENCES

- [1] **Kazachkov Ye.A.** Raschety po teorii metallurgicheskikh protsessov: Ucheb. posobiye dlya vuzov. M.: Metallurgiya, 1988. (rus.)
- [2] **Ryzhonkov D.I., Arsentyev P.P., Yakovlev V.V. [i dr.]**. Teoriya metallurgicheskikh protsessov. M.: Metallurgiya, 1989. (rus.)
- [3] **Andronov V.N.** Sovremennaya domennaya plavka. SPb.: Izd-vo SPbGTU, 2001. (rus.)
- [4] Metallurgiya chuguna. 3-ye izd., pererab. i dop. / Pod red. Yu.S. Yusfina. M.: IKTs «Akademkniga», 2004. (rus.)
- [5] **Mikhaylov G.G., Leonovich B.I., Kuznetsov Yu.S.** Termodinamika metallurgicheskikh sistem. M.: Izd. dom MISiS, 2009. (rus.)
- [6] **Kolbasnikov N.G., Kondratyev S.Yu.** Struktura. Entropiya. Fazovyye prevrashcheniya i svoystva metallov / Federalnoye agentstvo po obrazovaniyu, Sankt-Peterburgskiy gos. politekhnicheskii un-t. SPb., 2006. (rus.)
- [7] **Sovmen V.K., Guskov V.N., Belyy A.V. [i dr.]**. Pererabotka zolotonosnykh rud s primeneniym bakterialnogo okisleniya v usloviyakh Kraynego Severa. Novosibirsk: Nauka, 2007. (rus.)
- [8] **Chekushin V.S., Baksheyev S.P., Oleynikova N.V.** Vosstanovleniye metallov iz sulfidnykh soyedineniy. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2007. № 2. S. 29–35. (rus.)
- [9] **Demidov A.I., Markelov I.A.** Termodinamika vzaimodeystviya oksidov zheleza s grafitom s uchetom izmeneniya sostava vyustita pri izmenenii temperatury v intervale 900–1600 K. *Nauchno- tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovaniye*. 2013. № 2 (171). S. 138–145. (rus.)
- [10] **Demidov A.I., Markelov I.A.** Termodinamika vzaimodeystviya oksidov zheleza s vodorodom s uchetom izmeneniya sostava vyustita pri izmenenii temperatury. *Nauchno- tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovaniye*. 2013. № 3 (178). S. 193–198. (rus.)
- [11] **Demidov A.I., Markelov I.A.** Termodinamika vzaimodeystviya ugleroda s kislorodom. *Zhurnal prikladnoy khimii*. 2005. T. 78. № 4. S. 721–724. (rus.)
- [12] **Demidov A.I., Markelov I.A.** Termodinamika gorennya topliva u furn domennoy pechi. *Zhurnal prikladnoy khimii*. 2005. T. 78. № 9. S. 1565–1567. (rus.)
- [13] **Barin I., Knacke O., Kubaschewski O.** Thermochemical properties of Inorganic Substances. New York: Springer-Verlag, 1973.
- [14] **Barin I., Knacke O., Kubaschewski O.** Thermochemical properties of Inorganic Substances. Suppl. New York: Springer-Verlag, 1977.
- [15] **Demidov A.I., Markelov I.A.** O termodinamike sistemy uglerod-kislorod. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovaniye*. 2015. № 3 (226). S. 85–91.

THE AUTHORS

DEMIDOV Aleksandr I. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: demidov1902@gmail.com

MARKELOV Iliya A. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: markelovil@mail.ru

Received 01.02.2019



DOI: 10.18721/JEST.25118
УДК 622.7

Л.А. Вайсберг, И.Д. Устинов

Научно-производственная корпорация «Механобр-Техника» (Акционерное общество),
Санкт-Петербург, Россия

ФЕНОМЕНОЛОГИЯ ВИБРАЦИОННОЙ КЛАССИФИКАЦИИ И УСРЕДНЕНИЯ ПО КРУПНОСТИ ГРАНУЛЯРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Выполнено обобщающее — с термодинамических позиций — описание процессов вибрационной классификации (разделения) и усреднения по крупности гранулярных материалов. Разработаны методы расчета общей энергии, энтальпии и энтропийного инкремента процессов классификации (разделения) и усреднения. Расчеты базируются на измеряемых показателях процесса и фундаментальных свойствах сухих гранулярных сред. Установлено, что в системе «разделительный или усредняющий агрегат — полидисперсное сырье в гравитационном поле» происходит недиссипативная энергетическая потеря, или образование энтропии, не противоречащие второму началу термодинамики. Приведенные выкладки справедливы для процессов разделения или усреднения как гидрофильных, так и гидрофобных гранулярных материалов. Разработанный инструментарий может быть использован при конструировании разнообразных просеивающих поверхностей.

Ключевые слова: вибрационная классификация, вибрационное усреднение, гранулярный материал, термодинамика, энтальпия, энтропия.

Ссылка при цитировании:

Л.А. Вайсберг, И.Д. Устинов. Феноменология вибрационной классификации и усреднения по крупности гранулярных материалов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 182–189. DOI: 10.18721/JEST.25118.

L.A. Vaisberg, I.D. Ustinov

Research and engineering corporation «Mekhanobr-Tekhnika». St. Petersburg, Russia

PHENOMENOLOGY FOR VIBRATION-INDUCED SIZE SEGREGATION AND MIXING OF GRANULAR MATERIALS

We have presented a generalized description for the processes of vibration-induced size segregation and mixing of granular materials from a thermodynamic standpoint. We have developed methods for calculating the total energy, enthalpy and entropy increment for the segregation and mixing processes. The calculations are based on the measured indicators of the process and on the fundamental properties of dry granular media. We have established that non-dissipative energy loss or entropy generation occur, without contradicting the second law of thermodynamics, in a system comprising a separator (averaging unit) and a polydisperse raw material in a gravitational field. We have confirmed that the above calculations are valid for the processes of segregation and mixing of both hydrophilic and hydrophobic granular materials. The tools developed can be used in designing different screening surfaces

Keywords: vibration-induced segregation, vibration-induced mixing, granular material, thermodynamics, enthalpy, entropy.

Citation:

L.A. Vaisberg, I.D. Ustinov, Phenomenology for vibration-induced size segregation and mixing of granular materials, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 182–189, DOI: 10.18721/JEST.25118.

Обогащение полезных ископаемых — самая большая область технологической деятельности человечества, где перерабатывается примерно 4 млрд тонн минерального сырья в год. В технологии обогащения минерального сырья наиболее распространенный процесс — это классификация (разделение, сепарация) по крупности сыпучего (гранулярного) материала, осуществляемая методами вибрационной ситовой классификации. Эффективность разделения рудного гранулярного материала по крупности определяет энергетические затраты на связанные с этим процессы дезинтеграции сырья, а также в ряде случаев напрямую влияет на товарное качество таких продуктов горной и химической индустрии, как строительный щебень или синтетические абразивные материалы. Зеркально обратный по отношению к разделению по крупности — процесс усреднения сегрегированного гранулярного материала, который также широко используется в горно-перерабатывающей промышленности для стабилизации качества рудных потоков в операциях дробления, измельчения и сепарации различными физическими и физико-химическими методами.

За последние годы были выполнены и опубликованы результаты ряда фундаментальных и прикладных исследований в области нелинейной механики сыпучих сред, в первую очередь минерального сырья, процессов их вибрационной сегрегации и разделения по крупности. Указанные процессы были всесторонне описаны на уровне динамики и кинетики взаимодействия отдельных частиц и их массива [1–4].

Постановка задачи

В нашей работе сделана попытка обобщающего феноменологического — с термодинамических позиций — описания процессов вибрационной классификации и усреднения по крупности гранулярных сред.

Для дискретной среды при постоянной температуре системы, например для газа, су-

ществует классическое выражение, называемое потенциалом Гиббса (энергия Гиббса, термодинамический потенциал, или просто — свободная энергия) G :

$$G = H - TS, \quad (1)$$

где H — энтальпия, приращение которой в квазистатическом изобарно-изотермическом процессе равно количеству теплоты, полученному (отданному) системой, а энтропийный инкремент TS — это произведение абсолютной температуры системы в градусах Кельвина на величину энтропии. Приведенное выражение (1) потенциала Гиббса является уравнением баланса термодинамических функций механической системы. Применимость понятия потенциала Гиббса для описания гранулярных сред, с нашей точки зрения, оправдана как статистически большим количеством частиц сыпучего материала, так и принятым в последнее время в современной физике сыпучих сред представлением о массе сыпучего материала как о своеобразном гранулярном газе [5–8].

«Участниками» процесса вибрационной сепарации по крупности (грохочение) являются классифицирующий аппарат, разделяемое сырье, гравитационное поле и, в незначительной степени, воздух атмосферы. «Участники» процесса усреднения по крупности — это усредняющий аппарат и также сырье (усредняемое), гравитационное поле и воздух атмосферы.

Приведенные далее выкладки относятся к разделению или усреднению сухих, однородных по вещественному составу сыпучих материалов, в которых сухое трение — основной параметр, отражающий фундаментальное свойство таких смесей, наряду с истинной плотностью и насыпной плотностью перерабатываемого сырья. Этот перечень фундаментальных свойств можно считать исчерпывающим. Все три указанных параметра измеряемы и количественно учитываются в предлагаемом подходе. В рассматриваемой системе, включа-



ющей классифицирующий (сепарирующий) или усредняющий аппарат, разделяемое/усредняемое сырье, гравитационное поле и атмосферу, неизменны масса материала, масса машины, постоянная Ньютона, начальная и конечная температура и упругие свойства частичек разделяемого материала.

Экспериментальная часть

Ранее в работах НПК «Механобр-Техника» было показано, что система «классификатор (разделитель, сепаратор)» – сырье в гравитационном поле» включает потери энергии в конечном виде в форме тепла и некие изменения энтропии системы, происходящие в результате изменения состава (упорядоченности) продуктов разделения по крупности (см.: Обогащение руд. 2018. № 1(373). С. 12–16). Интегрально процесс изменения энергии системы при вибрационной классификации или вибрационном усреднении имеет две группы источников. Первая группа связана с работой W_m собственно вибрационной машины, вторая группа – непосредственно с работой W_s классификации (сепарации) сыпучего материала по крупности, которую можно условно назвать «полезной» работой.

В общем энергетическом балансе, на наш взгляд, можно пренебречь ускорением материала при его разгрузке, так как оно компенсируется ускорением материала при его подаче на ситовую поверхность в режиме непрерывного процесса классификации (сепарации). В режиме периодической сепарации по крупности в закрытом устройстве, например при ситовом анализе, этот фактор вообще отсутствует. Также можно пренебречь возможным искривлением пространства при перемещении материала [9] ввиду относительно малого его количества.

Таким образом, изменение свободной энергии системы «грохот – сырье» можно представить как сумму параметров W_m и W_s :

$$\Delta G = W_m + W_s, \quad (2)$$

или при постоянной температуре в начале и конце процесса классификации/усреднения

$$\Delta G = W_m + W_s = \Delta H - T \Delta S, \quad (3)$$

где T – равновесная температура системы в градусах Кельвина.

При рассмотрении выражения (3) понятно, что только функцию ΔH (изменение энтальпии системы) затруднительно определить экспериментально, но она может быть получена расчетным путем после преобразования выражения (3):

$$\Delta H = W_m + W_s + T \Delta S. \quad (4)$$

При необходимости W_m можно определить по величине холостой работы агрегата, а W_s равно разнице между общей работой нагруженного агрегата ΔG и величиной W_m .

Отдельного обсуждения требует экспериментальное определение изменения энтропии системы ΔS .

Из определений потенциала Гиббса следует, что изменение энтропийного вклада (инкремента) тождественно изменению потенциальной энергии системы, то есть $\Delta E_V \equiv T \Delta S$. С другой стороны, как известно, одна из классических характеристик энтропии – это мера упорядоченности системы. Допустим, что пробы исходного полидисперсного гранулярного материала и продуктов его классификации по крупности имеют формы свободного правильного конуса. Такой же постулат можно принять и при инверсном процессе: при усреднении мы имеем один или несколько изначальных гранулярных продуктов и один конечный. Принимаемая для расчетов геометрическая форма в виде правильного конуса объясняется тем, что это естественная и основная форма массива сыпучего материала на плоскости в гравитационном поле, разумеется, за исключением монослоя. Именно в таком виде (с некоторой долей идеализации) консолидируется материал в питающих бункерах и емкостях после отсева. После ситовой классификации (сепарации) в простейшем случае полу-

чаются два, а в общем случае несколько продуктов рассева, каждый с более узким, т. е. более однородным гранулометрическим составом. Иначе говоря, на понятийном уровне энтропия конечных продуктов очевидно меньше энтропии исходного полидисперсного материала, а при усреднении — наоборот. Соответственно, более однородные по крупности продукты рассева обладают меньшей плотностью упаковки, меньшей насыпной плотностью и меньшим сухим внутренним трением в массиве. Меньшему сухому внутреннему трению в массиве соответствует меньший угол естественного откоса. Отсюда возникает предположение, что мерой энтропии свободного конуса сыпучего материала в гравитационном поле может служить условная величина его потенциальной энергии. Для общности рассуждения не столь важно, на какой относительной высоте будут находиться конусы продуктов — исходный и конечные (после рассева) — при сепарации, например на горизонтальном вибрационном грохоте, все продукты могут находиться на одной высоте.

Высота конуса h равна

$$h = \left(\frac{m (\operatorname{tg} \alpha^2)}{22,3 \rho} \right)^{1/3}. \quad (5)$$

Полученное по формуле (4) значение h используем для вычисления энтропийного вклада, учитывая, что потенциальная энергия TS равна mgh . Тогда

$$TS = mg \left(\frac{m (\operatorname{tg} \alpha^2)}{22,3 \rho} \right)^{1/3}. \quad (6)$$

Изменение энтропийного вклада при рассеве определяем так:

$$T \Delta S = \left(\sum T \Delta S_i \right) - T \Delta S_{\text{исх}}. \quad (7)$$

Формулы (6) и (7) являются расчетными.

Изменение потенциала Гиббса измеряется по общей потребляемой в процессе эксперимента электроэнергии. Параметр W_s определя-

ется как разность ΔG и энергии W_m холостого хода классификатора (сепаратора) с присоединенной статической нагрузкой, равной массе сепарируемого материала.

В уравнении $\Delta G - \Delta H + T \Delta S = 0$ величина ΔG всегда отрицательна; $T \Delta S$ процесса разделения по крупности имеет отрицательное значение, а при усреднении — положительное; ΔH соответствует диссипации энергии системы, определяется расчетным путем и имеет отрицательное значение. Предлагаемый подход не зависит от числа начальных и конечных продуктов.

В качестве первого примера нами взят процесс разделения по крупности почти идеальной системы шариков свинцовой дробы диаметром 2,25 и 4,75 мм с графитизированной поверхностью. Сепарацию проводили на ситовом анализаторе с орбитальными колебаниями сит в горизонтальной плоскости с частотой 14 Гц. Сито имело квадратные ячейки со стороной 4 мм. Выбор разделяемой системы объясняется геометрически правильной формой частиц и весьма малыми коэффициентами трения частиц о сито и борта просеивающего устройства, а также малым коэффициентом трения частиц между собой. Силами гидрофобного взаимодействия графитизированных частиц между собой можно пренебречь ввиду практически точечной площади соприкосновения. Результаты расчетов термодинамических функций и параметров классификации свинцовой дробы, Дж/кг, следующие:

- $\Delta G = 168,0$ Дж/кг;
- $U_M = 162,0$ Дж/кг;
- $U_S = 6,0$ Дж/кг;
- $\Delta H = 168,036$ Дж/кг;
- $T \Delta S = 0,036$ Дж/кг.

Далее были проведены в аналогичных условиях исследования вибрационной классификации (разделения) рудных объектов: дробленой апатитовой руды и медно-никелевой руды крупностью 20 мм. За расчетное время рассева во всех экспериментах принимали время до-



стижения 98-процентной эффективности разделения по заданному классу 2,4 мм. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

Термодинамические функции и параметры классификации различных видов сырья, Дж/кг

Table 1

Thermodynamic functions and classification parameters of various types of raw materials, j / kg

$-\Delta G$	$-U_M$	$-U_S$	$-\Delta H$	$-T\Delta S$
<i>Апатитовая руда</i>				
1560,0	1500,0	60,0	1560,12	0,12
<i>Медно-никелевая руда</i>				
1680,0	1620,0	60,0	1680,14	0,14

Следует подчеркнуть, что полученные величины относятся исключительно к системе «классификатор (сепаратор) – перерабатываемое сырье в гравитационном поле», а не к отдельно взятому классификатору, поэтому превышение величины энтальпии над измеряемой величиной затраченной энергии (работы) привода компенсируется работой уменьшения потенциальной энергии сырья в гравитационном поле (как бы его «падением»). Очевидным образом при этом соблюдается закон сохранения энергии.

Также нас не должны смущать полученные данные об уменьшении («уничтожении») энтропии в процессе классификации сыпучего материала по крупности. Энтропийный вклад $T\Delta S$ – крайне малая недиссипативная составляющая процесса классификации по крупности, реализуемая только во внешнем силовом поле (в нашем случае – в гравитационном поле Земли).

Классическим аналогом описываемых процессов является изменение энтропии в якобы замкнутой системе – знаменитый парадокс, известный как «демон Максвелла».

Более того, термодинамическая картина разделения сыпучего материала под действием вибрации принципиально не меняется даже при отсутствии физической разделительной перегородки в виде сита (рис. 1). Это явление в форме сегрегации по крупности почти всегда имеет место в надрешетной зоне в первой от точки загрузки половине рабочей зоны вибрационного классификатора, когда материал поступает на классификатор и перемещается толстым слоем. В явлении вертикальной вибрационной сегрегации полидисперсного материала роль множества «сит» выполняют более крупные частицы, пропускающие вниз частицы меньшего размера [4, 10].



Рис. 1. Бесситовая вибрационная сегрегация
Fig. 1. Unstitched vibration segregation

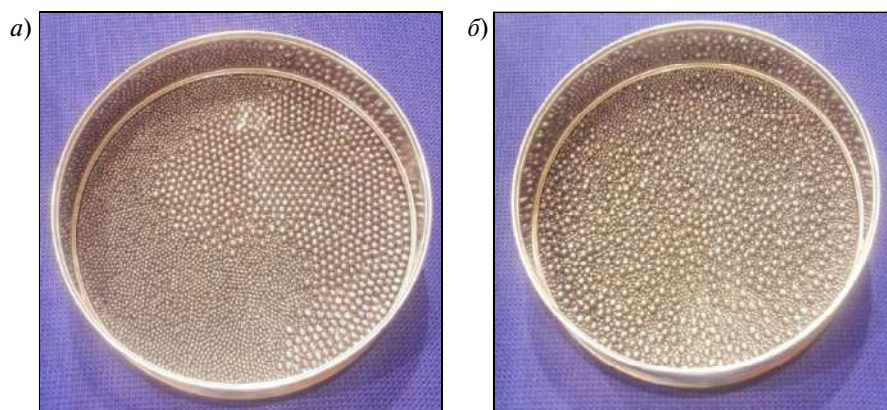


Рис. 2. Усреднение дроби (*a* – через 3 с, *б* – через 30 с)
Fig. 2. Fraction averaging (*a* – 3 s; *б* – 30 s)

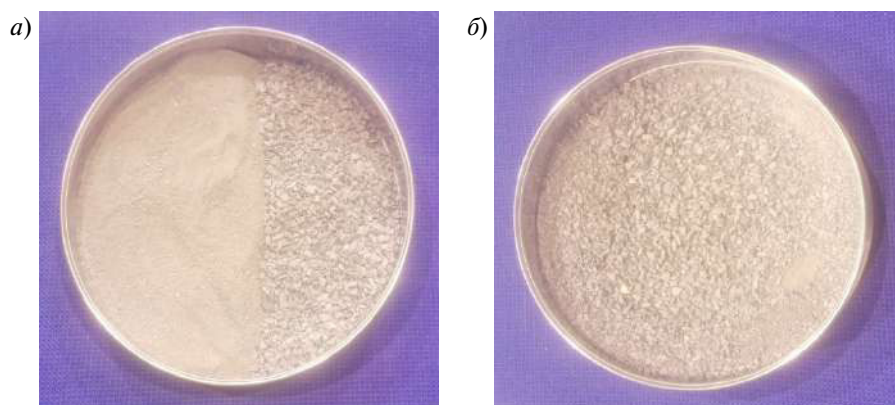


Рис. 3. Усреднение медно-никелевой руды (*a* – 1 мин, *б* – 10 мин)
Fig. 3. Averaging of copper-nickel ore (*a* – 1 min; *б* – 30 min)

Т а б л и ц а 2
Термодинамические параметры процесса
вибрационного усреднения, Дж/кг

Table 2
Thermodynamic parameters of the process
of vibration averaging, j / kg

Объект	Время усреднения, с	$-\Delta G$	$-\Delta H$	$T\Delta S$
Свинцовая дробь	60	1740,0	1739,96	0,036
Cu-Ni руда	600	19140,0	19139,86	0,14

В условиях, когда в системе отсутствует физическая разделительная ситовая поверхность,

процесс сегрегации может быть обратимым, т. е. может быть реализован процесс усреднения материала по крупности. При инверсии процесса (при усреднении) изменение энтропии системы положительно, а энтальпия меньше затраченной энергии привода (рис. 2, 3, табл. 2).

Отметим, что приведенные выкладки энергетической оценки составляющих процессов вибрационной классификации и усреднения по крупности представляют не только познавательный интерес, а уже используются в Научно-производственной корпорации «Механобр-Техника», например при конструировании новых типов вибрационных машин с просеивающими поверхностями сложной формы (рис. 4–6).

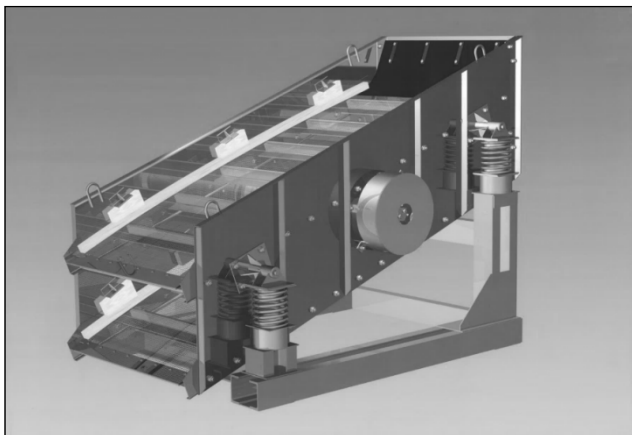


Рис. 4. 3D модель многослойного грохота
Fig. 4. 3D model of busy screen

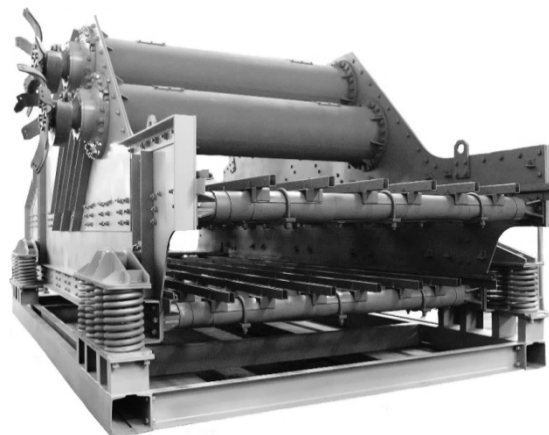


Рис. 5. Виброгрохот тяжелого типа на станине
Fig. 5. Heavy type vibrating screen on the stocks

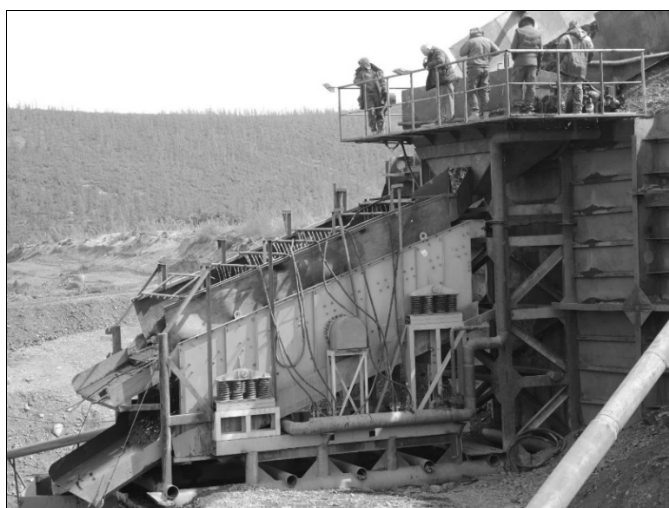


Рис. 6. Многослойный виброгрохот в составе золотоизвлекательной установки
Fig. 6. Multi-chip vibrating screen as part of a gold extraction unit

Выводы

Определены энергетические составляющие процессов вибрационной классификации (разделения) и усреднения гранулярного материала по крупности.

Показано, что в системе «классификатор – разделяемое полидисперсное сырье в гравитационном поле» происходит недиссипативная энергетическая потеря, а при принудительном усреднении имеет место образование (увеличение) энтропии, причем эти явле-

ния не противоречат второму началу термодинамики.

Разработанный феноменологический инструментарий может быть использован как оценочный при конструировании разнообразных просеивающих поверхностей.

Авторы приносят благодарность Т.Н. Балдаевой и Н.Б. Ржанковой за помощь в экспериментальной работе.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект 17-79-30056).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блехман И.И. Вибрационная механика и вибрационная реология. Теория и приложения. М.: Физматлит, 2018. 752 с. ISBN 978-5-9921-1750-0.
2. Пелевин А.Е. Вероятность прохождения частиц через сито и процесс сегрегации на вибрационном грохоте // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 1. С. 119–129.
3. Dong Hailin, Liu Chusheng, Zhao Yuemin, Zhao Lala. Influence of vibration mode on the screening process // Inter.Journal of Mining Science and Technology, 2013, Vol. 23, Issue 1. P. 95–98.
4. Вайсберг Л.А., Иванов К.С., Мельников А.Е. Совершенствование подходов к математическому моделированию процесса вибрационного грохочения // Обогащение руд. 2013. № 2. С. 22–26.
5. Kremer G.M., Santos A., Garzio V. Transport coefficients of granular gas of inelastic rough spheres // Phys. Rev. 2014. E90, 022205.
6. Khalil N., Garzio V., Santos A. Hydrodynamic Burnett equations for Maxwell models of granular gas // Phys. Rev. 2014. E89, 052201.
7. Rongali R., Alam M. Higher-order effects on orientational correlation and relaxation dynamics in homogeneous cooling of rough a granular gas // Phys. Rev. 2014. E89, 062201.
8. Pastenes J.C., Geminard J.C., Melo F. Interstitial gas effect on vibration granular columns // Phys. Rev. 2014. E89, 062205.
9. Сахаров А.Д. Вакуумные квантовые флуктуации и теория гравитации // ДАН СССР. 1967. Т. 177. № 1. С. 70–71.
10. Блехман И.И., Блехман Л.И., Васильков В.Б., Якимова К.С. К теории эффекта вибрационной градиентной сегрегации применительно к процессу грохочения // Обогащение руд. 2015. № 6. С. 19–22.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВАЙСБЕРГ Леонид Абрамович — доктор технических наук, академик РАН, научный руководитель НПК «Механобр-Техника» (АО)

E-mail: gornyi@mtspb.com

УСТИНОВ Иван Давыдович — доктор химических наук, руководитель НОЦ НПК «Механобр-Техника» (Акционерное общество)

E-mail: gornyi@mtspb.com

Дата поступления статьи в редакцию: 12.03.2019

REFERENCES

- [1] Blekhan I.I. Vibratsionnaya mekhanika i vibratsionnaya reologiya. Teoriya i prilozheniya. M.: Fizmatlit, 2018. 752 s. ISBN 978-5-9921-1750-0. (rus.)
- [2] Pelevin A.Ye. Veroyatnost prokhozheniya chastits cherez sito i protsess segregatsii na vibratsionnom grokhote. Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal. 2011. № 1. S. 119–129. (rus.)
- [3] Dong Hailin, Liu Chusheng, Zhao Yuemin, Zhao Lala. Influence of vibration mode on the screening process. Inter. Journal of Mining Science and Technology, 2013, Vol. 23, Issue 1, pp. 95–98.
- [4] Vaysberg L.A., Ivanov K.S., Melnikov A.Ye. Sovershenstvovaniye podkhodov k matematicheskomu modelirovaniyu protsessa vibratsionnogo grokhocheniya. Obogashcheniye rud. 2013. № 2. S. 22–26. (rus.)
- [5] Kremer G.M., Santos A., Garzio V. Transport coefficients of granular gas of inelastic rough spheres. Phys. Rev., 2014, E90, 022205.
- [6] Khalil N., Garzio V., Santos A. Hydrodynamic Burnett equations for Maxwell models of granular gas. Phys. Rev. 2014, E89, 052201.
- [7] Rongali R., Alam M. Higher-order effects on orientational correlation and relaxation dynamics in homogeneous cooling of rough a granular gas. Phys. Rev. 2014, E89, 062201.
- [8] Pastenes J.C., Geminard J.C., Melo F. Interstitial gas effect on vibration granular columns. Phys. Rev. 2014, E89, 062205.
- [9] Sakharov A.D. Vakuumnnyye kvantovyye fluktuatsii i teoriya gravitatsii. DAN SSSR. 1967. T. 177. № 1. S. 70–71. (rus.)



- [10] **Blekhman I.I., Blekhman L.I., Vasilkov V.B., Yakimova K.S.** K teorii effekta vibratsionnoy gradiyent-
noy segregatsii primenitelno k protsessu grokhocheniya.
Obogashcheniye rud. 2015. № 6. S. 19–22. (rus.)

THE AUTHORS

VAISBERG Leonid A. — *Research and engineering corporation «Mekhanobr-Tekhnika»*

E-mail: gornyi@mtspb.com

USTINOV Ivan D. — *Research and engineering corporation «Mekhanobr-Tekhnika»*

E-mail: gornyi@mtspb.com

Received: 12.03.2019

DOI: 10.18721/JEST.25119
УДК 00:920:621:378

Ю.С. Васильев, М.П. Федоров

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

ВАСИЛИЙ АНДРЕЕВИЧ ГЛУХИХ (к 90-летию со дня рождения)

В статье описана деятельность известного ученого Василия Андреевича Глухих, академика РАН, доктора технических наук, профессора, почетного руководителя АО «НИИЭФА имени Д.В. Ефремова», президента группы компаний ООО «НИИЭФАЭнерго».

Ключевые слова: В.А. Глухих, академик РАН, Отделение энергетики, НИИЭФА, НИИЭФАЭнерго, МГД-машиностроение.

Ссылка при цитировании:

Ю.С. Васильев, М.П. Федоров. Василий Андреевич Глухих (к 90-летию со дня рождения) // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 190–193.
DOI: 10.18721/JEST.25119.

Yu.S. Vasiliev, M.P. Fedorov

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

VASILII ANDREEVICH GLUKHIKH: DEDICATED TO THE 90th ANNIVERSARY OF BIRTH

The article describes the activities of the famous scientist Vasily Andreyevich Glukhikh, academician of the Russian Academy of Sciences, doctor of technical sciences, professor, honorary head of the «NIEFA named after D.V. Efremova», president of the group of companies ООО NIEFAEnergo.

Keywords: V.A. Glukhikh, Academician of the Russian Academy of Sciences, Department of Energy, NIEFA, NIEFAEnergo, MHD-Mechanical Engineering.

Citation:

Yu.S. Vasiliev, M.P. Fedorov, Vasilii Andreevich Glukhikh: dedicated to the 90th anniversary of birth, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 25(01)(2019) 190–193.
DOI: 10.18721/JEST.25119.



В.А. Глухих — академик РАН, доктор технических наук, профессор, почетный руководитель АО «НИИЭФА имени Д.В. Ефремова», президент группы компаний ООО «НИИЭФАЭнерго».

Родился 10 февраля 1929 г. в дер. Большая Каменная Петуховского района Курганской области.

С 1953 г. после окончания Томского политехнического института стал работать в НИИ электрофизической аппаратуры имени Д.В. Ефре-

мова и за эти годы прошел путь от инженера-исследователя до генерального директора. С 2003 г. он — научный руководитель Института, а с 2017 г. — почетный научный руководитель Института.

Академик РАН В.А. Глухих более 40 лет возглавляет исследования и разработки по ряду направлений ядерной физики и энергетики. Им создан научный фундамент и организовано производство, во многом обеспечившие становление и развитие прорывных проектов XX века в областях:

мощной импульсной электроэнергетики,
электрофизики,
мощных газоразрядных лазеров,
ядерной энергетики,



электрофизического аппаратостроения, инженерно-физических основ термоядерной энергетики будущего.

Достигнуты научные и технические результаты мирового уровня в развитии индуктивных методов накопления и преобразования энергии для мощных электрофизических комплексов и энергосберегающих технологий, решении сложнейших физико-технических задач магнитного и инерциального удержания плазмы в термоядерных установках, создании уникальных сверхпроводящих электромагнитов для физических исследований и т. п.

Деятельность творческих коллективов, руководимых академиком В.А. Глухих, во многом определяет мировой уровень российских достижений, создает предпосылки для дальнейшего успешного развития отечественных разработок и позволяет нашей стране сохранять ведущие позиции в ряде областей электроэнергетики и в международном термоядерном сообществе.

В.А. Глухих заложил инженерно-физические основы проектирования магнитогидродинамических электрических машин и сформировал ведущую научную школу в области МГД-электромашиностроения. Выполненные под его руководством исследования и разработки получили мировое признание. Они нашли воплощение при организации серийного производства МГД-насосов и дросселей с жидкометаллическим рабочим телом для реакторов на быстрых нейтронах и космических ядерно-энергетических установок. Разработанными и изготовленными в НИИЭФА высоконадёжными электромагнитными насосами укомплектованы все отечественные ядерные реакторы на быстрых нейтронах. В общей сложности создано более 100 таких насосов различных модификаций. В 1985–86 гг. разработан и успешно испытан самый мощный в мире на тот период электромагнитный насос производительностью 3600 м³/час для промышленного ядерного реактора.

Технические параметры, существенно превышающие мировой уровень, продемонстрировали также электромагнитные насосы и дроссели для ядерно-энергетических установок космического назначения. С 1975 по 1987 год свыше

30 спутников серии «Космос» были укомплектованы такими насосами. Хорошие перспективы имеет и созданная гамма МГД-устройств для ракетных ионно-плазменных двигателей.

Под научным руководством В.А. Глухих создан уникальный автономный импульсный МГД: генератор мощностью 500 МВт на пороховом топливе. Основные компоненты генератора с экстремально высокими параметрами — система возбуждения, индуктивный накопитель, коммутирующая аппаратура — до настоящего времени не имеют мировых аналогов, а его удельные характеристики до сих пор остаются непревзойдёнными.

Особо необходимо подчеркнуть выдающийся творческий и организационно-технический вклад В.А. Глухих в решение глобальной энергетической проблемы современности — овладение энергией управляемого термоядерного синтеза. С середины 50-х годов прошлого века он принимает личное творческое участие, а с 70-х непосредственно руководит исследованиями и разработками по инженерно-физическим проблемам магнитно- и инерциальноуправляемого термоядерного синтеза, является автором многих ключевых концепций и базовых технических решений. Он возглавлял группу инженеров и учёных НИИЭФА, разработавших первую отечественную тороидальную термоядерную установку «Альфа» и выполнивших на ней исследования по физике плазмы. В дальнейшем под его руководством созданы уникальные электрофизические комплексы: первый в мире токамак со сверхпроводящей обмоткой тороидального поля Т-15; токамак с адиабатическим сжатием плазменного шнура ТСП, в котором для формирования магнитного поля использован крупнейший в мире индуктивный накопитель с запасённой энергией 900 МДж; ряд экспериментальных тороидальных установок; электронно-пучковый комплекс «Ангара-5»; крупнейший отечественный лазерный комплекс «Искра-5» и установка «Луч» — модуль лазерного комплекса нового поколения «Искра-6».

С 1978 г. в рамках международного проекта ИНТОР-ИТЭР успешно ведутся крупномасштабные комплексные экспериментальные исследования, математическое моделирование,

проектно-конструкторские изыскания и технологическая отработка основных систем экспериментального термоядерного реактора-токамака. В рамках этого Проекта НИИЭФА под научным руководством В.А. Глухих выполняет функции Главного конструктора. В.А. Глухих принимал также прямое участие в работе международных органов управления Проектом. Выполненные исследования и разработки создали необходимые предпосылки для подписания в ноябре 2006 года межправительственного соглашения о строительстве реактора-токамака ИТЭР – прообраза термоядерных электростанций XXI века. Сооружение реактора началось в 2007 г. Сейчас это крупнейший международный проект с участием 7 стран, включая Евросоюз. Он станет первым шагом на пути к универсальному и практически неисчерпаемому источнику энергии.

Для научной школы и творческих коллективов, возглавляемых В.А. Глухих, характерно постоянное внимание к вопросам практического использования разработанного электроэнергетического и электрофизического оборудования. НИИЭФА стал крупнейшим отечественным разработчиком и изготовителем гаммы ускорителей различных типов для лучевой терапии и диагностики, промышленной дефектоскопии, стерилизации, радиационно-химических и природоохранных технологий, активационного анализа, модификации конструкционных материалов. Эта аппаратура используется в России, СНГ, странах дальнего зарубежья. Созданы научно-технические предпосылки для промышленного освоения в ближайшем будущем лазерных технологий и оборудования с применением лазеров различных типов. В их числе: лазерная резка и сварка металлов, наплавка порошковых покрытий, разделение изотопов, производство фуллеренов и др.

В.А. Глухих – автор пяти монографий, более 160 научных публикаций, более 20 крупных изобретений.

В 1987 году он избран действительным членом (академиком) АН СССР; является академиком ряда отраслевых академий: Академии электротехнических наук, Академии инженерных наук, Международной академии высшей

школы, Международной энергетической академии, Международной академии прикладной радиоэлектроники.

За выдающиеся научные и технические достижения В.А. Глухих удостоен Ленинской премии, Государственных премий СССР и Российской Федерации в области науки и техники; премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, премии имени академика А.Н. Крылова Правительства Санкт-Петербурга; премии Правительства Санкт-Петербурга за выдающийся вклад в развитие высшего профессионального образования; премии Правительства Российской Федерации в области образования; премии Международной ассоциации специалистов – термоядерщиков (Fusion Power Associates).

В.А. Глухих награждён орденами «Знак Почета», Трудового Красного Знамени, «За заслуги перед Отечеством» III и IV степени, Орденом Почета и медалями СССР и Российской Федерации, отраслевыми наградами, в том числе почётными знаками «За особый вклад в развитие Санкт-Петербурга» и «За заслуги перед Санкт-Петербургом»; удостоен звания «Почетный инженер Санкт-Петербурга».

В.А. Глухих уделяет постоянное внимание подготовке и воспитанию научных и инженерных кадров: более 10 лет возглавлял кафедру инженерной электрофизики и техники высоких напряжений в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете, а на электромеханическом факультете СПбГПУ читал курс лекций «Управляемый термоядерный синтез (УТС)». Признанием его заслуг на поприще высшего технического образования стало его избрание действительным членом Международной и Российской академии наук Высшей школы (МАН ВШ). За плодотворную многолетнюю учебно-методическую деятельность Василий Андреевич решением Ученого совета университета в 2004 г. удостоен звания «Почетный профессор СПбГПУ». В течение 20 лет он был председателем диссертационного совета Д 212.222.16 СПбГПУ, членом Ученого совета электромеханического факультета.

Сотрудники, студенты и аспиранты СПбГПУ плодотворно сотрудничали с НИИЭФА и при-



нимали активное участие в решении инженерных проблем УТС: создании разнообразных жидкометаллических МГД-устройств для термоядерных реакторов (диверторы, лимиттеры); разработке инжекторов топливных таблеток; моделировании и исследовании теплового и напряжённого состояния конструкций сверхпроводящих электромагнитных систем. Большой объем исследований выполнен в области теоретической и прикладной магнитной гидродинамики в связи с разработкой магнитогидродинамических (МГД) насосов и жидкометаллических устройств ядерного и термоядерного реакторов, а также мощных формирующих линий для установок инерциального термоядерного синтеза.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований неоднократно обсуждались на всесоюзных конференциях по инженерным проблемам термоядерных реакторов. Плодотворное сотрудничество между СПбГПУ и НИИЭФА продолжается и в наши дни. За последние 30 лет из стен университета на работу в НИИЭФА пришло более 600 молодых специалистов, окончивших различные факультеты СПбГПУ. Многие из них продолжают успешно работать, занимая руководящие должности и возглавляя ведущие научные направления.

В.А. Глухих ведет активную научно-педагогическую и научно-общественную деятельность как член Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, член Президиума Санкт-Петербургского Научного Центра РАН, постоянный член Научно-технического совета при Правительстве Санкт-Петербурга, член Коллегии Коми-

тета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга, член Президиума Союза промышленников и предпринимателей Санкт-Петербурга. Он возглавляет Научный совет по мощной импульсной энергетике РАН, секцию «Физико-технические проблемы УТС» Научного совета РАН по комплексной проблеме «Физика высокотемпературной плазмы», специализированный научный совет по физико-техническим проблемам управляемого термоядерного синтеза в составе Объединенного научного совета по проблемам энергетики при Президиуме СПб НЦ РАН, входит в бюро Объединенного научного совета СПб НЦ РАН по проблемам энергетики при Президиуме СПб НЦ РАН, в редколлегии журналов «Журнал технической физики» и «Инновации», в течение многих лет был председателем диссертационного совета при НИИЭФА.

В.В. Глухих принимал активное участие в развитии посёлка Металлострой, строительстве жилья, двух школ, детских учреждений, Дома ученых НИИЭФА, спорткомплекса, больничного комплекса (медсанчасть имени Соколова), который и в настоящее время является одним из самых современных лечебных учреждений.

Василий Андреевич активно способствовал реставрации храма Александра Невского в Усть-Ижоре, сооружению памятника Александру Невскому, диорамы и музея в честь победы над шведами в 1240 году.

В.В. Глухих учредил свой Санкт-Петербургский региональный общественный благотворительный фонд в поддержку молодежного научно-технического творчества.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ВАСИЛЬЕВ Юрий Сергеевич — доктор технических наук, академик РАН, научный руководитель СПбГПУ Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: president@spbstu.ru

VASILIEV Yurii S. — Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: president@spbstu.ru

ФЕДОРОВ Михаил Петрович — доктор технических наук, академик РАН, советник ректора Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

T-mail: M.Fedorov@spbstu.ru

FEDOROV Mikhail P. — Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: M.Fedorov@spbstu.ru

DOI: 10.18721/JEST.25120
УДК 929:536:532:620.9

Ю.С. Васильев, А.И. Кириллов

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

АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ РАДЦИГ (к столетию со дня рождения)

Статья содержит биографические данные и сведения о творческом пути крупного ученого в области теплотехники и механики. Отражены главные этапы педагогической деятельности А.А. Радцига в Киевском и Ленинградском политехнических институтах. Перечислены основные его труды по термодинамике, тепловым двигателям, прикладной механике и истории теплотехники. Подчеркнута роль А.А. Радцига как основателя ленинградской школы турбостроителей.

Ключевые слова: теплотехника, прикладная механика, история теплотехники, ленинградская школа турбостроителей.

Ссылка при цитировании:

Ю.С. Васильев, А.И. Кириллов. Александр Александрович Радциг (к столетию со дня рождения) // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 194–199. DOI: 10.18721/JEST.25120.

Yu.S. Vasiliev, A.I. Kirillov

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

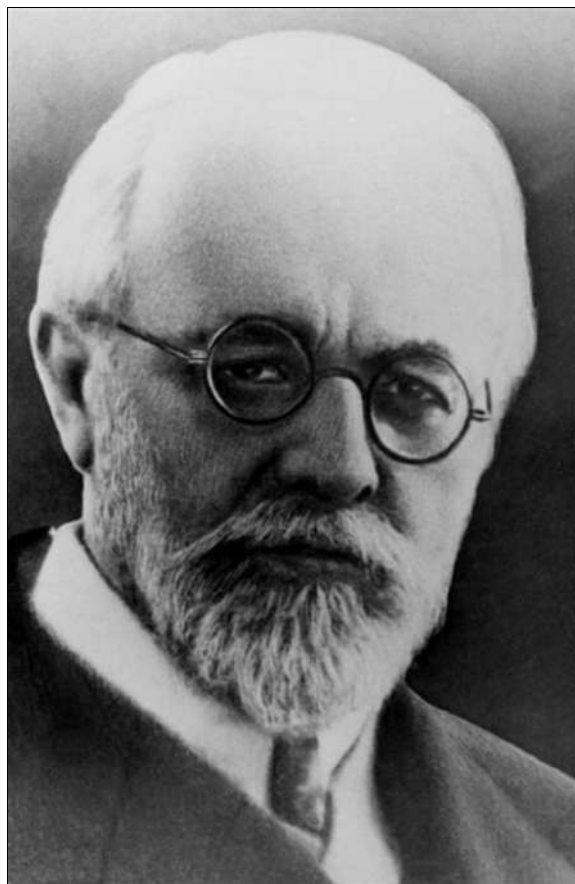
ALEXANDER RADZIG: DEDICATED TO THE 150TH ANNIVERSARY OF BIRTH

The article contains biographical data and information about the creative path of a major scientist in the field of heat engineering and mechanics. The main stages of A.A. Radzig's pedagogical activity in Kiev and Leningrad Polytechnic institutes are reflected. His main works on thermodynamics, thermal engineering, applied mechanics and history of thermal engineering are mentioned. The role of A.A. Radzig as the founder of the Leningrad school of turbo-builders is emphasized.

Keywords: thermal engineering, applied mechanics, thermal engineering history, the leningrad school of turbo-builders.

Citation:

Yu.S. Vasiliev, A.I. Kirillov, Alexander Radzig: dedicated to the 150th anniversary of birth, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 194–199, DOI: 10.18721/JEST.25120.



Восьмого февраля 2019 года исполнилось 150 лет со дня рождения крупного ученого теплотехника и механика заслуженного деятеля науки и техники члена-корреспондента РАН профессора Александра Александровича Радцига.

А.А. Радциг родился в Тульской губернии в семье Александра Антоновича Радцига — инженера путей сообщения, известного работами в области эксплуатации железных дорог. После окончания Кременчугского реального училища Александр Александрович поступил на механическое отделение Санкт-Петербургского технологического института, одного из ведущих центров инженерного образования в России конца XIX века. В Технологическом институте лекции в те годы читали известные профессора И.А. Евневич (по прикладной механике, гидравлике, гидравлическим двигателям и теории упругости), П.В. Куторниц-

кий (по тепловым двигателям), И.И. Боргман (по термодинамике), под влиянием которых сложился круг научных интересов А.А. Радцига [1]. Большую роль в инженерном образовании А.А. Радцига сыграли составлявшие в то время значительную долю учебного плана графические работы. Александр Александрович считал, что чертежные, где во время курсового и дипломного проектирования студенты активно общались между собой и с преподавателями, были отличной школой, в которой формировались главные технические знания и навыки [2].

Окончив Технологический институт в 1891 году, А.А. Радциг с целью углубления технических знаний продолжил образование на математическом отделении Берлинского университета, где слушал лекции математиков Карла Фукса, Фердинанда Фробениуса, Карла Шварца, физиков Германа Гельмголь-

ца и Макса Планка. В 1895 году Александр Александрович завершил математическое образование, получив степень доктора философии после успешной защиты диссертации «Приложение теории Зелова к симметричным группам».

По возвращении в Санкт-Петербург А.А. Радциг работал в качестве специалиста по паровым машинам на Варшавской железной дороге, а затем на Невском машиностроительном заводе. В 1896 году он был приглашен в Технологический институт и «по Высочайшему соизволению Государя Императора» командирован за границу для подготовки к преподавательской деятельности, сначала сроком на 1 год, затем еще на 6 месяцев; при этом ему была предоставлена стипендия 1440 руб./год. За время командировки Александр Александрович ознакомился с содержанием лекционных курсов и организацией лабораторных занятий в нескольких технических университетах, а также посетил крупные заводы в Германии, Франции, Швейцарии и Бельгии. После завершения командировки А.А. Радциг начал работать в Технологическом институте преподавателем черчения.

Весной 1898 года А.А. Радциг получил приглашение на кафедру термодинамики и тепловых двигателей вновь создаваемого Киевского политехнического института, первым директором которого был выдающийся ученый Виктор Львович Кирпичев. Поскольку институт находился еще в стадии организации и занятия на старших курсах, где преподавались специальные дисциплины, должны были начаться лишь через два года, Александр Александрович осенью 1898 года был командирован сроком на 1 год и с предоставлением содержания 1800 руб. за границу для разработки будущих лекционных курсов и подготовки к званию профессора. На этот раз его внимание было сосредоточено главным образом на изучении теории и практики создания тепловых машин. Он посетил ряд машиностроительных заводов

в Англии, где ознакомился с конструкциями и технологическим циклом производства паровых машин и других тепловых двигателей, принял участие в конгрессе по прикладной механике, состоявшемся в Париже.

Осенью 1900 года А.А. Радциг начал преподавать в Киевском политехническом институте в должности исполняющего обязанности экстраординарного профессора. За девять лет работы в Киеве Александр Александрович опубликовал четыре учебника: по термодинамике, паровым машинам, гидравлике и прикладной механике. Его научные интересы были связаны с теорией двигателей внутреннего сгорания и паровых машин. В 1904 году А.А. Радциг защитил диссертацию «Математическая теория обмена тепла в цилиндрах паровых машин», был утвержден ученым советом института в звании адъюнкта прикладной механики и избран деканом механического факультета, а в 1906 году — ординарным профессором.

Киевский период был исключительно плодотворным в творческой биографии Александра Александровича. Именно здесь в полной мере раскрылись его блестящие способности и проявились плоды глубокого математического образования. В 1908 году Александр Александрович ушел из Киевского политехнического института, подав в отставку вместе с группой ведущих профессоров в знак протеста против введения реакционных «Правил о студенческих организациях и проведении собраний в стенах высших учебных заведений» [3].

В 1909 году А.А. Радциг был избран на должность ординарного профессора прикладной механики в Санкт-Петербургском политехническом институте. Он читал лекционные курсы по термодинамике и тепловым двигателям, машиноведению и прикладной механике. Издал курсы лекций по паровым машинам. Он публиковал статьи по расчету сверхзвукового истечения и по термодинамическим свойствам водя-



ного пара, по вопросам, связанным с эффективностью и вибрацией дизельных двигателей.

В том же 1909 году А.А. Радцига избрали деканом, обязанности которого он выполнял в течение десяти лет*. Александр Александрович организовал на механическом отделении специальные занятия для молодых преподавателей, где щедро делился своим педагогическим опытом. Предметом особой его заботы была лабораторная база отделения, т. к. он придавал лабораторным занятиям большое значение в инженерном образовании. На лабораторных стендах, помимо проведения учебных работ, выполнялись также экспериментальные исследования, необходимые для построения некоторых разделов теории прикладных курсов, и научно-исследовательские работы по заказам промышленности.

Результативная деятельность А.А. Радцига была по достоинству оценена. «Высочайшим указом по гражданскому ведомству» он был произведен в 1897 году в чин надворного советника, в 1901 году — в чин коллежского советника, наконец, в 1905 год — статского советника. Более того, в 1902 году «Государь Император всемилостивейше наградила» А.А. Радцига орденом Св. Станислава 3-й степени; затем, в 1908 году — орденом Св. Анны 3-й степени; в 1912 году — орденом Святого равноапостольного князя Владимира 4-й степени; в 1913 году — «наградной светло-розовой медалью в память 300-летия Дома Романовых».

В сентябре 1917 года Советом политехнического института А.А. Радциг был избран на должность директора, который в том же месяце стал называться ректором в связи с тем, что отделения института были преобразованы в факультеты. Ректором Александр Александрович был недолго (год и 2,5 месяца), но в очень сложное для истории института время. Он устанавливал деловые отношения с советской

властью, опираясь на решения Совета института, часть членов которого не приняла Октябрьскую революцию. Решал непрерывно возникающие проблемы по организации учебного процесса в условиях острого дефицита топлива и продуктов питания, репрессий против профессоров и преподавателей. Вносил оперативные коррективы в учебные планы в связи с резким изменением социального состава студенческого контингента, пополнившегося детьми рабочих и крестьян, не имевшими достаточной подготовки. Создавал новую структуру управления институтом с участием представителей студентов [4].

В 1918 году А.А. Радциг возглавил кафедру «Термические машины». К тому времени в энергетике больших мощностей и в крупнотоннажном судостроении все чаще вместо паровой машины стали применять изобретенную в конце XIX века паровую турбину. Новый перспективный двигатель сразу же привлек внимание Александра Александровича. Появились первые его труды в этой области, посвященные расчету критической скорости турбинного вала (1906 г.) и вопросам истечения пара со сверхзвуковыми скоростями (1910 г.). Работая на кафедре «Термические машины», А.А. Радциг руководил экспериментальными исследованиями на стендах, оборудованных новейшими паровыми машинами и паровыми турбинами, создал серию учебных пособий по паротурбинным установкам. В 1926 году им был опубликован выдержавший несколько переизданий курс «Паровые турбины», а в 1928 году — справочная книга «Формулы, таблицы и диаграмма водяного пара», содержащая наиболее точные для того времени данные о термодинамических свойствах водяного пара. За книгу «Паровые турбины» Александру Александровичу была присуждена премия наркомата тяжелой промышленности. В этот период он работал также в Палате мер и весов по совместительству.

А.А. Радциг принял активное участие в организации Всесоюзного котлотурбинного инсти-

* Вторично А.А. Радциг был избран деканом механического факультета на пятилетний срок в 1925 г.

тута (ВКИ), выделившегося из Политехнического института в 1930 г. при его реорганизации. В составе ВКИ Александр Александрович создал первую в нашей стране кафедру паровых турбин («Паровые турбины и машины»), которая оказала большое влияние на становление и развитие паротурбостроения в России. В 1934 году эта кафедра при очередной реорганизации Политехнического института перешла в состав энергомашиностроительного факультета, в числе организаторов которого был А.А. Радциг.

Заведую кафедрой «Паровые турбины и машины» с момента ее основания и до конца своей жизни, Александр Александрович, как и в прежние годы, значительную часть времени уделял изданию учебников, учебных и справочных пособий для студентов и инженеров. Он трижды переиздал курс прикладной механики (1930, 1933 и 1934 гг.), дважды выпустил курс «Теория и расчет конденсационных установок» (1930 и 1934 гг.). Он публиковал результаты исследований прочности вращающихся дисков криволинейного профиля. На высоком уровне организовывал курсовое и дипломное проектирование, придавая ему первостепенное значение в процессе обучения будущих инженеров. Руководил научной работой аспирантов и сотрудников кафедры по регулированию турбин, аэродинамике их проточной части, работе на режимах частичных нагрузок, по прочности деталей турбомашин.

Консультировал работников научно-исследовательских учреждений, промышленных предприятий и руководящих тяжелой промышленностью организаций. Курировал заочные отделения Политехнического института на ленинградских заводах. Читал курс лекций по термодинамике в Ленинградском университете. Участвовал в работе Академии наук,** будучи почетным председателем комиссии по термодинами-

ке. Представлял Политехнический институт в Центральном совете экспертов при ВСНХ***.

А.А. Радциг создал школу инженеров-турбостроителей и научных работников, глубоко понимавших физические основы и теорию процессов в паровых турбинах, способных проектировать и организовать производство новых паровых турбин на уровне лучших мировых образцов. Среди его многочисленных учеников — известные конструкторы и ученые в области паротурбостроения: М.И. Гринберг и А.В. Левин (Ленинградский металлический завод), А.Х. Старостенко (Кировский завод), В.Д. Пивень (Центральный котлотурбинный институт), Л.А. Шубенко-Шубин (Центральный котлотурбинный институт, Харьковский турбогенераторный завод), И.И. Кириллов, заведовавший кафедрой «Паровые турбины и машины» в 1944–1951 и в 1961–1985 годах, С.А. Кантор, заведовавший той же кафедрой в 1951–1961 годах, М.Е. Дейч (Ленинградский металлический завод, Московский энергетический институт). Александра Александровича заслуженно считают основателем ленинградской школы турбостроителей.

Особо следует отметить работы А.А. Радцига по истории техники, среди них: монография о Джеймсе Уатте и изобретенной им паровой машине, книги «Развитие паровой машины», «История дизелестроения», «Успехи теплотехники в СССР», «Сади Карно и его размышления о движущей силе огня». Завершающим трудом Александра Александровича стала «История теплотехники», изданная Академией наук в 1936 году. В этой серии исторических трудов отразились его глубокие профессиональные познания не только в области теплотехники, но и во всеобщей истории, которую он знал великолепно, обладая феноменальной памятью.

** В 1933 г. А.А. Радциг был избран членом-корреспондентом АН СССР, а в 1935 г. ему было присвоено звание заслуженного деятеля науки и техники СССР.

*** ВСНХ — Высший совет народного хозяйства, занимавшийся регулированием экономической жизни страны.



В последние годы жизни Александр Александрович почти полностью потерял зрение, но не прекращал активно работать благодаря самоотверженной помощи жены и верного друга — Евгении Викторовны

(урожденной Кирпичевой). Умер А.А. Радциг 30 декабря 1941 году во время эвакуации из осажденного Ленинграда по дороге в Свердловск на станции Буй в Костромской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буланин В.И., Радциг М.А. Александр Александрович Радциг (к столетию со дня рождения) // Труды ЛПИ. 1969. С. 223–225.
2. Кириллов И.И. Александр Александрович Радциг // Труды ЛПИ. 1949. № 1. С. 120–126.
3. Официальный сайт Киевского политехнического института имени Игоря Сикорского <https://kpi.ua/ru/node/10971>
4. Журавлева И.В. Радциг Александр Александрович, ректор Политехнического института (14.09.1817–27.11.1918) // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 1999. № 2. С. 131–135.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВАСИЛЬЕВ Юрий Сергеевич — доктор технических наук, академик РАН, научный руководитель СПбГПУ Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: president@spbstu.ru

КИРИЛЛОВ Александр Иванович — доктор технических наук ведущий инженер Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: ai_kirillov@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 28.02.2019

REFERENCES

- [1] Bulanin V.I., Radtsig M.A. Aleksandr Aleksandrovich Radtsig (k stoletiyu so dnya rozhdeniya). *Trudy LPI*. 1969. S. 223–225. (rus.)
- [2] Kirillov I.I. Aleksandr Aleksandrovich Radtsig. *Trudy LPI*. 1949. № 1. S. 120–126. (rus.)
- [3] Ofitsialnyy sayt Kiyevskogo politekhnicheskogo instituta im. Igorya Sikorskogo <https://kpi.ua/ru/node/10971> (rus.)
- [4] Zhuravleva I.V. Radtsig Aleksandr Aleksandrovich, rektor Politekhnicheskogo instituta (14.09.1817–27.11.1918). *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGTU*. 1999, № 2. S. 131–135. (rus.)

THE AUTHORS

VASILIEV Yurii S. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: president@spbstu.ru

KIRILLOV Aleksandr I. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: ai_kirillov@mail.ru

Received: 28.02.2019

DOI: 10.18721/JEST.25121
УДК 00:378

**ВЫСТУПЛЕНИЕ АКАДЕМИКА РАН ЛЕОНИДА АБРАМОВИЧА ВАЙСБЕРГА
НА УЧЕНОМ СОВЕТЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПЕТРА ВЕЛИКОГО
26-го ноября 2018-го года**



Присуждение вашим уважаемым Советом высокого звания *doctor honoris causa* является самой высокой честью, с которой для меня не может сравниться никакая другая награда, ибо это есть признание коллег, самого взыскательного социума, мнение которого только и может быть важно профессиональному научному сотруднику.

Это тем более для меня дорого, что произошло по принципу, который в древнем Риме формулировался так: «*Sine prece, sine pretio, sine rosulo!*», что означает: «Без просьбы, без подкупа, без попойки!»

В данном случае высокое звание и все с ним связанное эмоционально определяется для меня ролью великого Политеха в развитии не только российской, но и мировой науки, в моем конкретном случае — механики, машиноведения и тесно сопряженного с этим материаловедения. Именно здесь, в намоленном великими именами месте, уже второй век происходит то, что во многом определило прорыв человечества в космос, создание грозного оружия сдерживания, появление новой энергетики, вообще всего, без чего невозможно представить себе современность и нынешний уровень технологий.

Каждый раз, когда имею честь оказаться в этих стенах, наяву проступает реальная связь времён, ибо вот они, кажется, поднимаются рядом по лестнице величайшие ученые: Андрей Григорьевич Гагарин, Иван Всеволодович Мещерский, Евгений Леопольдович Николаи, Николай Михайлович Беляев, Лев Герасимович Лойцянский, Анатолий Исаакович Лурье, недавно ушедший из жизни Владимир Александрович Пальмов.

Но перечисление всех дорогих и памятных нам имён заняло бы гораздо больше времени, поэтому, помня всех поименно, скажем просто — «Великие политехники», они всегда опережали своё время и навсегда остались не только для нас, но и для будущих поколений, современниками.

Отдаю себе отчёт, что даже сейчас, когда идёт заседание Ученого совета, на этой благословенной площадке — от Политехнической улицы до Гражданского проспекта — перманентно, не прекращаясь на минуту, во всех институтах, на кафедрах, в лабораториях идут исследования, продолжается процесс получения нового научного знания, но одновременно и процесс обучения, передачи этих фундаментальных знаний новым поколениям, по сути,



воспроизводство интеллектуального капитала страны.

Политех всегда, даже называясь ранее институтом, в точности соответствовал современной университетской формуле, а именно: «Университет — это место, где ведутся научные исследования, и только в силу их результативности получает право обучать».

Вместе и в ногу с мировой наукой вы готовы сегодня новый технологический прорыв, новое устройство экономики и — с очень большой вероятностью — изменение жизненного уклада миллионов жителей планеты, кто знает, может быть, вообще всех.

Технологические революции в мироздании все же начались не с парового котла и гораздо раньше того, что стали в истории называть промышленным переворотом. Люди на планете Земля прожили и каменный век (который по точному определению закончился не потому, что закончились камни), и бронзовый, и постепенно, уже гораздо позднее, железный. В нужное природе время наш соотечественник Иван Ползунов и британец Джеймс Уатт лишь радикально ускорили этот бесконечный и вечный процесс инноваций, обеспечив своим разумом возможность перехода к машинному производству, когда все новые машины делаются машинами. Не что-то ли похожее нас ожидает сейчас снова?

Будем помнить, что всегда и во все времена развитие вечнозелёного дерева смены технологий, то, что в новой России мы неожиданно стали называть инновациями, не только с удивительной, но и понятной нам периодичностью вызывало кризисы — промышленные, финансовые, требующие для своего преодоления все новых и новых идей, новых научных результатов, которые человечество радо было перманентно подбрасывать в жертвенный, отнюдь не священный огонь потребления.

Более того, научное знание, превращенное в новые технологии, всегда вело за собою и изменение миропорядка, сдвигало устоявшиеся, казалось, веками географические границы государств, а некоторые из них, те, что держали затяжные паузы в технологическом развитии, сметало со стола истории, как игральные карты.

Его величество технологии меняли социально-экономические форматы, создавали новые общества, иногда, скажем с горечью, на обломках старых.

То, чему мы с вами являемся свидетелями сегодня и в чем самым активным образом участвуем, не оставит мир прежним, но обо всем объёме грядущих изменений мы можем пока еще только догадываться, контуры этого будущего лишь проступают, как при печатании фотографий в недавнем прошлом, когда, держа фотобумагу в проявителе, мы видели неспешно, постепенно, но никак не сразу проявляющуюся картину.

С уверенностью можно сказать лишь, что человечество прощается с миром, который был очарован, а затем и покорён Жюлем Верном, и начинает реализовывать страницу за страницей, шаг за шагом сценарии Стругацких и Айзека Азимова.

Каждый день осторожно приподнимая ту незримую занавеску, которая пока ещё отделяет нас от будущего, мы пытаемся понять и осмыслить то, что ждёт нас впереди.

Это рождающиеся здесь и сейчас фабрики будущего, новое поколение роботов, которые, возможно, наконец, сами, без нас услышат давнюю, первую спетую более пятидесяти лет назад сверхпопулярной (потом) певицей песню: «Робот — это выдумка века, я прошу, ну попробуй, стань опять человеком».

Да, это и вправду была выдумка века, но века уже прошлого, исполнить же призыв песни — стать человеком — в этом веке робот, с высокой вероятностью, будет пытаться.

Более того, если мы по доброй воле поделимся с ним всем накопленным знанием, не одного отдельного находящегося здесь в зале учёного, а всем, что мы познали до сих пор коллективно, все вместе, то не очень понятно, как мы будем взаимодействовать дальше, будут ли мир людей и мир умных машин уживаться либо один из этих миров — неясно какой из них — будет медленно превращаться в гетто.

Но при любом, даже самом благоприятном в этом смысле сценарии, при сохранении верховенства все же за человеком, остаётся много неясного и тревожного.

Станет ли этот мир комфортен для людей, что будет вообще — мир для людей или люди для этого мира? Насколько всеобъемлем и доступен будет он для всех без исключения живущих на планете народов и людей, насколько всякий и каждый сможет пользоваться всеми благами, которые получит в своё распоряжение общество?

Понятно, что при самом объемном до сих пор в истории цивилизации высвобождении труда есть высокий риск лишения человечества самого смысла существования, во всяком случае — для очень большой его части. Возникнут ли при этом новые луддиты и их субкультура, возникнет ли реальная проблема лишних людей на планете, рискнёт ли кто-нибудь так формулировать и, что гораздо страшнее, не попытаются ли сформулировавшие это решать проблему так, как действовали в США в конце XIX-го века и долгое время в XX-м веке, искусственно стерилизуя десятки и десятки тысяч людей, объявляя их бесполезными и лишними для общества, в том числе и тогда, когда у них был не слишком высокий, с точки зрения принимающих решения, IQ?

Собственно, такой подход был подхвачен и развит нацистским рейхом, где проблема лишних людей решалась уже индустриально.

Более того, в истории зафиксирован беспрецедентный случай массового уничтожения мирных жителей с применением ядерного оружия; видимо, они тоже были списаны по названной категории — лишние, ненужные, им было отказано не только в праве на блага развивающейся цивилизации, но и в самом праве жить.

У нас есть ясная цель, она состоит в таком решении принципиально новых социогуманитарных проблем, которые были сформулированы, в том числе, в экзистенциалистских кругах, близких Сартру; один из его ближайших соратников, французский литератор-гуманист Френсис Понж как-то произнёс очень призывное, адресованное именно в то, ожидаемое нами будущее: «Человек — это будущее человека!»

Хотя, заметим, мыслей в защиту человека, личности даже не надо искать так далеко, до-

статочно прочесть в основополагающем сочинении — Библии, что «...человек создан по образу и подобию Творца». Как же при этом он может быть или стать лишним?!

Поднимая сегодня эти проблемы, мы не можем обойти вопрос о том, кто же станет реальным архитектором будущего?

Да, мы с вами готовим и размечаем площадку для этой гигантской стройки, но она, стройка, уже ждёт других строителей, с другой энергией созидания и, скорее всего, со своим видением будущего.

Они здесь, рядом, в каждой аудитории, куда вы ежедневно приходите, где ваше рабочее место. Их, к счастью, много — сейчас у нас в России примерно 4 миллиона студентов, каждый год один миллион выпускается и один новый миллион приходит слушать нас с вами.

В этой связи вспомним, что одним из самых популярных слов прошлого, 2017-го года по версии Оксфордского словаря стало слово «Youthquake», дословно это — «молодежьтрясение», выражаясь понятнее, — вызванные молодёжью культурные, политические или социальные потрясения. Явление, конечно, не новое; даже на жизни моего поколения оно не только напомнило о себе в 1967-м году, когда студенты Сорбонны, начав с Латинского квартала в Париже, постепенно во многом деформировали по своему видению европейский уклад жизни, напомнив обществу, что это и их жизнь тоже.

Мы же надеемся на гармонию во взаимоотношениях с будущими поколениями, мы обеспечиваем им то, что называется социальным лифтом, учим, передаём знания и опыт, а постепенно и пульта управления во всех сферах жизни. В этом и есть наша профессорская функция, которая в полной мере относится и к тем, кто по вашей доброй воле получил звание «почетного доктора».

Заверяю вас, что готов к этой работе рядом с вами.

Еще раз благодарю вас за высокую честь и то внимание, которое вы мне уделите прямо сейчас!

Научное издание

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбПУ.
ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ НАУКИ**

Том 25, № 1, 2019

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 ПИ № ФС77-69285 от 06.04.2017 г.)

Научный редактор, корректор — канд. техн. наук *Л.В. Спиридонова*

Технический секретарь — *О.А. Матенев*

Компьютерная верстка *Е.А. Корнуковой*

Телефон редакции (812) 294-22-86

E-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

Подписано в печать 25.03.2019. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 25,5. Тираж 1000. Заказ ____

Отпечатано с оригинал-макета,
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ
в журнале «Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки»

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки» 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 06.04.2017 ПИ № ФС 77-69285) и распространяется по подписке через объединенный каталог «Пресса России» (индекс 18390);

имеет международный стандартный номер сериального периодического издания (ISSN 2542-1239);

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.

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

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

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

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Представление материалов

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

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

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

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

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

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

Авторами статьи представляются Акты 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.

При отклонении материалов из-за нарушения сроков подачи, требований по оформлению или как не отвечающих тематике журнала материалы не публикуются и не возвращаются.

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

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.

Более подробная информация размещена на сайте: engtech.spbstu.ru