

ISSN 1029-7448 (Print)
ISSN 2414-0341 (Online)

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 63, № 4
2020

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

Учредитель

Министерство образования Республики Беларусь

Журнал включен в базы данных:
Scopus, EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, РИНЦ,
ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА

- Марченко О. В., Соломин С. В.** Конкурентоспособность солнечных и ветровых электростанций в странах СНГ 301
- Pysmenna U. Ye., Trypolska G. S.** Sustainable Energy Transitions: Overcoming Negative Externalities
(**Письменная У. Е., Трипольская Г. С.** Устойчивые энергетические трансформации: нивелирование негативных экстерналий) 312

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Романюк Ф. А., Румянцев В. Ю., Румянцев Ю. В., Каченя В. С.** Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах 328

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Сорока Б. С., Горупа В. В.** Экологические характеристики современных систем бытового использования топлива. Часть 1 340
- Исаков В. Г., Абрамова А. А., Дягелев М. Ю.** Энергетическая эффективность малого биореактора в различных климатических зонах 355
- Солодов В. Г., Конев В. А.** Анализ эффективности вариантов выхлопного отсека паровой турбины 365
- Сухоцкий А. Б., Маршалова Г. С., Данильчик Е. С.** Особенности расчета лучистой составляющей теплового потока горизонтального пучка из оребренных труб с вытяжной шахтой 380

Главный редактор Федор Алексеевич Романюк

Редакционная коллегия

*В. ВУЙЦИК (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
В. В. ГАЛАКТИОНОВ (Русский институт управления имени В. П. Чернова, Москва, Российская Федерация),
М. ДАДО (Зволенский технический университет, Зволен, Словацкая Республика),
К. В. ДОБРЕГО (Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
И. В. ЖЕЖЕЛЕНКО (Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, Украина),
П. В. ЖУКОВСКИИ (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
В. В. ИВАШЕЧКИН (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. И. КИРИЛЛОВ (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация),
А. КОННОВ (Университет Лунда, Швеция),
Б. К. МАКСИМОВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),
Х. МАХКАМОВ (Университет Нортумбрии, Великобритания),
А. А. МИХАЛЕВИЧ (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
НГО ТУАН КИЕТ (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Е. Н. ПИСЬМЕННЫЙ (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),
В. Ю. РУМЯНЦЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Э. Н. САБУРОВ (Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, Архангельск, Российская Федерация),
А.-С. С. САУХАТАС (Рижский технический университет, Рига, Латвийская Республика),
В. С. СЕВЕРЯНИН (Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь),
В. А. СЕДНИН (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Б. С. СОРОКА (Институт газа НАН Украины, Киев, Украина),
В. А. СТРОЕВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),
Е. В. ТОРОПОВ (Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация),
Е. УШПУРАС (Литовский энергетический институт, Каунас, Литовская Республика),
Б. М. ХРУСТАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Л. В. ШЕНЕЦ (Евразийская экономическая комиссия, Москва, Российская Федерация)*

Ведущий стилистический редактор В. Н. Гурьянчик

Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 28 февраля 2019 г.
Регистрационный номер 1257

Набор и верстка выполнены в редакции журналов «Энергетика» и «Наука и техника»

Подписано к печати 30.07.2020. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз.
Дата выхода в свет . 2020. Заказ .

Адрес редакции: 220013, г. Минск, Республика Беларусь, пр. Независимости, 65.
Белорусский национальный технический университет, корп. 2, комн. 327.
Тел.: +375 17 292-65-14
e-mail: energy@bntu.by; energy-bntu@mail.ru
<http://energy.bntu.by>

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

© Белорусский национальный технический университет, 2020

ISSN 1029-7448 (Print)
ISSN 2414-0341 (Online)

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 63, No 4
2020

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founder

Ministry of Education of the Republic of Belarus

The Journal is included in the following databases:
Scopus, EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, RISC,
Lan, CyberLeninka, Socionet

CONTENTS

GENERAL POWER ENGINEERING

- Marchenko O. V., Solomin S. V.** Competitiveness of Solar and Wind Power Plants
in the Countries of the Commonwealth of Independent States 301
- Pysmenna U. Ye., Trypolska G. S.** Sustainable Energy Transitions: Overcoming
Negative Externalities 312

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

- Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Kachenya V. S.**
Orthogonal Components Forming of the Microprocessor-Based Protection Input Signals 328

HEAT POWER ENGINEERING

- Soroka B. S., Horupa V. V.** Environmental Characteristics of Modern Systems
of Domestic Use of Fuel. Part 1 340
- Isakov V. G., Abramova A. A., Dyagelev M. Yu.** Energy Efficiency of a Small
Bioreactor in Various Climatic Zones 355
- Solodov V. G., Konev V. A.** Analysis of the Effectiveness of Variants of the Exhaust
Compartment of a Steam Turbine 365
- Sukhotski A. B., Marshalova G. S., Danil'chik E. S.** Specific Features of Calcula-
ting the Radiant Component of the Heat Flow of Horizontal Bunch from Finned Tubes
with Exhaust Shaft 380

Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk

Editorial Board

- W. T. WÓJCIK (Lublin University of Technology "Politechnika Lubelska", Lublin, Republic of Poland),
V. V. GALAKTIONOV (Russian Institute of Management named after V. P. Chernov, Moscow, Russian Federation),
M. DADO (Technical University in Zvolen, Zvolen, Slovak Republic),
K. V. DOBREGO (Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
I. V. ZHEZHELENKO (Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, Ukraine),
P. W. ZHUKOWSKI (Lublin University of Technology "Politechnika Lubelska", Lublin, Republic of Poland),
V. V. IVASHECHKIN (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
A. S. KALINICHENKO (Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus),
A. I. KIRILLOV (Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation),
A. KONNOV (Lund University, Sweden),
B. K. MAKSIMOV (National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation),
K. MAHKAMOV (Northumbria University, United Kingdom),
A. A. MIKHALEVICH (The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
NGO TUAN KIET (Research Energy Institute under the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),
O. G. PENYAZKOV (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
E. N. PISMENNYI (National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine),
V. Yu. RUMIANTSEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
E. N. SABUROV (Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russian Federation),
A.-S. S. SAUHATAS (Riga Technical University, Riga, Republic of Latvia),
V. S. SEVERYANIN (Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus),
V. A. SEDNIN (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
B. S. SOROKA (The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine),
V. A. STROEV (National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation),
E. V. TOROPOV (South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation),
E. UŠPURAS (Lithuanian Energy Institute, Kaunas, Republic of Lithuania),
B. M. KHROUSTALEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
L. V. SHENETS (The Eurasian Economic Commission, Moscow, Russian Federation)*

Leading Style Editor V. N. Guryanchyk

Publication is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2019, February, 28th
Reg. No 1257

Typesetting and makeup are made in editorial office
of Journals "Energetika" and "Science and Technique"

Passed for printing 30.07.2020. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet .
An edition of 100 copies. Date of publishing 2020. Order list .

ADDRESS

Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave., Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-14
e-mail: energy@bntu.by; energy-bntu@mail.ru
<http://energy.bntu.by>

Printed in BNTU. License LP No 02330/74 from 03.03.2014.
220013, Minsk, 65, Nezavisimosty Ave.

© Belarusian National Technical University, 2020

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-301-311>

УДК 621.311

Конкурентоспособность солнечных и ветровых электростанций в странах СНГ*

О. В. Марченко¹⁾, С. В. Соломин¹⁾

¹⁾Институт систем энергетики имени Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (Иркутск, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Систематизированы технико-экономические показатели возобновляемых (солнечных и ветровых) и невозобновляемых источников энергии с учетом интервала их неопределенности для условий стран СНГ. Основное внимание уделено России и государствам Центральной Азии – Казахстану, Киргизии, Таджикистану, Туркмении, Узбекистану, где имеются наиболее благоприятные условия для развития солнечной и ветровой энергетики. Проведено сравнение возобновляемых и невозобновляемых источников энергии по критерию стоимости вырабатываемой электроэнергии. Показано, что плата за выбросы парниковых газов повышает конкурентоспособность солнечных и ветровых электростанций на энергетических рынках. В случае благоприятных для возобновляемой энергетики условий солнечные и ветровые установки в ряде районов могут вырабатывать дешевую электроэнергию стоимостью 3–5 цент./(кВт·ч). При таких показателях они могут быть конкурентоспособными без дополнительных мер стимулирования их внедрения. С помощью математической модели REM-2 (Renewable Energy Model) проведено сравнение энергоисточников разных типов с учетом системных эффектов. Система электроснабжения включает фотоэлектрические преобразователи, ветроэлектрические установки с возможностью краткосрочного аккумулирования и потребления электроэнергии от дублирующего энергоисточника. Выполнено моделирование режимов работы фотоэлектрических преобразователей и ветротурбин по времени (часам) для разных значений прихода солнечной радиации и скорости ветра. Определены оптимальные соотношения между производством электроэнергии фотоэлектрическими преобразователями и ветротурбинами, а также предпочтительный уровень потребления электроэнергии из сети при различных климатических и экономических условиях. Показана экономическая эффективность совместного использования солнечной и ветровой энергии в странах СНГ, в первую очередь в России (за исключением северных районов) и государствах Центральной Азии.

Ключевые слова: фотоэлектрические преобразователи, ветроэлектрические установки, СНГ, Россия, Центральная Азия, экономическая эффективность, конкурентоспособность

Для цитирования: Марченко, О. В. Конкурентоспособность солнечных и ветровых электростанций в странах СНГ / О. В. Марченко, С. В. Соломин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 4. С. 301–311. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-301-311>

Адрес для переписки

Марченко Олег Владимирович
Институт систем энергетики имени
Л. А. Мелентьева Сибирского отделения
Российской академии наук
ул. Лермонтова, 130,
664033, г. Иркутск, Российская Федерация
Тел.: +7 3952 500-646 (добавочный 448)
marchenko@isem.irk.ru

Address for correspondence

Marchenko Oleg V.
Melentiev Energy Systems Institute
of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences
130, Lermontova str.,
664033, Irkutsk, Russian Federation
Tel.: +7 3952 500-646 (additional 448)
marchenko@isem.irk.ru

* Работа выполнена в рамках научного проекта III.17.6.2 программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310447-3.

Competitiveness of Solar and Wind Power Plants in the Countries of the Commonwealth of Independent States

O. V. Marchenko¹⁾, S. V. Solomin¹⁾

¹⁾Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russian Federation)

Abstract. Techno-economic indicators of renewable (solar and wind) and non-renewable energy sources are systematized, taking into account the interval of their uncertainty for the conditions of the countries of the Commonwealth of Independent States (CIS). The main attention was paid to Russia and the countries of Central Asia (Kazakhstan, Kyrgyzstan, Tajikistan, Turkmenistan and Uzbekistan), where there are the most favorable conditions for the development of solar and wind energy. A comparison of renewable and non-renewable energy sources by the criterion of the cost of generated electricity has been made. It is shown that the payment for greenhouse gas emissions increases the competitiveness of solar and wind power plants in the energy markets. Under favorable conditions for renewable energy, solar and wind installations in some areas can produce cheap electricity at a cost of 3–5 cents/(kW·h). With such values, they can be competitive without additional measures to stimulate their implementation. Using the mathematical model REM-2 (Renewable Energy Model), energy sources of different types were compared taking into account system effects. The power supply system consists of photovoltaic converters, wind turbines that enable the possibility of short-term accumulation of electricity and power consumption from a backup power source. Modeling of photoelectric converters and wind turbines operating modes was performed by time (hours) for different values of solar radiation arrival and wind speed. The optimal ratios between electricity production by photovoltaic converters and wind turbines, as well as the optimal level of electricity consumption from the network under different climatic and economic conditions, were determined. The economic efficiency of joint use of solar and wind energy in the CIS countries, primarily in Russia (with the exception of the northern regions) and the countries of Central Asia, is shown.

Keywords: photovoltaic converters, wind turbines, CIS, Russia, Central Asia, economic efficiency, competitiveness

For citation: Marchenko O. V., Solomin S. V. (2020) Competitiveness of Solar and Wind Power Plants in the Countries of the Commonwealth of Independent States. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (4), 301–311. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-301-311> (in Russian)

Введение

С целью предотвращения негативного влияния энергетики на климатическую систему во многих странах мира предпринимаются меры, направленные на уменьшение выбросов в атмосферу парниковых газов, в первую очередь диоксида углерода CO₂ [1]. Особое значение в связи с этим придается развитию возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [2–4].

Для стимулирования внедрения ВИЭ используются различные методы: введение фиксированных тарифов на продажу электроэнергии от энергоисточников на возобновляемых энергоресурсах, субсидии инвесторам (компенсация капиталовложений), гарантии возврата инвестиций, установление квот с введением «зеленых сертификатов» и др. Кроме этого, для энергоисточников на органическом топливе вводятся налоги на выбросы CO₂ (carbon tax) и системы торговли квотами (Emissions Trading Systems, ETS). Величина налога в разных государствах составляет от 1 до 127 дол./т CO₂ [5].

В странах СНГ введение экологического налога в настоящее время не рассматривается, но это возможно в более отдаленной перспективе.

В статье анализируются конкурентоспособность и условия для развития солнечных и ветровых электростанций в России и сопредельных странах (рис. 1). Ожидается, что между ними будут развиваться межгосударственные электрические связи, которые дадут как экономический, так и экологический эффект [6], в том числе благодаря широкомасштабному внедрению ВИЭ.

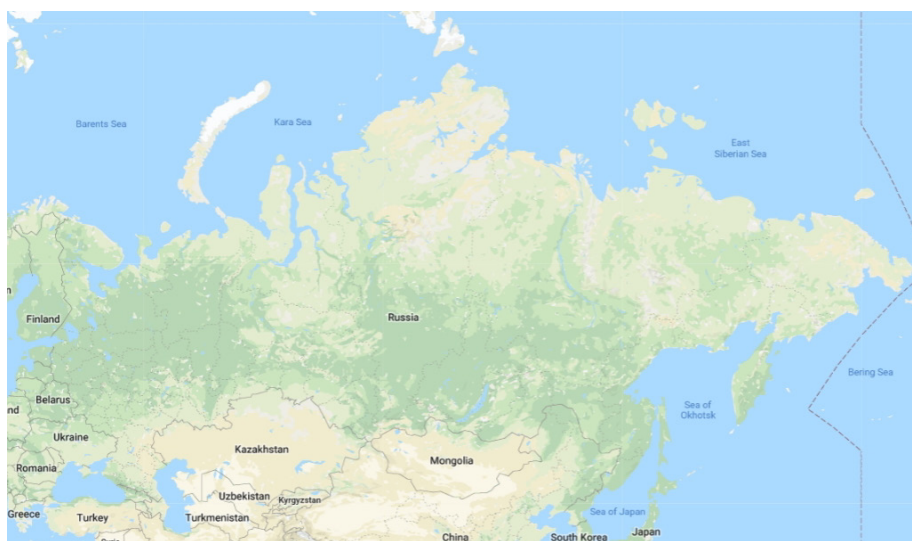


Рис. 1. Карта России и сопредельных стран (Google Maps)

Fig. 1. The map of Russia and neighboring countries (Google Maps)

Наиболее перспективное направление развития межгосударственных электрических связей – южное, предусматривающее объединение электроэнергетических систем России, стран Центральной Азии и Китая. В этом регионе также имеются достаточно благоприятные условия для развития солнечной и ветровой энергетики.

Современное состояние развития возобновляемых источников энергии в странах СНГ

Информация о масштабах использования ВИЭ в мире и странах СНГ представлена в табл. 1 [7]. В последнее десятилетие среднегодовой прирост мощностей ветровых электростанций (ВЭС) в мире составляет около 15 %, солнечных электростанций (СЭС) – более 40 %.

Мировым лидером по развитию ВИЭ является Китай. По состоянию на конец 2018 г. в КНР сосредоточено около 30 % суммарной мощности ВИЭ в мире, в том числе 36 % солнечной и 33 % ветровой энергетики. В странах Центральной Азии существенная роль в производстве электроэнергии принадлежит гидроэнергетике, и лишь в Казахстане строятся солнечные и ветровые электростанции.

Таблица 1

Установленные мощности возобновляемых источников энергии, 2018 г.

Installed capacity of renewable energy sources, 2018

Страна	ГЭС, МВт	СЭС, МВт	ВЭС, МВт	Биоэнергия, МВт	Всего*, МВт
Мир,	1295317	486085	563659	117828	2356346
в том числе Китай	322871	175030	184665	13235	695831
Страны СНГ					
Россия	52579	584	102	1370	54710
Беларусь	95	154	101	107	457
Молдавия	64	4	27	12	107
Азербайджан	1249	36	66	43	1394
Армения	1333	17	3	0	1353
Казахстан	2756	209	121	1	3088
Киргизия	3689	0	0	0	3689
Таджикистан	5632	0	0	0	5632
Туркмения	1	0	0	0	1
Узбекистан	1854	4	1	0	1858
* Включая геотермальные и приливные электростанции.					

Согласно анализу Международного энергетического агентства, в 2019 г. установленные мощности ВИЭ увеличились на 200 ГВт, из которых 115 ГВт составили СЭС и более 50 ГВт – ВЭС. Предполагается, что в период 2019–2024 гг. мощности ВИЭ для двух рассмотренных сценариев возрастут еще на 1200–1500 ГВт, т. е. в 1,5–1,6 раза по сравнению с 2018-м [8]. Около 40 % мирового прироста мощности ВИЭ придется на Китай, который еще более укрепит мировое лидерство в области возобновляемой энергетики. Также быстро будут расти мощности ВЭС и особенно СЭС с фотоэлектрическим преобразованием энергии. В период до 2024 г. прогнозируется прирост мощностей фотоэлектрических преобразователей от 697 до 877 ГВт [8].

Страны СНГ существенно отстают от общемирового тренда интенсивного развития и внедрения возобновляемых источников энергии. В России лишь в последние несколько лет при поддержке государства начались вводы фотоэлектрических преобразователей и ветровых турбин. В 2013 г. Программой Правительства Российской Федерации по стимулированию развития ВИЭ была поставлена задача ввести в действие и подключить к энергосистеме 1,52 ГВт фотоэлектрических установок и 3,6 ГВт ветротурбин. Для этого предлагалось использовать экономический механизм стимулирования инвесторов, основанный на гарантиях возврата вложенных средств с прибылью 15 %.

Пять стран СНГ (Россия, Беларусь, Казахстан, Армения, Киргизия) являются членами Евразийского экономического союза (ЕАЭС). Внутри этой организации создана Евразийская экономическая комиссия (ЕЭК). В рамках ЕАЭС и СНГ обсуждается тема повышения энергоэффективности и развития ВИЭ на евразийском пространстве.

В настоящее время ЕЭК разрабатывает проект «Стратегических направлений развития евразийской экономической интеграции до 2025 года». В этом документе большое внимание уделяется определению основных направлений проведения скоординированной энергетической политики в области энергосбережения, энергоэффективности, использования ВИЭ и охраны окружающей среды.

В Республике Беларусь накоплен определенный опыт в развитии солнечной и ветровой энергетики, который может быть использован в других странах СНГ. По данным ЕАК, к 2021 г. в Беларуси планируется увеличение электрических мощностей ВИЭ до 635 МВт [9].

Постановка задачи

Цель исследований авторов – оценка конкурентоспособности электростанций разных типов и влияния на нее ограничения выбросов диоксида углерода, а также определение оптимальной структуры ветросолнечных электростанций для разных сочетаний экономических и климатических условий России и сопредельных стран.

Для предварительной оценки и сравнения экономической эффективности следует определить удельные затраты на производство электроэнергии (ее стоимость) для энергоисточников разных типов. Также необходимо учесть влияние системных эффектов, возникающих вследствие взаимодействия энергоисточников между собой и с окружающей средой, дополнительных условий и ограничений. Оптимальная структура системы электроснабжения выбиралась из решения задачи математического программирования: минимизация затрат с учетом балансов первичной, вторичной и конечной энергии и ряда дополнительных условий и ограничений (на уровне электропотребления, установленные мощности энергоисточников, режимы работы аккумуляторов и энергоисточников, дублирующих стохастическую выработку ВИЭ, и др.). Для расчетов использовали математическую модель REM-2, в которой учитывалось изменение выработки электроэнергии солнечных и ветровых установок по часам суток и сезонам года. Подробно модель описана в [10].

Рассматриваемая система электроснабжения приведена на рис. 2.

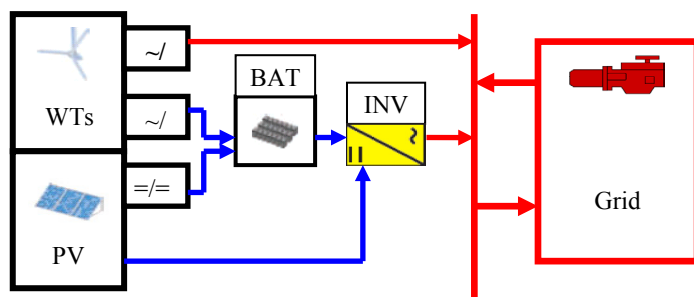


Рис. 2. Схема энергосистемы: WTs – ВЭУ; PV – ФЭП; BAT – аккумуляторы; INV – инвертор; Grid – сеть, дублирующие энергоисточники

Fig. 2. Diagram of the power system: WTs – wind turbines; PV – solar photovoltaics; BAT – batteries; INV – inverter; Grid – network, back up energy sources

Система состоит из фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), ветроэлектрических установок (ВЭУ) с возможностью краткосрочного аккумулирования электроэнергии. Система включает в себя контроллеры заряда аккумуляторных батарей (АБ), преобразователи напряжения, средства сопряжения с сетью (сетевые инверторы (СИ)) и дублирующий энергоисточник, условно названный «Сеть». В случае недостаточной выработки ВИЭ электроэнергия поступает от внешнего источника по заданной цене. Избыток электроэнергии продается в сеть по той же цене.

Стоимость электроэнергии

При сравнении энергетических технологий в качестве критерия часто используют стоимость энергии. Она равна удельным затратам на производство энергии и одновременно представляет собой ее минимальную цену, при которой проект энергоснабжения остается эффективным. Стоимость можно представить в виде суммы слагаемых, учитывающих затраты на строительство и эксплуатацию установки, затраты на топливо и плату за выбросы вредных веществ [11].

Первая составляющая стоимости электроэнергии прямо пропорциональна удельным капиталовложениям k и обратно пропорциональна коэффициенту использования установленной мощности CF (КИУМ) и зависит от коэффициента возврата капитала F , годовой нормы дисконта d , сроков строительства ΔT и службы T , ежегодных условно постоянных издержек μ , затрат энергии на собственные нужды β . Топливная составляющая прямо пропорциональна цене топлива p и обратно пропорциональна КПД η . Для учета платы за выбросы цена топлива заменяется на произведение коэффициента эмиссии a на цену выбросов диоксида углерода p^* . Для определения стоимости электроэнергии использовали следующую формулу [11]:

$$S = \left[F \frac{e^{\sigma \Delta T} - 1}{\sigma \Delta T} + \mu \right] \frac{k}{CFH(1-\beta)} + \frac{p}{8,15 \cdot 10^3 \eta} + \frac{ap^*}{8,15 \cdot 10^3 \eta},$$

где $F = \sigma / (1 - e^{\sigma T})$; $\sigma = \ln(1 + d)$; H – количество часов в году.

Проведение расчетов

Экономическая эффективность и конкурентоспособность ФЭП и ВЭУ определяются в первую очередь технико-экономическими показателями энергоустановок, ценой электроэнергии дублирующего энергоисточника и коэффициентом использования установленной мощности. Величина этого коэффициента для ФЭП зависит от прихода солнечной радиации на поверхность солнечной панели, а для ВЭУ – от скорости ветра на высоте оси ротора. Ориентировочные значения КИУМ для стран СНГ приведены на рис. 3. Предполагается, что СЭС имеют оптимальный угол наклона па-

нелей с соответствующей системой слежения за Солнцем, а высота башни ВЭУ превышает 100–120 м [3, 4, 12].

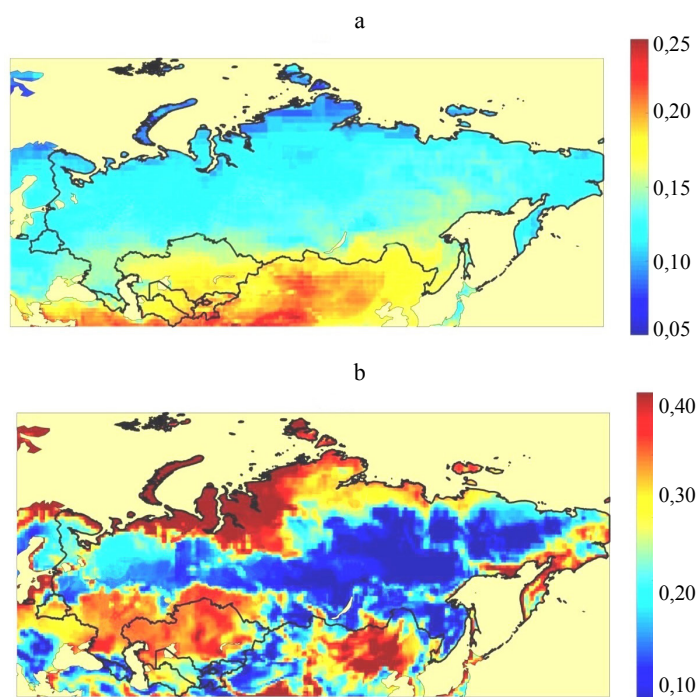


Рис. 3. Коэффициент использования установленной мощности для солнечных (а) и ветровых (б) электростанций для России и сопредельных стран

Fig. 3. The capacity factor of solar (a) and wind (b) power plants for Russia and neighboring countries

Из рис. 3 видно, что в Республике Беларусь ФЭП будут работать с КИУМ не более 0,15, а ВЭУ – при его значении 0,30–0,35. Наилучшие условия для одновременного развития как солнечной, так и ветровой энергетики в странах СНГ характерны для южных регионов России и государств Центральной Азии. В ряде районов этих стран КИУМ для ФЭП может достигать 0,20–0,25, для ВЭУ превышать 0,40 [12]. В связи с этим основные расчеты приведены именно для таких регионов.

При оценке стоимости электроэнергии рассматривались два варианта:

- 1) неблагоприятный для возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и благоприятный для ТЭС на органическом топливе;
- 2) благоприятный для ВИЭ и неблагоприятный для ТЭС.

Варианты отличаются значениями КИУМ для ВИЭ в соответствии с климатическими факторами [12] и другими технико-экономическими характеристиками (табл. 2). В табл. 2 показатели заданы в виде интервалов неопределенности.

В первом варианте плата за выбросы равна нулю, во втором – 30 дол./т CO_2 во всех рассматриваемых странах. Коэффициенты эмиссии приняты в соответствии с данными [13], норма дисконта равна 5 %.

Таблица 2

Технико-экономические показатели электростанций
Technical and economic indicators of power plants

Электростанция	k , дол./кВт	η , %	CF	p , дол./т у. т.
Россия				
Угольная	2000–2200	40–45	0,75–0,80	60–70
Газовая	1000–1100	50–55	0,70–0,80	100–120
ВЭС	1500–2000	25–30	0,17–0,40	0
СЭС (ФЭП)	1400–2000	12–15	0,13–0,17	0
Центральная Азия				
Угольная	900–1500	40–45	0,75–0,80	60–70
Газовая	800–1000	50–55	0,70–0,80	90–110
ВЭС	1300–1500	25–30	0,21–0,36	0
СЭС (ФЭП)	1100–1400	12–15	0,16–0,25	0

В приведенных странах различаются средние тарифы на электроэнергию. По данным сайта GlobalPetrolPrices.com, в 2019 г. они составляли 4–5 цент./(кВт·ч) в Центральной Азии и 7 цент./(кВт·ч) в России (для сравнения: 4 цент./(кВт·ч) в Азербайджане; 8 цент./(кВт·ч) в Беларуси, Армении, Китае, Индии; 11 цент./(кВт·ч) в Южной Корее; 28 цент./(кВт·ч) в Японии; 34–35 цент./(кВт·ч) в Германии и Дании) [14].

Результаты расчетов и их анализ

Стоимость электроэнергии для тепловых электростанций (ТЭС) на органическом топливе (минимальной для угольных или газовых ТЭС) и для возобновляемых источников энергии в России и странах Центральной Азии приведена на рис. 4.

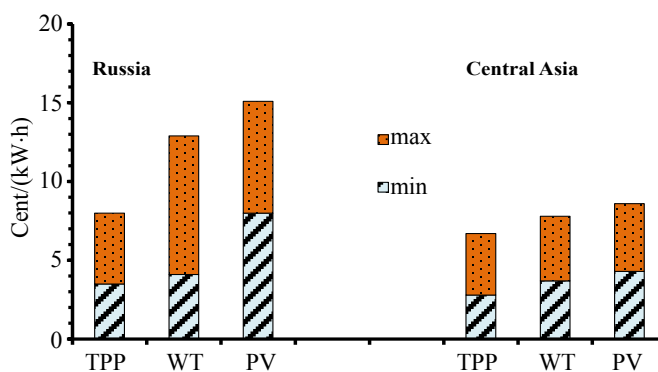


Рис. 4. Стоимость электроэнергии для энергоисточников разных типов в России и странах Центральной Азии: TPP – тепловые электростанции; WT – ветроэлектрические установки; PV – фотоэлектрические преобразователи

Fig. 4. The cost of electricity for energy sources of various types in Russia and Central Asia: TPP – thermal power plants; WT – wind turbines; PV – solar photovoltaics

Из рис. 4 видно, что с учетом платы за выбросы диоксида углерода интервалы неопределенности стоимости электроэнергии тепловых, ветровых и солнечных электростанций пересекаются. Это свидетельствует о том, что

при определенных условиях ВЭС и СЭС конкурентоспособны с электростанциями на органическом топливе.

В условиях Центральной Азии СЭС могут работать с коэффициентом использования установленной мощности около 0,25 и вырабатывать электроэнергию стоимостью 3–5 цент./кВт·ч. При таких показателях ВЭУ и СЭС могут быть конкурентоспособны с ТЭС без дополнительных мер стимулирования их внедрения.

Следует отметить, что в условиях Республики Беларусь ФЭП могут вырабатывать электроэнергию стоимостью 9–12 цент./кВт·ч, а ВЭУ – 4–6 цент./кВт·ч. Это свидетельствует о том, что ветроэнергетика является практически конкурентоспособной с ТЭС, а солнечная энергетика станет экономически эффективной при введении платы за выбросы диоксида углерода.

Расчеты стоимости электроэнергии позволяют предварительно оценить эффективность применения ФЭП и ВЭУ. При работе в системах автономного и централизованного электроснабжения возникают системные эффекты, обусловленные совместной работой ФЭП, ВЭУ и дублирующих источников электрической энергии. Для их учета используется математическая модель.

Результаты расчета оптимального соотношения выработки электроэнергии между ФЭП и ВЭУ на модели REM-2 при разных ценах на электроэнергию (7 цент./кВт·ч в России и 5 цент./кВт·ч в Центральной Азии) от сетевого дублирующего источника и различных климатических условиях приведены на рис. 5. Использовались характеристики солнечной радиации и ветра, приведенные в соответствующих выпусках справочников по климату для России, Казахстана и Средней Азии. Отдельно рассмотрены северные (North) и южные (South) районы.

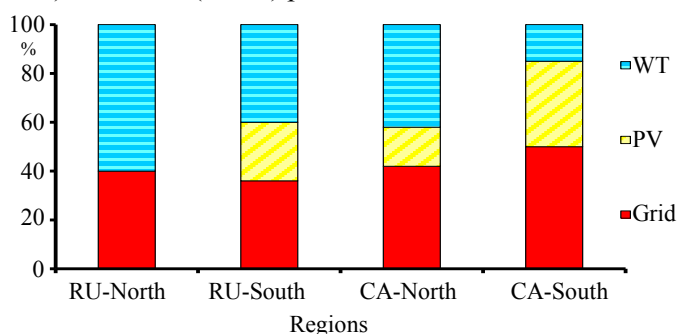


Рис. 5. Оптимальные соотношения выработки электроэнергии

Fig. 5. Optimal ratios of power generation

ФЭП и ВЭУ конкурентоспособны, если вырабатывают более дешевую электроэнергию, чем электроэнергия из сети. По мере увеличения прихода солнечной радиации от северных районов к южным возрастает роль ФЭП. В северных районах России (RU-North) (приход солнечной радиации не превышает 1200 кВт·ч/м² в год) применение ФЭП нецелесообразно, а основную часть выработки обеспечивают ВЭУ. В южных районах (RU-South) при увеличении инсоляции до 1400 кВт·ч/м² в год и снижении средней многолетней скорости ветра с 7 до 6 м/с увеличивается роль ФЭП и дублирующего энергоисточника.

В Центральной Азии в оптимальный план входят три энергоисточника; по мере увеличения прихода солнечной радиации оптимальная доля ФЭП возрастает. С учетом того, что цена электроэнергии в этом регионе не превышает 5 цент. за 1 кВт·ч, относительно велика роль сетевого дублирующего источника. По мере роста тарифов на электроэнергию будет возрастать роль ВЭС (в северных районах) и СЭС (в южных районах) и уменьшаться роль дублирующего источника электроэнергии.

ВЫВОДЫ

1. Систематизированы технико-экономические показатели электростанций разных типов с учетом интервала их неопределенности для стран СНГ.

2. Проведено сравнение возобновляемых и невозобновляемых источников энергии по критерию стоимости вырабатываемой электроэнергии. Показано, что с учетом платы за выбросы возобновляемые источники энергии могут оказаться конкурентоспособными на энергетических рынках.

3. При благоприятных условиях солнечные и ветровые электростанции в ряде районов могут вырабатывать дешевую электроэнергию стоимостью 3–5 цент./кВт·ч).

4. Дополнительное сравнение энергоисточников разных типов с учетом системных эффектов выполнено с использованием математической модели REM-2 (Renewable Energy Model). Моделирование режимов работы фотоэлектрических преобразователей и ветроэлектрических установок по времени (часам) для разных значений прихода солнечной радиации и скорости ветра позволило определить оптимальные соотношения между установленными мощностями и производством электроэнергии фотоэлектрическими преобразователями и ветротурбинами. Показана экономическая эффективность совместного использования солнечной и ветровой энергии в России (за исключением северных районов) и государствах Центральной Азии.

5. В странах СНГ формируется скоординированная политика в области развития возобновляемых источников энергии и охраны окружающей среды. Опыт применения ветровой и солнечной энергетики в Республике Беларусь может быть использован в других государствах содружества. В Беларуси ветроэнергетика является практически конкурентоспособной технологией производства электроэнергии. Экономическая эффективность солнечной энергетики будет повышаться в связи с возможным введением налога на выбросы диоксида углерода и других вредных веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Renewables 2019. Global Status Report. Paris: REN21, 2019. 336 p.
2. Studies on Competitiveness of Space and Terrestrial Solar Power Plants Using Global Energy Model / L. S. Belyaev [et al.] // International Journal of Global Energy Issue. 2006. Vol. 25, No 1–2. P. 94–108. <https://doi.org/10.1504/IJGEI.2006.008386>.
3. Марончук, И. И. Солнечные элементы: современное состояние и перспективы развития / И. И. Марончук, Д. Д. Санникович, В. И. Мирончук // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 105–123. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123>.
4. Петруша, Ю. С. Перспективы развития ветроэнергетики в Республике Беларусь / Ю. С. Петруша, Н. А. Попкова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 124–134. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134>.
5. State and Trends of Carbon Pricing 2019. Washington: World Bank, 2019. 97 p.

6. Россия в Евразийской электроэнергетической интеграции / О. В. Марченко [и др.] // Мировая экономика и международные отношения. 2018. Т. 62, № 6. С. 18–29. <https://doi.org/10.20542/0131-2227-2018-62-6-18-29>.
 7. Renewable Energy Statistics 2019. Abu Dhabi: IRENA, 2019. 60 p.
 8. Renewables 2019. Analysis and Forecasts to 2024. Paris: IEA, 2019. 204 p.
 9. ЕЭК, ИС СНГ и ЭСКАТО выработают рекомендации по развитию электроэнергетической отрасли [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.eurasiancommission.org/ru/nae/news/Pages/05-11-2019-2.aspx>. Дата доступа: 11.12. 2019.
 10. Marchenko, O. V. Mathematical Modeling and Economic Efficiency Assessment of Autonomous Energy Systems with Production and Storage of Secondary Energy Carriers / O. V. Marchenko // International Journal of Low-Carbon Technologies. 2010. Vol. 10, No 5. P. 250–255. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctq031>.
 11. Марченко, О. В. Исследование влияния экологических ограничений на конкурентоспособность атомных электростанций / О. В. Марченко, С. В. Соломин // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2015. № 3. С. 20–30.
 12. Bogdanov, D. Eurasian Super Grid for 100 % Renewable Energy Supply: Generation and Storage Technologies in the Cost Optimal Mix / D. Bogdanov, C. Breyer // Neo-Carbon Energy 4th Researchers' Seminar, Oct. 19–20, 2015. P. 41–48.
 13. Energy Outlook for Asia and the Pacific. Mandaluyong City, Philippines: Asian Development Bank, 2015. 543 p.
 14. Electricity Prices, March 2019 [Электронный ресурс]. Access mode: https://www.globalpetrolprices.com/electricity_prices. Date of access: 12.12.2019.
- Поступила 21.06.2019 Подписана в печать 04.12.2019 Опубликована онлайн 30.07.2020

REFERENCES

1. Renewables 2018. Global Status Report. Paris: REN21, 2019. 336.
2. Belyaev L. S., Marchenko O. V., Filippov S. P., Solomin S. V. (2006) Studies on Competitiveness of Space and Terrestrial Solar Power Plants Using Global Energy Model. *International Journal of Global Energy Issue*, 25 (1–2), 94–108. <https://doi.org/10.1504/IJGEI.2006.008386>.
3. Maronchuk I. I., Sanikovich D. D., Mironchuk V. I. (2019) Solar Cells: Current State and Development Prospects. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 105–123. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123> (in Russian).
4. Petrusha U. S., Papkova N. A. (2019) The Prospects for Wind Energy Development in the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 124–134. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134> (in Russian).
5. State and Trends of Carbon Pricing 2018. Washington: World Bank, 2019. 97.
6. Marchenko O. V., Podkovalnikov S. V., Savelyev V. A., Solomin S. V., Chudinova L. Y. Russia in Eurasian Electric Power Integration (2018) *World Economy and International Relations*, 62 (6), 18–29. <https://doi.org/10.20542/0131-2227-2018-62-6-18-29> (in Russian).
7. Renewable Energy Statistics 2019. Abu Dhabi: IRENA, 2019. 60.
8. Renewables 2019. Analysis and Forecasts to 2024. Paris: IEA, 2019. 204.
9. EEC, ECEPC of the CIS and ESCATO Will Elaborate Recommendations for the Development of the Electricity Sector. Available at: <http://www.eurasiancommission.org/ru/nae/news/Pages/05-11-2019-2.aspx>. (Accessed 11 December 2019) (in Russian).
10. Marchenko O. V. (2010) Mathematical Modeling and Economic Efficiency Assessment of Autonomous Energy Systems with Production and Storage of Secondary Energy Carriers. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 10 (5), 250–255. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctq031>.
11. Marchenko O. V., Solomin S. V. (2015) Investigation of Ecological Constraints Influence on Competitiveness of Nuclear Power Plants. *Nuclear Energy and Technology*, 1 (4), 277–282. <https://doi.org/10.1016/j.nucet.2016.02.016>.
12. Bogdanov D., Breyer C. (2015) Eurasian Super Grid for 100 % Renewable Energy Supply: Generation and Storage Technologies in the Cost Optimal Mix. *Neo-Carbon Energy 4th Researchers' Seminar, October 19–20, 2015*, 41–48.
13. Energy Outlook for Asia and the Pacific. Mandaluyong City, Philippines: Asian Development Bank, 2015. 543.
14. Electricity Prices (March 2019). Available at: https://www.globalpetrolprices.com/electricity_prices. (Accessed 12 December 2019).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-312-327>

UDC 330.3; 339.1

Sustainable Energy Transitions: Overcoming Negative Externalities

U. Ye. Pysmenna^{1,2)}, G. S. Trypolska¹⁾

¹⁾Institute for Economics and Forecasting National Academy of Sciences of Ukraine
(Kyiv, Ukraine),

²⁾National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
(Kyiv, Ukraine)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Abstract. Nowadays the world energy system faces numerous transitions and shifts of the existing socio-technical regimes towards higher sustainability. Along with it, the sustainable transitions are often being postponed, slowed down or rejected to avoid negative externalities that could threaten the system stability. In this study, we aim to reach the deeper understanding of the externalities of energy transitions and the vulnerability of energy systems under the influence of negative externalities caused by sustainable energy transitions. Using the Externality theory (Baumol, Oates), Sociotechnical transition theory (Geels), as well as Energy sustainability Trilemma Method for the evaluation of the sustainability of energy systems we argue that such externalities need to be treated (internalized, avoided) by special policy measures other than common (classical) ways which may cause slowing down of sustainability transitions and make extra barriers for them. Transitions to more clean and low-carbon energy systems using energy technologies such as solar, wind, small hydro, biomass, waste management, e-vehicles are in the scope of this paper. It classifies the wide range of policy methods (classical and new) being applied separately and simultaneously, and analyses their application in energy policies designing aimed to combat negative externalities of energy sustainability transitions worldwide, so they might be minimized by properly tailored energy policy in each particular case.

Keywords: energy policy, sustainability transition, negative externalities of sustainability transitions, renewables

For citation: Pysmenna U. Ye., Trypolska G. S. (2020) Sustainable Energy Transitions: Overcoming Negative Externalities. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (4), 312–327. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-312-327>

Устойчивые энергетические трансформации: нивелирование негативных экстерналий

У. Е. Письменная^{1,2)}, Г. С. Трипольская¹⁾

¹⁾Институт экономики и прогнозирования Национальной академии наук Украины
(Киев, Украина),

²⁾Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (Киев, Украина)

Реферат. В настоящее время мировая энергетическая система сталкивается с многочисленными переходами и сдвигами существующих социально-технических режимов в сторону

Адрес для переписки

Письменная Ульяна Евгеньевна
Институт экономики и прогнозирования
Национальной академии наук Украины
ул. Панаса Мирного, 26,
01011, г. Киев, Украина
Тел.: +380 442 80-84-65
uliamyxa@gmail.com

Address for correspondence

Pysmenna Uliana Ye.
Institute for Economics and Forecasting
National Academy of Sciences of Ukraine
26, Panasa Myrnoho str.,
01011, Kyiv, Ukraine
Tel.: +380 442 80-84-65
uliamyxa@gmail.com

повышения устойчивости. Наряду с этим такие устойчивые трансформации часто откладываются, замедляются или отклоняются, чтобы избежать негативных внешних факторов, которые могут угрожать стабильности системы. Авторы статьи постарались донести более глубокое понимание внешних эффектов (экстерналий) энергетических трансформаций и уязвимости энергетических систем под воздействием негативных внешних факторов, вызванных устойчивыми энергетическими трансформациями. Используя теорию экстерналий (Баумоль, Оутс), теорию социотехнических трансформаций Гилса, а также метод трилеммы энергетической устойчивости для оценки устойчивости энергетических систем, можно утверждать, что такие внешние эффекты должны быть подвержены специальным мерам энергетической политики, отличным от общепринятых (классических) способов, которые могут привести к замедлению устойчивых трансформаций в энергетике и создать для них дополнительные барьеры. Рассмотрен переход к более чистым и низкоуглеродным энергетическим системам, использующим такие энергетические технологии, как солнечная энергия, энергия ветра, малая гидроэнергетика, биомасса, утилизация отходов, электронные транспортные средства. Проведена классификация широкого спектра методов политики (классических и новых), применяемых по отдельности и одновременно, выполнен анализ их использования при разработке энергетической политики, направленной на борьбу с негативными побочными эффектами трансформаций на пути к энергетической устойчивости во всем мире, которые можно минимизировать с помощью надлежащим образом разработанной энергетической политики каждой страны.

Ключевые слова: энергетическая политика, устойчивая трансформация, негативные экстерналии устойчивых трансформаций, возобновляемые источники энергии

Для цитирования: Письменная, У. Е. Устойчивые энергетические трансформации: нивелирование негативных экстерналий / У. Е. Письменная, Г. С. Трипольская // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 4. С. 312–327. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-312-327>

Introduction

Today societies witness the so-called quiet energy [r]evolution, when renewables “quietly” replace conventional energy sources, and numerous cities, regions and countries seriously consider transition towards 100 % renewable energy (RE) supply. Over the past ten years about 553 GW of new renewable energy sources (RES) capacities were installed globally [1]. Leading international banks (Bank of America, Citigroup, Morgan Stanley, Wells Fargo) announced the termination of financing for projects of the so-called grey power generation and industry based on coal [2]. Both developed and developing countries elaborate scenarios of transition toward 100 % RES energy supply in the medium and long run. These countries include Belgium, Sweden, Denmark, Croatia, Macedonia, North Africa, the UK, Germany, Hungary, Poland, the EU in general, Australia, USA and Canada, a group of countries in South America, Israel, India, Philippines, Morocco and others. Now Ukraine examines the possibilities of reaching 100 % RES by 2050. In Dec 2016, the EU presented Clean Energy Package, which presumes at least 50 % of energy from RES by 2030. The main elements of the energy [r]evolution are the introduction of RES through decentralized energy systems that reduce the load on the network and network losses, decommissioning of outdated and “dirty” environmental technologies and decoupling, i. e. differentiation of economic growth and increased use of fossil fuels.

The 100 % RES shift induces numerous challenges to the existing industries, people, ecosystems and so on. In some cases, emerging challenges are being omitted or addressed in unsustainable manner. Contemporary narrative and science consider fossil fuels as those generating negative rather than positive externalities [3, 4]. Being full supporters of transition towards 100 % RE supply, nonetheless, we observe negative externalities of RES as well. Understanding the nature of negative externalities, applicable to RES, brings us to the necessity to address the emerging challenges of negative externalities in order to minimize their negative impact. Generally, all technologies have their pros and cons, but avoiding or at least minimizing the negative externalities of sustainable energy technologies leads to their faster expansion and to more sustainable energy and economy.

In this paper, we analyze policy methods which deal with negative externalities based on their origin and impact: local or global, classical and new, internalizing and technological. Despite similar processes occur worldwide, some externalities affect local communities or ecosystems, whereas global externalities are broad-based, affect countries' economies, being broader than just particular technology negative side. Some of them are inevitable, being related to the very nature of technology, whereas other negative externalities are related to improper ways of doing business or poorly tailored regulatory policy. Understanding of technology performance bottlenecks is essential for improvement of regulatory policy, faster spread of RES, cost-cutting and more sustainable economy.

This paper is structured as follows. Section "Sustainability as a path to minimize negative externalities" focuses on the existing theories and analytical framework. Section "Results and discussion. Practice of dealing with negative externalities of sustainability transitions (NEST)" sees the concept of sustainability as one of ways to minimize negative externalities; reviews several cases of negative externalities in Ukraine and globally and proposes new ways to deal and to cope with the mentioned negative externalities. These cases include improper application of feed-in-tariff (FIT), charging of e-vehicles (EV) in day time, cases of hydro power plants (HPP) with dams, externalities of intermittent RES, i. e. of wind and solar power plants (WPP and SPP), as well as negative externalities of the first generation biofuels.

Materials and methods

Researchers usually distinguish three kinds of externalities which follow the different processes in economy. They are:

- a) positive externalities of supply and demand side, i. e. caused by sustainability transitions [5–9];
- b) "network externalities" of existing sociotechnical regimes (the technology attractiveness rises with the rate of its adoption), which strengthen the barriers of the existing regimes [10–12];
- c) negative externalities of production or consumption thoroughly studied within the Externality theory and Environmental Economics [13–15].

P. Zeppini looks at sustainable transitions as the adoption of a new technology under the influence of social interactions and network externalities. He argues that the technological progress in the form of endogenous learning curves is a fundamental factor of sustainable transitions. He also proposes the sustainable transitions model based on discrete choice dynamics, bounded rationality and switching behavior, and by means of the model he studies the efficacy of different policy measures, e. g. FIT and pollution taxation [9].

A. Owen outlines the necessity of the reassessment and internalization of damage costs resulting from combustion of fossil fuels to obtain their real cost compared to the costs of renewable technologies [12].

Negative externalities of production or consumption in the form of reducible but not totally avoidable ecological impact are the most common among other kinds of externalities discussed by economists, ecologists and other social scientists. They see the problem of externalities in proper allocation (Pigou [16], Coase [17]), internalization (Baumol, Oates [13]), monetization (Keppler [18]) and, if could not be eliminated, in the reduction to an appropriate level (Peter, Bird [19]; Coase [17]). Externalities as the market failure occur because of the absence of the “market feedback” between the “victim” and “generator” of an externality. Arrow [20], Kneese [21] spoke about “the markets of externalities” three decades before the appearance of GNG emissions trading system and white certificates mechanism.

Obviously, the negative externalities of sustainability transitions (NEST) could be studied as a kind of common externalities of production or consumption, but treating (internalizing, avoiding) them only in common ways often causes slowing down of sustainability transitions and makes new barriers for them. Classical methods to treat negative externalities are known as Pigouvian taxation, standardization and quotation, Coasian property rights establishment, FIT.

The development and practical application of new policy methods of dealing with NEST is the matter of importance when speaking about the management of sustainability transitions. Among such methods are:

- 1) externalities markets arrangement;
- 2) supplementary markets arrangement;
- 3) markets redesign;
- 4) broader economic assessment and reassessment (e. g. system value (SV) together with LCOE);
- 5) parallel technologies deployment;
- 6) improved operating strategies (6), i. e. Smart Grid, demand side management (DSM), advanced forecasting and enhanced scheduling of power plants; and some other.

Perhaps, the increasing variable renewables generation (VRE) deployment in power systems is the case with the huge NEST (system security concerns) and with the widest range of policy methods, classical and new. They are:

- classical: the responsibility of VRE operators for non-balances;
- new: energy markets redesign (very close to real-time, the enhancing of interconnections to other systems); supplementary (capacity) markets arrange-

ment and the upgrade of traditional power plants to be able to respond to more rapid supply-demand unbalances; new economic reassessment, parallel technologies deployment (energy storages and the interplay with other energy generation, notably with natural gas), Smart Grid development, and DSM (rising the number of prosumers and their role in supply-demand balancing).

An energy policy designing envisages both simultaneous and separate application of such policy methods, taking into account possible cooperation of some socio-technical regimes (e. g. renewable and nuclear, renewable and gas peak-load etc.) and commitments under the international agreements (climate, environmental, political cooperation). Next sections will provide the analysis and the examples of their implementation.

Sustainability as a path to minimize negative externalities

An energy sustainability transition is such energy transition, which leads to the overall rise effect within the energy sustainability Trilemma {energy security; energy affordability; ecological sustainability} [22]. If an energy transition performance maintains the rise along all three axes of Trilemma and the negative externalities are overcome by positive ones in a way that the overall effect grows, that is an energy sustainability transition [23]. Basing on the Externality theory (Baumol, Oates [13]) and Sociotechnical transition theory (Geels, Schot [24]), the social benefit of a transition could be described as:

$$SB_T = SD_0 - NE_T, \quad (1)$$

where SD_0 – social damage caused by the replaced sociotechnical regime; NE_T – negative externality of a transition.

Marginal social benefit of a transition could be described as the following:

$$MSB_T = \frac{dSD_0}{dQ} - \frac{dNE_T}{dQ}, \quad (2)$$

where Q – volume of demand/consumption (for energy sustainability transition – volume of energy demand/consumption: tons of oil equivalent, MW·h, etc., for e-vehicles: p-km (passenger-kilometre) or t-km (tonne-kilometre)).

If $MSB_T > 0$, then such transition could be marked as a sustainability transition.

The equation (2) reflects the different influence of externalities at the different levels of demand or consumption. For example, the growing number of fast charging e-vehicles could affect the grid; it demonstrates that the growth of NEST caused by the growing demand is non-linear. The other example is VRE ratio in a power system. Integrating over the first few percentage points of VRE into the power system poses increasing technical and economic externalities, with the increasing disposal of flexibility stock which is available in traditional power systems and the increasing part of such stock is used to integrate VRE [25].

Fig. 1 demonstrates in terms of the Externality theory the sustainable transition from sociotechnical regime (technology) S_0 to S_T . The social benefit of the transition equals to the avoided social damage of the previous regime (technology), diminished by NEST.

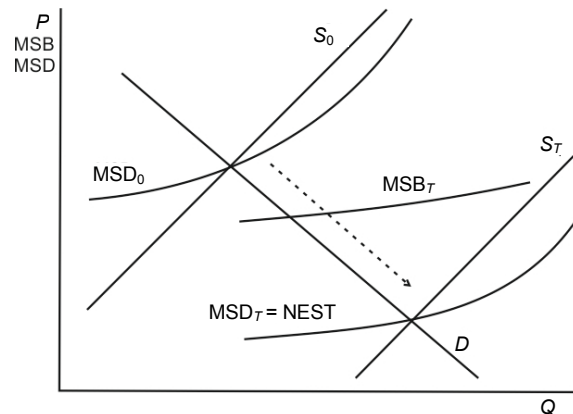


Fig. 1. Marginal social benefit of a sustainable transition: S_0 , S_T – supply curves of previous and new sociotechnical regimes (technologies); D – demand curve;

MSD_0 – marginal social damage (negative externality) of a previous sociotechnical regime (technology); MSD_T – marginal social damage (negative externality) of a transition; MSB_T – marginal social benefit of a transition

Negative externalities are considered to be the cost of resources used by the technology but that are not paid on a market price [26]. Based on that, we can divide policy methods dealing with NEST into two groups:

- a) internalizing – methods which are aimed to internalize NEST and to cover their cost by the market prices (1, 4 and classical methods);
- b) technological – methods which are aimed to minimize or avoid NEST technologically (2, 3, 5, 6, 7).

The main principle of a policy is that the applied methods should not slow down or postpone sustainability transitions, but force them.

Simultaneous application of internalizing and technological methods could be more efficient compared to the application of the methods of one type only. In the above mentioned example of VRE ratio in a power system both types of methods are usually applied: the responsibility of VRE operators for non-balances, economic reassessment (internalizing) and parallel technologies deployment and supplementary markets arrangement, market redesign (technological).

Results and discussion. Practice of dealing with negative externalities of sustainability transitions

Negative externalities now require detailed attention and brief classification based on types of externalities mentioned in the previous section. Examples of global and negative externalities resulting in poor management might be as follows.

In Ukraine, burning of unsorted wastes to produce electricity and sell it against FIT was suggested. It is a doubtful decision from ecological point

of view. In Ukraine, wastes are not being sorted and recycled. The problem scale is so immense, that wastes have already lead to several human deaths in 2016, when four workers of Lviv municipal solid waste landfill tragically passed away while conducting daily operations at the mentioned landfill. This incident has brought attention to the problem of 6700 official and 30000 unofficial overflow landfills all over the country, but has not yet brought Ukraine to the sorting of wastes and further recycling. In Ukraine, 96 % of the wastes is being buried on landfills without further processing. Instead, burning of unsorted wastes to obtain electricity was suggested. We consider this case as unsustainable waste management and improper application of FIT mechanism. The existing solid waste landfills produce methane, which leads to numerous cases of spontaneous combustion. Thus, removal of biogas and further output of electricity, sold against FIT, is a good option for the existing landfills, and maximally possible sorting of wastes with further recycling could be a good option for the upcoming wastes. This could be done by creation of proper regulatory policy toward development of conditions stimulating sorting and further processing of wastes, starting with development and implementation of uniform rules regarding collection and sorting of municipal solid wastes, lack of which now makes impossible investments in wastes recycling plants.

Charging of e-vehicles with fast-charge mostly in daytime creates additional load in the energy system. Even in many developed countries, the existing energy generating capacity is not sufficient to meet the demand for electricity for the vast majority of electric vehicles during the hours of minimum power system load. There are studies indicating that in the US generating capacity is enough to transfer only 70 % of the fleet to electric vehicles. The situation in Ukraine is somewhat different. The coefficient of unevenness of the load curve has recently reached 0.76. The difference between the maximum and minimum daily load in the Ukrainian power system is about 5.5 GW, and the difference between the average daily and minimum load is 2.5 GW. With an average annual passenger car running 20 thousand km, the average daily mileage is 54 km. For simplicity, we suppose that a fully charged battery of an electric car with a capacity of 24 kW·h is sufficient for a run of 160 km and needs to be recharged twice a week for six hours with power consumption when recharging 4 kW. Transition of 10 % of owners of cars (700 thousand cars) to electric cars will entail additional load of the power system during hours of night failure to about 0.9 GW. Consequently, an increase in the transition to electric vehicles to 50 % of owners will positively affect the alignment of the schedule of electrical loads in the power system. However, having more that 50 % of all vehicles as e-vehicles without optimization of energy consumption in the power system of Ukraine (general and electric vehicles), without increasing the value of basic energy generation, without modernization and the transition of electrical networks to European standards would harm the existing energy system. The decrease in the daily unevenness of the load of the power system in the last decade is accomplished by applying economic methods of managing consumers' demand for electric power and capacity or forming economic conditions in which consumers benefit from adjusting their own power consumption regimes.

In Ukraine, where the wide-scale transition toward interval metering has started only recently, charging of e-vehicles with fast-chargers may result in additional difficulties for energy system, as consumers generally prefer fast charging [25]. This scenario is quite possible also because of distribution of chargers that are located mostly in large cities, where people reside mostly in multi-apartment buildings and park their vehicles not in parking lots or garages, but just outdoors, thus having no technical possibility to install individual chargers and where there is quite limited technical possibilities to charge e-vehicles at the long chargers. In other words, in-home charging overnight in Ukraine is limited and will remain limited in future, thus presently faster chargers remain an option, unless legislator would intervene with proper legislation, and market will react with both slower and faster chargers. To avoid charging of e-vehicles during peak hours, many countries have elaborated penalties for using electricity during peak hours, at the same time making non-peak charging more attractive [26–28]. In Ukraine, this kind of legislation is not developed and enforced yet, which creates room for electricity overuse in peak times to charge EVs. At the stage of e-vehicles development some conventional gasoline stations cooperate with e-vehicles importers, offering free charge at gasoline stations even during the day time. Thus, charging e-vehicles only in daytime without proper market regulation makes the practice of e-vehicles charging unsustainable, presenting a negative externality of EVs. There are numerous studies showing consumers' behavior related to charging their EVs. Studies for the USA, Denmark markets [29] state that fast charging itself makes minimal real impact to the grid [30] when the number of e-vehicles is small [31], but it might affect the grid with the anticipated growth of number of e-vehicles on the road. Wilson [32], Christ [33] emphasize that if charging of e-vehicle requires energy obtained from carbon intensive fuel, there might not be saving of CO₂ emissions compared to the vehicle using fossil fuel. In countries where coal dominates in the energy mix, CO₂ emissions from e-vehicles are up to 4 times higher than in countries where electricity is produced from low carbon sources [32]. Even in regions where baseload coverage is relatively low-carbon, charging of e-vehicles during peak times derives from energy generation that can be more carbon intensive, for example, from coal or natural gas. Therefore, the e-vehicles offer rather displaced emission than zero CO₂ emissions, because electricity output from non-RES cause “traditional” emissions.

Examples of local negative externalities might be as follows.

Small hydro power plants (SHPP) are considered as renewable energy source, in some cases providing energy to remote communities that do not have access to centralized energy supply, cleaning small rivers and sometimes fulfilling other important tasks. For instance in Ukraine, Mlynivska SHPP, having capacity of only 0.36 MW, backs up Rivne nuclear power plant in supplying water to cool the reactors [28].

Environmental risks of hydro power plants, derived from construction of dams. Small hydropower plants cause fragmentation of ecosystems, impair the quality of water and affect the hydrology of rivers and their basins. Losses of ecosystems from small HPPs hundreds of times exceed losses from large

HPPs per 1 MW of generated electricity. Simultaneous construction of cascade of SHPPs is often done without considering their cumulative effect. Hydro power plants affect fisheries: during the spawning and migration time the baby fish cannot pass through the dam and die in the turbines. SHPPs cannot contribute significantly to GHG mitigation, because while HPP construction, a water reservoir is needed, and eventually water reservoirs with decaying plants emit methane, which's greenhouse potential is about 25 times higher than that of CO₂. Methane is also dangerous for people working on the rivers, tourists, fishermen etc. These water reservoirs create favorable conditions for mosquitoes way beyond their naturally acceptable population. To start running of HPP, electricity is needed, and it is usually of fossil nature [34]. Despite large HPP and pump storage plants in Ukraine and globally serve as maneuver capacities, water discharge might affect environment adversely, for instance, there is accumulated sludge that needs to be disposed. Water discharge also affects water supply of cities, fields irrigation etc. [28].

Large power plants require dislocation of population where water reservoirs are planned to be constructed. People living nearby become vulnerable to potential floods or other natural catastrophic events, as well as more vulnerable to terroristic attacks related to damaging of dams.

Due to turbines, river beds might be dried, rivers are shallow, which destructs the local ecosystem. In the future, this problem might become more acute even for larger rivers due to process, related to climate change: nowadays in summer flows of rivers all across the Central Europe, including Ukraine, are decreasing, and rivers are becoming shallow. Ukraine already belongs to the group of countries with limited supplies of water, in terms of water being the poorest country in Europe. Reduction of rainfall leads to significant increase of demand for water, more frequent and severe droughts (which currently occur every 100 years). According to forecasts, they will be twice as likely to 2070 in case of reduction of river drain basin [35]. Changing the modes of operation of the cascades of Dnipro rivers' reservoirs will affect the operation of SHPPs, but will not help against water shortages [36]. In Northern Ukraine, annual runoff may increase by 15–25 %, i. e. winter runoff is expected to increase, while spring runoff will decrease, which would also affect the operation of SHPPs. In South and South-East Ukraine annual river flow may decrease by 30–50 %, which increases the risk of droughts and extreme floods [37]. SHPPs adversely affect float types of tourism, as tourists cannot plan their routes through the dams.

To avoid some of the mentioned negative externalities, scientists have elaborated damless power plants; however, they are small and able to provide electricity only to several households. Also, some countries regulate that feed-in-tariff can be obtained only for surplus energy, i.e. energy that is above the needs of local communities (e. g. in Latvia). However, SHPPs often provide higher damage to ecosystem without being able to supply enough energy to meet local community's needs.

Solar power has its negative environmental impact as well. Nowadays there are at least several arguments that need further attention: extraction of silicon from silica requires significant amounts of energy that derives from fossil fuels. Solar power plants require land surface, which creates competition for land with

other aspects of land use. Jacobson et al. [38] developed scenarios to achieve 100 % RES in 139 countries, including Ukraine, so that all the energy needs (transportation, heating/cooling, industry, agriculture) would be met only by RES. According to the authors' estimations, this scenario would require 42.54 % less energy than under the BAU scenario due to higher efficiency of energy conversion to work, no need for extraction, transportation or processing fossil fuel, and because the efficiency of final energy use is higher than under the BAU scenario. To ensure the needed energy output, additional area is required, however, the competition for land would not be severe [39] (Tab. 1).

Table 1

**Energy generating facilities and area required to fully meet the energy demand
in 139 countries globally in 2050¹⁾**

Technology	Capacity of 1 plant/device, MW	Percentage of 2050 load that would be covered by the plant	Capacity of the plants, GW	Number of new plants, needed for 139 countries	Percentage of territory in 139 countries, needed for new plants ²⁾	Percentage of territory as distance between RES objects to locate new plants
Onshore WPP	5	23.52	8332	1582345	0.00002	0.92380
Offshore WPP	5	13.62	4688	935150	0.00001	0.54600
Wave and tidal	0.75	0.58	307	409517	0.00018	0.00860
Geothermal	100	0.67	96	839	0.00023	0
HPP	1300	4	1058	0	0	0
Tidal turbines	1	0.06	31	30050	0.00001	0.00009
Rooftop SPP of households	0.005	14.89	9277	1841306023	0.04026	0
Rooftop SPP of public and commercial sectors	0.1	11.58	7586	74981706	0.03279	0
SPP	50	21.36	12629	251230	0.12832	0
Municipal heliostations	100	9.72	2153	21485	0.05270	0
Total		100	46157	1919518345	0.255	1.478
To cover peak loads and to store energy						
Additional heliostations	100	5.83	1292	12921	0.032	0
Heliothermal power plants	50		4639	84448	0.005	0
Heothermal heat	50		70	0	0	0
Total			52159	1919615713	0.291	1.478
¹⁾ Total area of 139 countries is 119.651.632 km ² . ²⁾ Physical area on the surface of ground or water (without area of underground facilities, which makes sense in case of geothermal combined heat and power plants). The source is [39].						

Tab. 1 shows that authors do not expect construction of new HPPs, however, the efficiency of the existing dams is going to be increased. The existing SPP also will be replaced by the more efficient ones, as large SPP can be located only

in a few countries. At the same time, the existing buildings' surfaces can be used more efficiently, so that new areas would be used scarcely to accommodate new additional SPP. New RES facilities would require 0.22 % of the total area of 139 countries. The additional area is mainly needed for industrial SPP. Authors do not include areas that would become vacant in future and now are used for the existing, fossil fuels-based energy generation (mining, transportation, processing) and growing feedstock even for biofuels.

The optimal way to diminish this negative effect is to use all possible surfaces that can no longer be used for anything else, such as buildings' rooftops etc. Large solar power plants might negatively impact birds migration, as flying birds consider burning hot surfaces of SPP as water and burn themselves. In future, there will be a growing problem of utilization of used solar panels. Solar thermal or concentrated solar power applications use fluids that absorb and collect heat, being potentially dangerous when spilled.

Generally wind power have gain significant acceptance of society [39, 40]. Ecologists claim that wind turbines negatively affect birds' migration and birds' lives, but there are some other negative externalities. In this extent, a concept "Not in my backyard" has emerged. This concept was even measured: according to Dröes, Koster [41], existing wind turbines had adverse effect on house prices in the Netherlands. Authors witnessed an average 1.4 % price decrease for houses located less than 2 km near the existing turbine. If turbine is located 500–750 m close to the house, its price drops by 2.3 %. Noticeably prices begin to decline three years prior to turbine put into operation (after such plans are declared). On first glance, 1.4–2.3 % does not seem high; however, authors translate it into loss of EUR 3,500–5,600 per house. Turbines, located in urban areas, impose some other constraints, such as noise, vibration, shadowing of nearby properties and change views of landscapes (any of this side effect cannot be directly monetized). This is not only the case of the Netherlands; similar story is observed in the UK (Gibbons [42]), where house prices are about 5 % lower close to wind turbine. Ladenburg, Dubgaard [43] indicate that people in Denmark agree to pay annually to extend the distance of a single wind turbine or wind farm from residential area. These cases indicate that there is a strong need for careful planning of where turbines can be located, which cannot always be presumed by the existing policy. Policy itself might have flaws: Markandya [4] states that FITs are usually developed in the way that there is no difference in FIT size in location of wind turbines. In Ukraine, this particular bottleneck at this particular stage of market development has not arisen yet: now the windiest sites are getting occupied for wind parks, whereas individual turbines are being erected not only in sites where connection to the centralized energy supply is remote (and thus more expensive), but also based on individual preferences and possibilities of a turbine owner. But this might become an issue in future.

The first generation biofuels is one of the most controversial energy sources in terms of assessed energy return on investments (EROI) [44, 45] and their numerous negative externalities. Subsidizing biofuels has led to increased output of feedstock for their production, leading to increased use of nitrates in agriculture [4]. Extensive use of palm oil for the needs of cosmetics and food output

has created high demand for this feedstock. Biofuels demand has aggravated the problem. High demand for bioenergy crops of the first generation biofuels led to deforestation of territories in the Amazon River basin. European ambitious target of 10 % of energy from RES in transport sector led to tremendous increase of feedstock use for biofuels globally. This target also brings the question of needed arable lands beyond the territories of where biofuels is going to be consumed. In the EU, the arable land decreased from 120 million ha in 1993 to 109 million ha in 2009 due to consolidation of farms and growing cities [45]. Growing demand for biofuels crops has affected prices of many agricultural commodities, and dilemma “food versus fuel” emerged. Increased use of biofuels has also affected Ukraine, despite the fact that biofuel output in Ukraine almost ceased in 2015–2016 [47], Ukraine is seen as a place to grow feedstock for biofuels for other consumers. It is considered to be a country with plenty of unused land, that “retired” after the Soviet Union collapse, and that this land should be used to grow feedstock for biofuels [48]. Estimations of unused land area vary considerably – from 0.6 million ha up to 4 million ha [49].

Schaffartzik et al. [46] forecast continued supply of feedstock for biofuels production in the EU. For example, rapeseed from Ukraine was expected to continue to be exported to the EU (but in much smaller quantities than a decade ago). Although EU regulatory policy regarding the use of biofuels is gradually changing in favor of the production of the latter according to the principles of sustainable development and from non-edible raw materials, Ukraine still faces phenomena related to indirect land use change (ILUC). Growing and export of rapeseed was significantly growing since 2004, and only within 4 years (by 2008) it increased 20 times. Now rapeseed exports decreased by one third compared to 2014. As of 2010, ILUC caused by the use of biofuel in Europe, was about 5 million ha. By that time in Russia, Ukraine and Kazakhstan there were 23 million hectares of unused land which European companies have started using to plant biofuels crops. In Ukraine, the average use of the land is 0.7 ha/person¹, and, for comparison, in France it is 0.3 ha/person; in Germany it is 0.1 ha/person [46]. However, in some countries rapeseed is grown not on the unused lands. Moreover, in numerous cases in land is leased for growing rape, which causes extreme exhaustion of soil as this is a technical crop, without further restoration of soil. There are some other practices that do not comply with the European sustainability criteria for cultivation of feedstock, and also harm the surrounding farms.

The biofuels policy has already significantly affected Ukraine and expectedly will affect the country in the future (not even talking into account country’s international obligations regarding RES in total primary energy supply, output and use of biofuels in the domestic market). Fischer et al. [50] forecast that by 2030 solely for biofuels output 44.2–53.1 million ha of arable land would be

¹ Since 2014 this ratio is different due to loss of territories and population in Southern and Eastern Ukraine.

needed globally, of which 21.8–22.6 million ha would be located in Ukraine. This makes a half of agricultural land in Ukraine and almost 2/3 of arable land in this country. Increased production of feedstock for biofuels will highly compete with production of other types of crops, and will also require a doubling of yields of traditional and new crops, which now represents a significant difficulty. European biofuels policy and technologies undergoes alterations toward sustainability. However, only feedstock types are going to change, whereas both political and market prerequisites would promote cultivation and export of new species of feedstock from Ukraine to the EU [51]. Thus, the production and use of biofuels carries significant direct impact on land use.

The above mentioned externalities are summarized in Tab. 2.

Table 2

Relevant negative externalities of sustainability transitions and ways to overcome them

Case	Policy method to cope with it	(I)nternalizing / (T)echnological
Improper application of FIT	Classical, supplementary markets arrangement	I
Charging of EVs in day time	Broader economic assessment and reassessment, parallel technologies deployment	T
SHPPs with dams	Parallel technologies deployment	T
Solar power	Externalities markets arrangement, supplementary markets arrangement, markets redesign, broader economic assessment and reassessment	
Wind power	Parallel technologies deployment, improved operating strategies	
1 st generation biofuels	Classical, markets redesign	I
The source: developed by the authors.		

CONCLUSION

Sustainability transitions, including transitions towards renewable energy sources, may have their negative externalities, and there are ways to overcome them. These externalities might be minimized by properly tailored policy in each particular case. The mentioned negative externalities of sustainable transitions are of supranational nature, but in some cases, they might affect not only countries that employ RES, but also the poorest developing countries (for instance, by affecting food prices). Cases observed bring us to conclusion that majority of negative externalities are similar for many countries globally. Countries may want to develop their own set of measures to handle and minimize negative externalities, but also to use common international experience in dealing with negative externalities of sustainable transitions.

List of abbreviations

NEST – negative externalities of sustainable transitions;
RES – renewable energy sources;
ILUC – indirect land use change;
RE – renewable energy;
FIT – feed-in tariff;
EV – electric vehicles;
HPP – hydro power plant;
SHPP – small hydro power plant;
WPP – wind power plant; SPP – solar power plant;
BAU – business as usual;
SV – system value;
LCOE – levelized cost of electricity;
DSM – demand side management;
EROI – energy return on investments.

REFERENCES

1. Greenpeace International (2015) *Energy [R]Evolution. A Sustainable World Energy Outlook 2015. 100 % Renewable Energy for All*. Available at: <https://issuu.com/greenpeaceinternational/docs/energy-revolution-2015-full-hr>.
2. Biggest World Banks Prohibited Investments into Coal Power Generation and Industry. *Elektrovesti.net* (15.08.2016). Available at: http://elektrovesti.net/48214_krupneyshie-mirovye-banki-zapretili-investitsii-v-ugolnuyu-generatsiyu-i-promyshlennost (in Russian).
3. Cordell R., Hedin D., Krahenbuhl J. (2016) *Economics of Renewable Energy & Externalities*. Available at: <https://sites.mii.se/immersivlearning/files/2016/07/Norway-presentation.pdf>.
4. Markandya A. (2012) Externalities from Electricity Generation and Renewable Energy. Methodology and Application in Europe and Spain. *Cuadernos Económicos de ICE*, 83. <https://doi.org/10.32796/cice.2012.83.6034>.
5. Kemp R. (1994) Technology and the Transition to Environmental Sustainability. The Problem of Technological Regime Shifts. *Futures*, 26, 1023–1046. [https://doi.org/10.1016/0016-3287\(94\)90071-x](https://doi.org/10.1016/0016-3287(94)90071-x).
6. Hekkert M., Negro S. (2009) Functions of Innovation Systems as a Framework to Understand Sustainable Technological Change: Empirical Evidence for Earlier Claims. *Technological Forecasting and Social Change*, 76 (4), 584–594. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2008.04.013>.
7. Foxon T. (2011) A Coevolutionary Framework for Analysing a Transition to a Sustainable Low Carbon Economy. *Ecological Economics*, 70 (12), 2258–2267. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.07.014>.
8. Markard J., Raven R., Truffer B. (2012) Sustainability Transitions: An Emerging Field of Research and its Prospects. *Research Policy*, 41 (6), 955–967. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.02.013>.
9. Zeppini P. (2015) A Discrete Choice Model of Transitions to Sustainable Technologies. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 112, 187–203. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2015.01.006>.
10. Katz M. L., Shapiro C. (1985) Network Externalities, Competition and Compatibility. *American Economic Review*, 75, 424–440.
11. Unruh G. (2000) Understanding Carbon Lock-in. *Energy Policy*, 28 (12), 817–830. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00070-7](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00070-7).
12. Owen A. D. (2006) Renewable Energy: externality costs as market barriers. *Energy Policy*, 34 (5), 632–642. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.11.017>.

13. Baumol W. J., Oates W. E., Bawa V. S., Bradford D. F. (1988) *The Theory of Environmental Policy*. New York: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139173513>.
14. Fullerton D., Stavins R. (1998) How Economists See the Environment. *Nature*, 395 (6701), 433–434. <https://doi.org/10.1038/26606>.
15. Gruber J. (2003) *Public Finance and Public Policy*. Worth Publishers. <https://doi.org/10.7551/mitpress/5689.001.0001>.
16. Pigou A. C. (1912) *Wealth and Welfare* [The Economics of Welfare]. London: Macmillan & Co, 1912.
17. Coase R. H. (1960) The Problem of Social Cost. *Journal of Law and Economics*, 3, 1–44. <https://doi.org/10.1086/4665>.
18. Keppler J. H. (1998) Fixed Costs, Information and Externalities. *Kyklos*, 51 (4), 547–563. <https://doi.org/10.1111/j.1467-6435.1998.tb01436.x>.
19. Peter J. W., Bird N. (1987) The Transferability and Depletability of Externalities. *Journal of Environmental Economics and Management*, 14 (1), 54–57. [https://doi.org/10.1016/0095-0696\(87\)90005-2](https://doi.org/10.1016/0095-0696(87)90005-2).
20. Arrow K. J. (1969) The Organization of Economic Activity: Issues Pertinent to the Choice of Market Versus Non-Market Allocation. *The Analysis and Evaluation of Public Expenditures: the P.P.B. System* Joint Economic Committee. Washington: U.S. Government Printing Office, 47–66.
21. Kneese A. K., Clifford S. R. (1987) Environmental Economics. *The New Palgrave: a Dictionary of Economics*, 1–8. https://doi.org/10.1057/978-1-349-95121-5_634-1.
22. Energy Trilemma Index (2016). *World Energy Council*. Available at: <https://trilemma.worldenergy.org/>.
23. Pysmennaya U. Ye., Trypolska G. S. (2020) Maintaining the Sustainable Energy Systems: Turning from Cost to Value. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 14–29 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-14-29>.
24. Geels F. W., Schot J. (2007) Typology of Sociotechnical Transition Pathways. *Research Policy*, 36 (3), 399–417. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.01.003>.
25. Lucas A., Bonavitacola F., Kotsakis E., Fulli G. (2015) Grid Harmonic Impact of Multiple Electric Vehicle Fast Charging. *Electric Power Systems Research*. 127, 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.05.012>.
26. Botsford C., Szczepanek A. (2009) *Fast Charging vs. Slow Charging: Pros and Cons for the New Age of Electric Vehicles*. Available at: https://pdfs.semanticscholar.org/902f/918a01e0d5a54291ea34902328cf40d27840.pdf?_ga=2.127447629.1339029295.1594499145-1093527698.1570376008.
27. *Next Generation Wind and Solar Power: from Cost to Value*. IAE, 2016. 40.
28. Ryabchyn O. (2017) *Research of Green Expedition*. Available at: http://biz.nv.ua/experts/ryabchin_a/issle-dovanie-zelenoj-ekspeditsii-1194390.html (in Russian).
29. Foosnæs A. H., Jensen A. N., Niels Chr. (2011) Case Studies of Grid Impacts of Fast Charging. *EDISON-Electric Vehicles in a Distributed and Integrated Market Using Sustainable Energy and Oper Networks*. Copenhagen.
30. Etezadi (2009) University of Nevada, Reno. *Communication with AeroVironment Staff February*. Pre-Published Report on Grid Impacts from Fast Charging.
31. U. S. Department of Energy (2014) *Evaluating Electric Vehicle Charging Impacts and Customer Charging Behaviors – Experience from Six Smart Grid Investment Grant Projects*. Available at: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/12/f19/SGIG-EvaluatingEVcharging-Dec2014.pdf>.
32. Wilson L. (2013) *Shades of Green: Electric Cars' Carbon Emissions Around the Globe*. Available at: <http://shrinkthatfootprint.com/wp-content/uploads/2013/02/Shades-of-Green-Full-Report.pdf>.
33. Crist Ph. (2012) *Electric Vehicles Revisited: Costs, Subsidies and Prospects*. Discussion Paper No 2012-O3. Available at: <http://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/dp201203.pdf>.
34. Abbasi T., Abbasi S. A. (2011) Small Hydropower's Negative Impact on the Environment. *Oil Price.com*. Available at: <http://oilprice.com/Alternative-Energy/Hydroelectric/Small-Hydropowers-Negative-Impact-On-The-Environment.html>.
35. Alcamo J., Moreno J. M., Nováky B., Bindi M., Corobov R., Devoy R. J. N., Giannakopoulos C., Martin E., Olesen J. E., Shvidenko A. (2007) Europe. Parry M. L., Canziani O. F., Palutic

- kof J. P., van der Linden P. J., Hanson C. E. (eds.) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 541–580.
36. ESCO (2006) *2nd National Report of Ukraine on Climate Change*. Kyiv. <https://allbeton.ru/upload/iblock/460/vtoroe-nacionalnoe-soobschenie-ukraini-po-voprosam-izmeneniya-klimata.pdf> (in Russian).
 37. Manukalo V. (2009) *Impacts of Climate Changes in Ukraine on Hydrological Regime and Water Resources: Assessment and Measures of Adaptation*. American Geophysical Union, Fall Meeting. abstract #GC43B-03. Available at: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009AGUFMG C43B.03M/abstract>.
 38. Jacobson M. Z., Delucchi M. A., Bauer Z. A. F., Goodman S. G., Chapman W. E., Cameron M. A., Bozonnat C. [et al.] (2017) 100 % Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight All-Sector Energy Roadmaps for 139 Countries of the World. *Joule*, 1 (1), 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.07.005>.
 39. Podderegina L. I. (2005) The Evaluation of the Efficacy of Inter-Industrial Relation Efficiency at Power Enterprises. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (3), 82–87 (in Russian).
 40. Lazarev V. S., Yurik I. V. (2018) Some “Exotic” Information Sources that Have Been Discovered during the Selection of Serial Publications to Support Research in Energy Security, Energy Conservation and Energy Efficiency Technologies and Techniques: Advantageous Addition for “Professional Reading” of a Power Engineering Expert. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (2), 167–178 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-167-178>.
 41. Dröes M. I., Koster H. R. A. (2016) Renewable Energy and Negative Externalities: the Effect of Wind Turbines on House Prices. *Journal of Urban Economics*, 96, 121–141. <https://doi.org/10.1016/j.jue.2016.09.001>.
 42. Gibbons S. (2014) Gone With the Wind: Valuing the Local Impacts of Wind Turbines Through House Prices. *Journal of Environmental Economics and Management*, 72, 177–192. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2015.04.006>.
 43. Ladenburg J., Dubgaard A. (2007) Willingness to Pay for Reduced Visual Disamenities from Offshore Wind Farms in Denmark. *Energy Policy*, 35 (8), 4059–4071. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.01.023>.
 44. Hall C., Dale B., Pimentel D. (2011) Seeking to Understand the Reasons for Different Energy Return on Investment (EROI) Estimates for Biofuel. *Sustainability*, 3 (12), 2413–2432. <https://doi.org/10.3390/su3122413>.
 45. Hall Ch., Lambert J., Balogh St. (2014) EROI of Different Fuels and the Implications for Society. *Energy Policy*, 64, 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>.
 46. Schaffartzik A., Plank C., Brad A. (2014) Ukraine and the Great Biofuel Potential? A Political Material Flow Analysis. *Ecological Economics*, 104, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.04.026>.
 47. *Energy Balance of Ukraine*. Available at: http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2012/ener/en_bal/arh_2012.htm. (Accessed 20 May 2017) (in Ukrainian).
 48. Baral A., Malins C. H. (2016) Additional Supporting Evidence for Significant iLUC Emissions of Oilseed Rape Biodiesel Production in the EU Based on Causal Descriptive Modeling Approach. *GCB Bioenergy*, 8 (2), 382–391. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12254>.
 49. Geletukha G., Zheliezna T. (2012) *Position of Bioenergy in the Draft Updated Energy Strategy of Ukraine Till 2030*. Position Paper. Available at: https://img.ukr.bio/data/news/img/2012_1129/uabio-misce_bioenerfetu_v_proecti_energetuchoi_strategii_ukrainu_do_2030.pdf (in Ukrainian).
 50. Fischer G., Prieler S., van Velthuizen H., Berndes G., Faaij A., Londo M., de Wit M. (2010) Biofuel Production Potentials in Europe: Sustainable Use of Cultivated Land and Pastures, Part II: Land Use Scenarios. *Biomass and Bioenergy*, 34 (2), 173–187. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.07.009>.
 51. Trypolska G., Kyrzyuk S. (2018) Development of Ukraine's Bioenergy Sector in the Context of the EU Guidelines. *Ekonomika i Prognozuvannâ*, 2018 (3), 138–159. <https://doi.org/10.15407/eip.2018.03.138>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-328-339>

УДК 621.316.925

Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах

Ф. А. Романюк¹⁾, В. Ю. Румянцев¹⁾, Ю. В. Румянцев¹⁾, В. С. Каченя¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Использование ортогональных составляющих (ОС) является основным направлением определения информационных параметров в микропроцессорной релейной защите и автоматике электроэнергетических систем. По известным ОС можно реализовать большинство измерительных органов, применяемых в современных устройствах защиты и автоматики. Для выделения ОС используются цифровые нерекурсивные частотные фильтры, в основу которых положено дискретное преобразование Фурье. Главным недостатком указанных фильтров – их невысокое быстродействие, превышающее период промышленной частоты. Для построения быстродействующих измерительных органов такое время установления истинного выходного сигнала часто является неприемлемым. В статье предлагается формировать ОС эквивалентного сигнала в микропроцессорных защитах по значениям косинусной и синусной ОС основной гармоники, сформированных с использованием дискретного преобразования Фурье, путем их умножения на корректирующий коэффициент, который является функцией значений амплитуды входного сигнала и его основной гармоники. Предлагаемый алгоритм формирования ОС входных сигналов в микропроцессорных защитах отличается высоким быстродействием в переходных режимах и обладает широкими функциональными возможностями. Разработана структурная схема формирователя ОС эквивалентного сигнала, все блоки которой могут быть реализованы по известным схемам на микросхемной и микропроцессорной элементной базе. В среде динамического моделирования MatLab-Simulink реализована модель формирователя ОС. Проверка функционирования модели проводилась с использованием двух видов тестовых воздействий – синусоидального сигнала с частотой 50 Гц (идеализированное воздействие), а также сигнала, приближенного к реальному вторичному току трансформатора тока при коротком замыкании. В результате выполненных расчетов установлено существенное (до двух раз) повышение быстродействия предлагаемого метода формирования ОС по сравнению с формирователями, основанными на дискретном преобразовании Фурье, при идентичности частотных свойств обоих формирователей.

Ключевые слова: ортогональные составляющие, микропроцессорная защита, цифровые фильтры, дискретное преобразование Фурье, модель, тестовое воздействие, вычислительный эксперимент, амплитудно-частотная характеристика, трансформатор тока, MatLab, Simulink

Для цитирования: Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 4. С. 328–339. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-328-339>

Адрес для переписки

Романюк Федор Алексеевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-00-51
faromanuk@bntu.by

Address for correspondence

Romaniuk Fiodar A.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 331-00-51
faromanuk@bntu.by

Orthogonal Components Forming of the Microprocessor-Based Protection Input Signals

F. A. Romaniuk¹⁾, V. Yu. Rumiantsev¹⁾, Yu. V. Rumiantsev¹⁾, V. S. Kachenya¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The use of orthogonal components (OS) is the main direction of determining information parameters in microprocessor relay protection and automation of electric power systems. Most of the measuring devices used in modern protection and automation devices can be implemented using known operating systems. Digital non-recursive frequency filters based on discrete Fourier transform are used for OS selection. The main disadvantage of these filters is their low performance that exceeds the period of industrial frequency. For the construction of high-speed measuring devices, this time of establishing the true output signal is often unacceptable. The article proposes to form the equivalent signal OS in microprocessor defenses based on the values of the cosine and sine axes of the main harmonic formed using a discrete Fourier transform, by multiplying them by a correction factor, which is a function of the values of the input signal amplitude and its main harmonic. The proposed algorithm for generating OS input signals in microprocessor defenses is characterized by high performance in transient modes and has wide functionality. A block diagram of an OS equivalent signal generator has been developed, all blocks of which can be implemented according to known schemes on a microelectronic and microprocessor element base. The OS shaper model is implemented in the MatLab-Simulink dynamic modeling environment. The model functioning was checked using two types of test actions, viz. a sinusoidal signal with a frequency of 50 Hz (idealized action) and a signal close to the real secondary current of a short-circuit current transformer. As a result of the performed calculations, a significant (up to two times) in the speed of the proposed method of OS formation in comparison with the formers based on the discrete Fourier transform, frequency properties of both formers being identical.

Keywords: orthogonal components, microprocessor protection, digital filters, discrete Fourier transform, model, test effect, computational experiment, amplitude-frequency response, current transformer, MatLab, Simulink

For citation: Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Kachenya V. S. (2020) Orthogonal Components Forming of the Microprocessor-Based Protection Input Signals. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (4), 328–339. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-328-339> (in Russian)

Введение

Существенное влияние на быстродействие микропроцессорных защит электроустановок оказывает инерционность алгоритмов формирования ортогональных составляющих входных сигналов. Для повышения быстродействия указанных алгоритмов применяются гибкие цифровые формирователи ОС, которые запускаются при возникновении повреждения [1]. При этом выделение ОС осуществляется с небольшим окном наблюдения, например составляющим половину периода основной частоты. С течением времени указанное окно может не изменяться либо увеличиваться, а при достижении заданного момента времени принимает первоначальное значение [2].

Гибкие цифровые формирователи ОС входных сигналов отличаются сложностью реализации, а во многих случаях оказываются недостаточно эффективными. С учетом этого с целью повышения быстродействия предлагается формировать ОС указанных сигналов в виде эквивалентных, являющихся функцией корректирующего коэффициента и ОС, полученных с применением классических алгоритмов.

Основная часть

Для выделения из входного сигнала ОС заданной частоты могут быть использованы алгоритмы цифровых фильтров (ЦФ) с постоянными коэффициентами, которые будем называть базовыми, такие как: ЦФ на основе метода наименьших квадратов, дискретного преобразования Фурье (ДПФ), а также формирователи ОС [3, 4]. Формирование косинусной x_{cn} и синусной x_{sn} ОС указанными ЦФ осуществляется согласно выражениям:

$$x_{cn} = \sum_{n=1}^N a_{cn} x_n; \quad (1)$$

$$x_{sn} = \sum_{n=1}^N a_{sn} x_n,$$

где a_{cn} , a_{sn} – коэффициент косинусного и синусного ЦФ соответственно; x_n – выборка входного сигнала.

При этом значение амплитуды заданной гармоники для произвольной выборки n

$$X_{mn} = \sqrt{x_{cn}^2 + x_{sn}^2}. \quad (2)$$

Формирование косинусной x_{eqcn} и синусной x_{eqsn} ОС эквивалентного сигнала для выборки n осуществляется путем умножения x_{cn} и x_{sn} на корректирующий коэффициент k_{kn} [5]:

$$x_{eqcn} = k_{kn} x_{cn}; \quad (3)$$

$$x_{eqsn} = k_{kn} x_{sn}.$$

Численное значение k_{kn} для произвольной выборки n рассчитывается по амплитудам для этой же выборки сигнала базового ЦФ X_{mn} и дополнительного ЦФ X_{mnd} с учетом характера изменения сигнала по изложенной ниже методике.

В существующих микропроцессорных защитах для формирования ОС входных сигналов главным образом используются ЦФ на основе ДПФ [6]. Поэтому в качестве базового определим фильтр Фурье. На рис. 1 (кривая 1)

представлена переходная характеристика указанного фильтра для амплитудных значений при подаче и снятии синусоидального сигнала основной частоты.

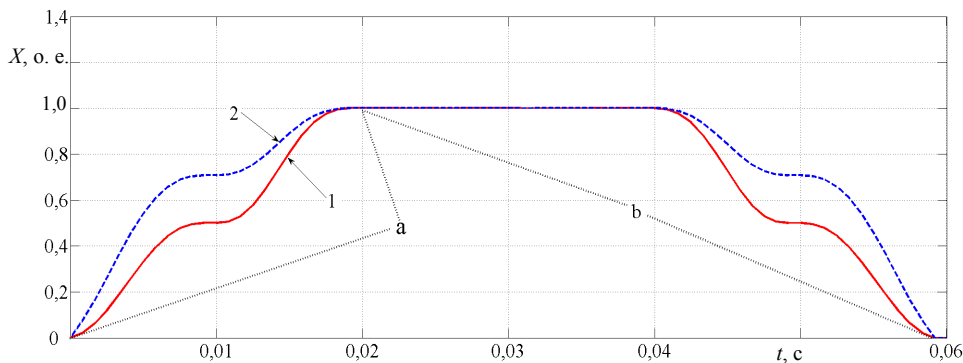


Рис. 1. Переходные характеристики цифровых фильтров

Fig. 1. Digital filters step response

В качестве дополнительного выбран фильтр, формирующий амплитудные значения сигнала в соответствии с выражением

$$X_{mnd} = \sqrt{\frac{2}{N} \sum_{n=1}^N x_n^2}. \quad (4)$$

Переходная характеристика данного фильтра для амплитудных значений при подаче и снятии синусоидального сигнала основной частоты приведена на том же рис. 1 (кривая 2).

Основное условие реализуемости предлагаемого метода определения k_{kn} с положительным эффектом состоит в том, чтобы переходная характеристика дополнительного фильтра в областях подъема и спада сигнала располагалась выше аналогичной характеристики базового фильтра.

Корректирующий коэффициент k_{kn} для различных участков переходной характеристики базового фильтра определяется по-разному. Выделим на характеристике 1 (рис. 1) два участка: a – нарастания сигнала; b – неизменного состояния либо спада сигнала. Если произвольная выборка n находится в пределах участка a , то ей присваивается признак $c = 1$, а когда n расположена на участке b , то $c = 0$.

Для задания признака c фиксируются два смежных амплитудных значения сигнала базового фильтра $X_{m(n-r)}$ и X_{mn} , по которым рассчитывается параметр P

$$P = \frac{X_{mn}}{X_{m(n-r)}}(1 - \varepsilon). \quad (5)$$

Если $P \leq 1$, то $c = 0$, в противном случае $c = 1$. Постоянная $0 < \varepsilon \leq 0,1$ в выражении (5) обеспечивает отстройку от кратковременных прова-

лов амплитудных значений сигнала базового фильтра, когда на участке a $X_{mn} < X_{m(n-r)}$, а на участке b $X_{mn} > X_{m(n-r)}$.

Численное значение k_{kn} для произвольной выборки n в пределах участка a ($c = 1$) рассчитывается по выражению [5]

$$k_{kn} = l \left(\frac{X_{mnd}}{X_{mn}} - 1 \right) + 1, \quad (6)$$

где l – постоянный коэффициент.

Для произвольной выборки n на участке b ($c = 0$) k_{kn} принимается равным 1.

Принимая во внимание отмеченное выше и с учетом признака c , получим общее выражение для определения k_{kn} для произвольной выборки n , находящейся на любом из участков a , b :

$$k_{kn} = c \left[l \left(\frac{X_{mnd}}{X_{mn}} - 1 \right) + 1 \right] + 1 - c. \quad (7)$$

При выборе численного значения постоянного коэффициента l необходимо учитывать, что с его увеличением возрастает быстродействие формирования ОС эквивалентного сигнала. Однако после превышения l некоторой величины на переходной характеристике отмечаются выбросы указанного сигнала. Оптимальным будет значение l , при котором достигается высокое быстродействие формирования ОС эквивалентного сигнала при гладкой переходной характеристике с отсутствием на ней выбросов. Последнее будет обеспечиваться, если в переходных режимах относительное значение амплитуды эквивалентного сигнала для критической выборки X_{mkeq*} не превысит 1.

Исходя из этого, а также с учетом (3)

$$k_{kn} \leq \frac{1}{X_{mk*}}, \quad (8)$$

где X_{mk*} – относительное значение амплитуды сигнала базового фильтра для критической выборки.

Указанная выборка соответствует максимальной разности между однозначными значениями $X_{mnd}(t)$ и $X_{mn}(t)$ переходных характеристик дополнительного и базового фильтров.

Приравняв значения k_{kn} в (6) и (8), после несложных преобразований получим

$$l \leq \frac{1 - X_{mk*}}{X_{mkd*} - X_{mk*}}, \quad (9)$$

где X_{mkd*} – относительное значение амплитуды сигнала дополнительного фильтра для критической выборки.

Для выбранных в качестве базового и дополнительного фильтров соответственно ЦФ Фурье и функционирующего в соответствии с (4), учитывая их реальные переходные характеристики, рассчитанное значение $l \leq 2,4$.

Следует отметить, что в переходных режимах текущие значения k_{kn} , определяемые по (7), могут существенно возрастать. Большие k_{kn} обуславливают ухудшение частотных свойств алгоритма формирования эквивалентного сигнала. Совпадение частотных свойств указанного алгоритма и ДПФ обеспечивается при ограничении k_{kn} на уровне 2, что не оказывает существенного влияния на его быстродействие.

Предлагаемый способ формирования ОС эквивалентного сигнала для микропроцессорных защит отличается высоким быстродействием, обладает широкими функциональными возможностями, позволяющими реализовать практически все применяемые в релейной защите измерительные органы.

На рис. 2 представлена структурная схема цифрового устройства формирования ОС эквивалентного сигнала, в каждом блоке которой выполняется определенное преобразование сигнала или реализуется математическое выражение в соответствии с рассмотренным выше алгоритмом.

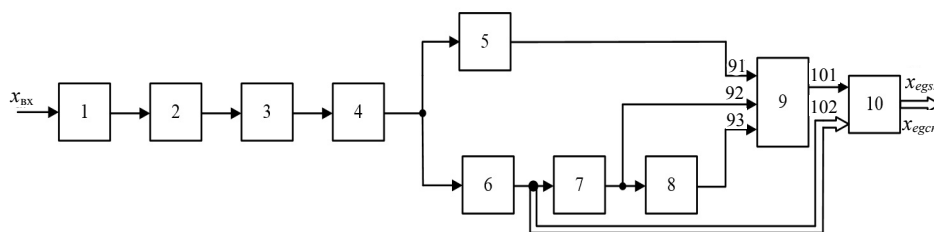


Рис. 2. Структурная схема цифрового устройства формирования ортогональных составляющих эквивалентного сигнала в микропроцессорных защитах

Fig. 2. Block diagram of a digital device for forming orthogonal components of an equivalent signal in microprocessor defenses

Входной преобразователь 1 преобразует входной вторичный сигнал $x_{вх}$, поступающий от измерительного трансформатора защищаемого объекта, в пропорциональный сигнал напряжения и представляет собой промежуточный трансформатор.

Фильтр нижних частот 2 – это активный фильтр, выполненный на операционном усилителе и предназначенный для подавления спектральных компонент, частота которых превышает половину частоты дискретизации.

Аналого-цифровой преобразователь 3 осуществляет преобразование выборок выходного сигнала фильтра нижних частот в цифровой код.

Оперативное запоминающее устройство 4 выполняет функцию хранения последних n выборок входного сигнала, которые обрабатываются в последующих блоках.

В блоке 5 с использованием дополнительного ЦФ определяется амплитудное значение входного сигнала X_{mnd} согласно (4).

В основу выполнения блока формирования ОС основной гармоники входного сигнала 6 положено ДПФ, при котором с помощью базового ЦФ по выражениям (1) выделяются косинусная x_{cn} и синусная x_{sn} ОС.

Блок определения амплитудного значения основной гармоники входного сигнала X_{mn} 7 реализует выражение (2).

В блоке определения характера изменения входного сигнала 8 формируется признак c . Для этой цели фиксируются два смежных амплитудных значения основной гармоники входного сигнала X_{mn} и $X_{m(n-r)}$, по которым с учетом постоянной ε согласно (5) вычисляется параметр P . Если выполняется условие $P_n \leq 1$, то признаку c присваивается значение $c = 0$, в противном случае $c = 1$.

В блоке 9 определения корректирующего коэффициента k_{kn} реализуется выражение (7), позволяющее учесть характер изменения сигнала: в случае нарастания сигнала ($c = 1$) корректирующий коэффициент принимает значение, определяемое выражением (6), а при его неизменном характере или спаде ($c = 0$) $k_{kn} = 1$, что соответствует вычислению ОС сигнала по алгоритму ДПФ согласно (1). Как отмечалось выше, оптимальное значение постоянного коэффициента l , входящего в (7), при котором отсутствует перерегулирование переходной характеристики и достигается приемлемое быстроедействие, составляет 2,4.

Блок формирования x_{eqcn} , x_{eqsn} ОС эквивалентного сигнала 10 реализует функцию их вычисления по значениям x_{cn} , x_{sn} и величине корректирующего коэффициента k_{kn} по выражениям (3).

Все блоки и элементы структурной схемы цифрового устройства формирования ОС эквивалентного сигнала могут быть реализованы по известным схемам с использованием средств микроэлектронной и микропроцессорной техники.

Моделирование

Оценка эффективности предлагаемого метода формирования ОС входных сигналов проводилась с использованием цифровой модели, реализованной в среде динамического моделирования MatLab-Simulink.

В структуру указанной модели входят энергосистема, трехфазная группа трансформаторов тока и трансформатор напряжения, нагрузка, блок короткого замыкания, а также модели элементов, обеспечивающие реализацию алгоритма получения ОС [7, 8]. Моделирование блоков и элементов цифровой структуры выполнено с применением методов и правил, использовавшихся в [9–11].

На рис. 3 приведена структура модели формирователя ОС эквивалентного сигнала, реализованная из стандартных блоков библиотеки Simulink в соответствии с рассмотренной на рис. 2 схемой. Укрупненно модель

содержит пять составных блоков, в которых моделируется работа основных элементов формирователя ОС или производятся вычисления:

- входного преобразователя, фильтра нижних частот, аналого-цифрового преобразователя (блок «ФНЧ-АЦП»);
- базового фильтра на основе ДПФ (блок «ДПФ»);
- дополнительного ЦФ (блок «ЦФД»);
- признаков и коэффициентов, определяющих характер изменения сигнала (блок «ХИС»);
- корректирующего коэффициента (блок «Кк»).

На выходах блоков умножения *Product* и *Product1* формируются ОС эквивалентного сигнала x_{eqcn} , x_{eqsn} , значения которых выводятся на виртуальный осциллограф *Scope*.

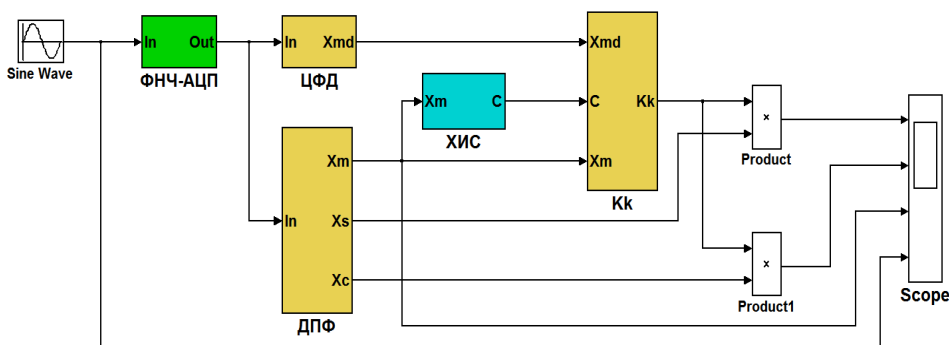


Рис. 3. Структура Simulink-модели формирователя ортогональных составляющих эквивалентного сигнала

Fig. 3. The structure of Simulink model of the orthogonal components of the equivalent signal former

Результаты исследования

Проверка работоспособности и эффективности предложенного метода формирования ОС входных сигналов в микропроцессорных защитах осуществлялась с использованием двух видов тестовых воздействий – синусоидального сигнала, а также сигнала, приближенного к реальным вторичным токам трансформаторов тока и напряжениям трансформаторов напряжения.

Гармоническое воздействие. На рис. 4 представлены результаты функционирования предлагаемого устройства формирования ОС эквивалентного сигнала и базового ЦФ, реализованного с использованием ДПФ, при синусоидальном воздействии (кривая 3). Время установления амплитудного значения эквивалентного сигнала (кривая 1) при $l = 2,4$ составляет менее 0,5 периода промышленной частоты, что в два с лишним раза больше, чем у ЦФ на основе ДПФ (кривая 2). В установившемся режиме и при спаде сигнала оба ЦФ функционируют идентично.

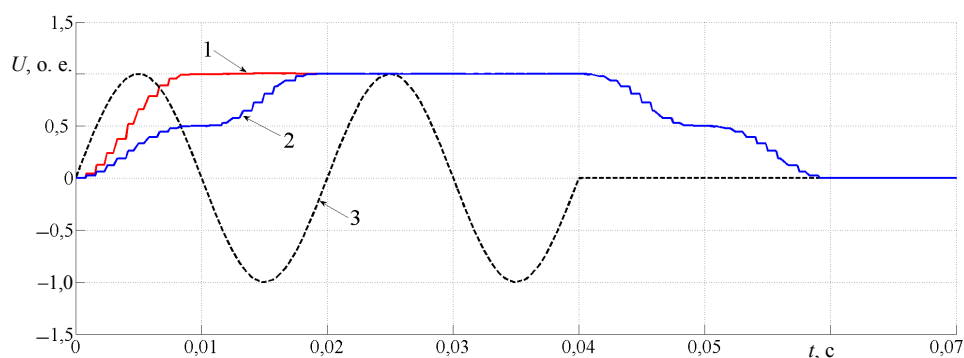


Рис. 4. Результаты функционирования моделей цифровых фильтров

Fig. 4. Digital filters models performance results

Для проверки правильности определения фазы эквивалентного сигнала сравнивались синусная ОС последнего X_{eqsn} с аналогичной ОС ДПФ X_{sn} при гармоническом воздействии (рис. 5). В момент подачи воздействия (кривая 3) ОС X_{eqsn} (кривая 1) располагается выше, чем X_{sn} (кривая 2). По мере затухания переходного процесса обе ОС сближаются и в дальнейшем совпадают как в установившемся режиме, так и при исчезновении входного воздействия (момент времени 0,04 с).

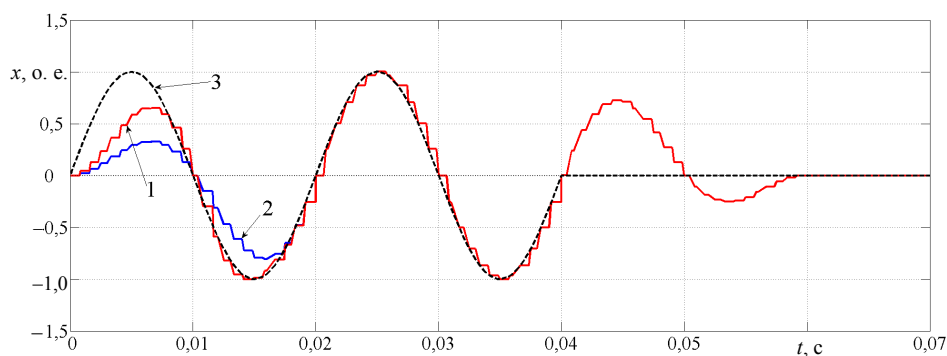


Рис. 5. Синусные ортогональные составляющие

Fig. 5. Sine orthogonal components

Частотные свойства формирователя ОС эквивалентного сигнала оценивались по его амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) в сравнении с АЧХ базового фильтра Фурье. Для построения АЧХ необходимо в схеме рис. 3 изменять при неизменной амплитуде частоту входного сигнала и измерять амплитуду выходного сигнала. Такую итерационную процедуру можно автоматизировать написанием скрипта MatLab, в котором используются функция *set_param* для задания параметров моделирования и функции *sim* для запуска моделирования. Результаты расчетов АЧХ сравниваемых ЦФ представлены на рис. 6. АЧХ предлагаемого формирователя ОС (кривая 1) и ЦФ на основе ДПФ (кривая 2) полностью совпадают во всем исследуемом частотном диапазоне. Незначительные отличия в

низкочастотной области связаны с крупным шагом изменения частоты в 5 Гц для сокращения времени расчета.

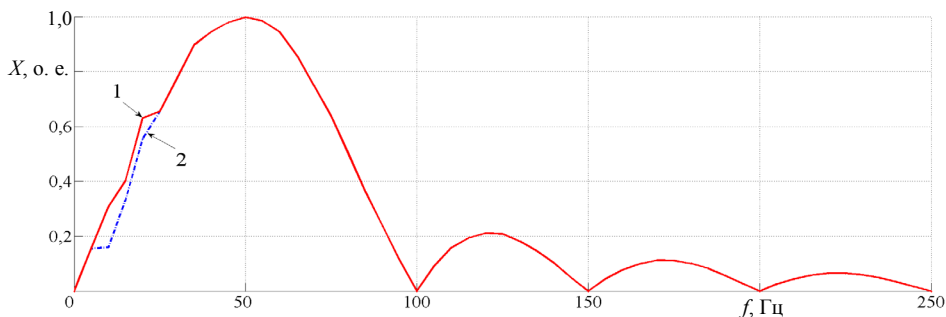


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики формирователя ортогональных составляющих эквивалентного сигнала и цифрового фильтра Фурье

Fig. 6. Amplitude-frequency characteristics of the former of orthogonal components of the equivalent signal and the digital Fourier filter

Сложное входное воздействие. На рис. 7 приведены результаты расчетов с использованием воздействия, приближенного к реальному вторичному току трансформатора тока (ТТ). Такое воздействие получено с помощью комплексной математической модели, включающей модели энергосистемы, защищаемого объекта, измерительного ТТ, а также моделей вышеперечисленных ЦФ.

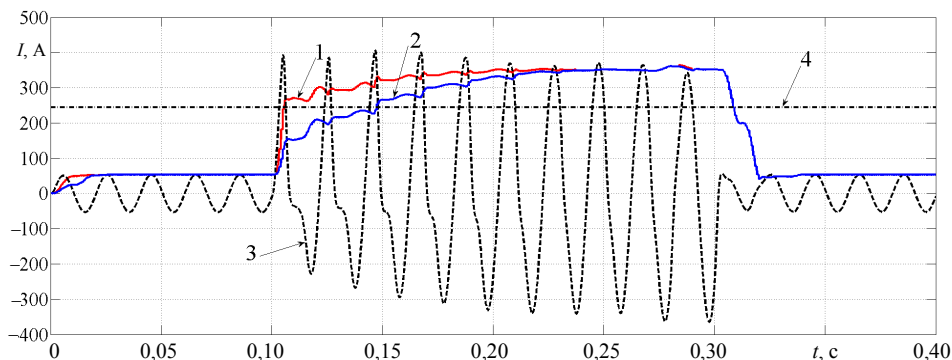


Рис. 7. Результаты моделирования при сложном входном воздействии

Fig. 7. The simulation results in case of the compound test signal

В промежутке времени $t = 0,00-0,10$ с моделируется доаварийный режим, при котором вторичный ток ТТ (контролируемый сигнал) синусоидален. В момент времени $t = 0,1$ с происходит трехфазное короткое замыкание – аварийный режим, когда форма вторичного тока ТТ искажается вследствие насыщения его магнитной системы (кривая 3). При этом время нарастания выходных сигналов по отношению к уставке срабатывания (кривая 4) в переходном режиме существенно различается: у предлагаемого формирователя ОС выходной сигнал нарастает быстрее (кривая 1) и располагается выше выходного сигнала ЦФ на основе ДПФ (кривая 2).

Так продолжается до момента времени $t = 0,24$ с, когда заканчивается переходный процесс (ТТ выходит из режима насыщения) и форма вторичного тока ТТ становится синусоидальной. В послеаварийном режиме и при исчезновении сигнала функционирование формирователя ОС эквивалентного сигнала не отличается от ЦФ на основе ДПФ.

ВЫВОДЫ

1. Предложенный метод повышения быстродействия формирования ортогональных составляющих входных сигналов может быть реализован как в токовых цепях, так и в цепях напряжения микропроцессорных защит.

2. Выполненные вычислительные эксперименты с использованием гармонического и приближенного к реальному тестовых воздействий показали существенное (до двух раз) повышение быстродействия предлагаемого метода формирования ортогональных составляющих входных сигналов по сравнению с формирователями на основе дискретного преобразования Фурье без заметного ухудшения частотных свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 594 с.
2. Романюк, Ф. А. Принципы выполнения гибких формирователей ортогональных составляющих входных величин в микропроцессорных защитах электроустановок / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, К. Ф. Романюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2012. № 6. С. 5–10.
3. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты / Ю. В. Румянцев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 5. С. 397–417. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-5-397-417>.
4. Романюк, Ф. А. Способы формирования ортогональных составляющих входных сигналов для релейной защиты / Ф. А. Романюк, М. С. Ломан, В. С. Каченя // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-5-14>.
5. Методика повышения быстродействия измерительных органов микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 403–412. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412>.
6. Schweitzer, E. O. Filtering for Protective Relays / E. O. Schweitzer, D. Hou // WESCA-NEX 93. Communications, Computers and Power in the Modern Environment. Conference Proceedings. IEEE, 1993. P. 15–23.
7. SimPowerSystems. User's Guide. Version 5. The MathWorks, 2011.
8. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
9. Romaniuk, F. A. Digital Filters of Seperate the First and Second Harmonics of Signals in Microprocessor-Bases Protection of Electrical Installations Equipped with Transformers / F. A. Romaniuk, V. S. Kachenya, K. Kierczynski // Przegląd Electrotechniczny. 2018. Vol. 1, No 7. P. 48–51. <https://doi.org/10.15199/48.2018.07.11>.

10. Цифровой измерительный орган для функционирования в условиях глубокого насыщения трансформатора тока / Ю. В. Румянцев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 6. С. 483–493. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-483-493>.
11. Снижение влияния изменений частоты на формирование ортогональных составляющих входных сигналов релейной защиты / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 42–54. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-42-54>.

Поступила 07.04.2020 Подписана в печать 09.06.2020 Опубликовано онлайн 30.07.2020

REFERENCES

1. Shneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
2. Romaniuk F. A., Rumjansev V. Yu., Romaniuk K. F. (2012) Principles of Fulfillment of Flexible Formers of Orthogonal Input Value Components in Micro-Processing Protection of Power Plants. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 5–10 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2012-0-6-76-82>.
3. Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2016) Digital Filters Implementation in Microprocessor-Based Relay Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (5), 397–417 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417>.
4. Romaniuk F. A., Loman M. S., Kachenya V. S. (2019) Methods of Forming Orthogonal Components of Input Signals for Relay Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 5–14 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-5-14>.
5. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. A., Rumiantsev Yu. V. (2019) Technique of Performance Improvement of the Microprocessor-Based Protection Measuring Element. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (5), 403–412 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412>.
6. Schweitzer E. O., Hou D. (1993) Filtering for Protective Relays. *WESCA-NEX 93. Communications, Computers and Power in the Modern Environment. Conference Proceedings. IEEE*, 15–23. <https://doi.org/10.1109/wescan.1993.270548>.
7. *SimPowerSystems. User's Guide. The MathWorks, Inc.* 2011.
8. Chernykh I. V. (2008) Modeling of Electrical Devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink. Moscow, DMK Press; St.-Petersburg, Piter. 288 (in Russian).
9. Romaniuk F. A., Kachenya V. S., Kierczynski K. (2018) Digital Filters of Seperate the First and Second Harmonics of Signals in Microprocessor-Bases Protection of Electrical Installations Equipped with Transformers. *Przegląd Electrotechniczny*, 1 (7), 48–51. <https://doi.org/10.15199/48.2018.07.11>.
10. Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2018) Digital Current Measurement Element for Operation During Current Transformer Severe Saturation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 483–493 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-483-493>.
11. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Dzaruhina A. A. (2020) Reducing the Impact of the Frequency Change on the Formation of Orthogonal Components of the Relay Protection Input Signals. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 42–54 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-42-54>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-340-354>

УДК 662.76:504.064:683.95 (045)

Экологические характеристики современных систем бытового использования топлива

Часть 1

Б. С. Сорока¹⁾, В. В. Горупа¹⁾

¹⁾Институт газа Национальной академии наук Украины (Киев, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Выполнен анализ экологической составляющей процессов сжигания природного газа в атмосферных горелках бытовых газовых плит. Проведены расчетные и экспериментальные исследования образования вредных веществ при сжигании природного газа. Рассмотрено равновесие в системе $\text{NO}-\text{O}_2-\text{NO}_2$. Проведен термодинамический анализ трансформации системы в процессе горения природного газа (метановоздушной смеси). Несмотря на существенное (иногда на порядки) отличие термодинамически равновесных концентраций оксидов азота $[\text{NO}_x]_{eq}$ от локальных, фактических замеренных значений $[\text{NO}_x] = [\text{NO}] + [\text{NO}_2]$, величины $[\text{NO}]_{eq}$ могут служить качественным индикатором реальных концентраций $[\text{NO}_x]$. В процессах горения природного газа и других топлив при высоких температурах $[\text{NO}] \gg [\text{NO}_2]$ как для равновесных, так и для замеренных концентраций. При умеренных и низких локальных температурах, вплоть до 600 К, равновесные концентрации $[\text{NO}_2]_{eq} \rightarrow [\text{NO}]_{eq}$ по порядку величин. При определенных составах горючей смеси может наступить соотношение $[\text{NO}_2] \gg [\text{NO}]$, что представляет опасность для здоровья. В связи с наблюдаемым в ряде случаев образованием особо токсичного NO_2 анализируется влияние температуры реакции и состава горючей смеси на возможность образования диоксида азота в продуктах сгорания. Предложена методология экспериментального изучения образования вредных выбросов и создан огневой компьютеризованный стенд для исследования сжигания углеводородных газов в горелках бытовых плит. Установлено влияние коэффициента избытка первичного воздуха на образование CO , NO , NO_2 . Доказана возможность появления выбросов с высокой концентрацией диоксида азота.

Ключевые слова: атмосферная горелка, бытовая газовая плита, диоксид азота, загрязнение окружающей среды, константы равновесия, коэффициент избытка воздуха, оксиды азота, природный газ, равновесные продукты сгорания, термодинамический анализ

Для цитирования: Сорока, Б. С. Экологические характеристики современных систем бытового использования топлива. Часть 1 / Б. С. Сорока, В. В. Горупа // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 4. С. 340–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-340-354>

Адрес для переписки

Сорока Борис Семенович
Институт газа
Национальной академии наук Украины
ул. Дегтяревская, 39,
03113, г. Киев, Украина
Тел.: +38 044 455-59-98
boris.soroka@gmail.com

Address for correspondence

Soroka Boris S.
The Gas Institute
of the National Academy of Sciences of Ukraine
39, Degtyarevskaya str.,
03113, Kyiv, Ukraine
Tel.: +38 044 455-59-98
boris.soroka@gmail.com

Environmental Characteristics of Modern Systems of Domestic Use of Fuel

Part 1

B. S. Soroka¹⁾, V. V. Horupa¹⁾

¹⁾The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

Abstract. The analysis of the environmental component of the processes of natural gas burning in atmospheric burners of domestic gas stoves has been carried out. The computational and experimental studies of the harmful substances formation by combustion of natural gas have been performed. The chemical equilibrium of the NO–O₂–NO₂ system was considered. The thermodynamic analysis of transformation of the system during a process of natural gas (methane-air mixture) combustion has been tested. Despite an essential (sometimes – by the order(s)) difference between the thermodynamically equilibrium concentration of the nitrogen oxides [NO_x]_{eq} and the local, actually measured values [NO_x] = [NO] + [NO₂], the [NO]_{eq} values could be served as the qualitative indicators of actual values of [NO_x] concentrations. In the combustion processes natural gas and other fuels combustion at high temperatures [NO] >> [NO₂] for both equilibrium and measured concentrations. By moderate and low local temperatures up to 600 K the equilibrium concentration [NO₂]_{eq} → [NO]_{eq} in order of magnitude. Under some compositions of burning mixture the correlation could be set as [NO₂] >> [NO], resulting in great danger for the human health. With regard to the formation of particularly toxic NO₂ effluents observed in some cases, an influence of the reaction temperature and the composition of the combustible mixture on the possibility of nitrogen dioxide formation in the combustion products have been analyzed. A methodology for the experimental study of the harmful emissions formation has been proposed while the computerized firing rig has been developed for studying the combustion of hydrocarbon gases in burners of household stoves. An influence of the coefficient of primary air excess on the CO, NO, NO₂ formation has been revealed and the possibility of appearance the emissions of a high concentration of nitrogen dioxide has been demonstrated.

Keywords: atmospheric burner, household gas stove, nitrogen dioxide, environmental pollution, equilibrium constants, air excess factor, nitrogen oxides, natural gas, equilibrium combustion products, thermodynamic analysis

For citation: Soroka B. S., Horupa V. V. (2020) Environmental Characteristics of Modern Systems of Domestic Use of Fuel. Part 1. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (4), 340–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-340-354> (in Russian)

Введение

Период возникновения интереса к изучению процессов горения применительно к бытовому использованию газа относится преимущественно к первой половине XX в., когда в Европе и США строились газовые заводы, поставлявшие городской газ как продукт переработки (газификации) твердого и жидкого минерального топлива (fossil fuels), в частности для бытовых нужд.

В начале XX в. в Москве было газифицировано 3 % квартир [1]. В настоящее время наряду с отопительными устройствами основное оборудование, в котором используются горючие газы в быту, – плиты для термической обработки продуктов питания и приготовления пищи, а также

водонагреватели для нагрева воды и обеспечения надлежащих санитарно-бытовых условий проживания людей.

Около 40 лет назад исследования в области горения при бытовом использовании газа были практически приостановлены, что предопределило ограниченный объем накопленной информации относительно экологических характеристик бытовых горелочных устройств. Особенно серьезные последствия указанное обстоятельство может иметь в связи с процессами сжигания топлива в газовых плитах, не оснащенных системой организованного отвода продуктов сгорания.

В [2] анализируются особенности энергоснабжения жилых зданий в отопительный период. Представлены мнения относительно вредных выбросов, возникающих при сжигании газа в бытовых плитах.

В Институте газа НАН Украины после многолетнего перерыва возобновлены систематические исследования сжигания углеводородов в горелках газовых плит с учетом образования токсичных веществ: оксидов азота NO , NO_2 и углерода CO . Исследования проводятся на специально созданном огневом стенде, где можно устанавливать и менять исследуемое горелочное устройство. Кроме того, отдельные испытания осуществляются в натуральных условиях – на газовых плитах [3].

Предмет исследований и современное состояние проблемы

Сегодня в качестве топлива для бытовых газовых приборов используются углеводородные газы: природный и сжиженный. В Украине с 2008 г. потребление природного газа в коммунально-бытовом секторе экономики, в том числе населением непосредственно, преобладает над использованием его в промышленности. Динамика изменения потребления природного газа по годам представлена на рис. 1 [4].

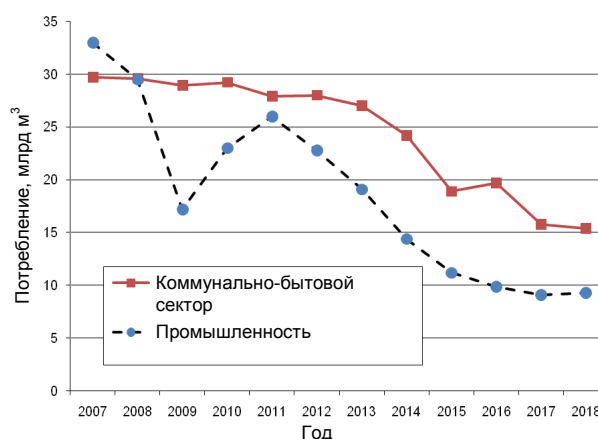


Рис. 1. Изменение потребления природного газа в Украине

Fig. 1. Changes of natural gas consumption by Ukraine

Из рис. 1 следует, что с 2007 по 2018 г. в Украине резко сократилось абсолютное потребление газового топлива, причем в коммунально-бытовом секторе – в два раза. С учетом всего объема использования природного газа в Украине за последние годы (2017–2018) можно утверждать, что до 50 % общего его потребления приходится на коммунально-бытовой сектор страны. По этой причине особое значение приобретает задача эффективно-го использования природного газа в отрасли при максимальном снижении загрязнения атмосферы.

Газовые горелки и плиты

Особый тип горелочных устройств, применяемых в бытовой технике, – атмосферные горелки [5, 6], инжекционные устройства, в которые принудительно из сети подается горючий газ, а часть воздуха по отношению к стехиометрическому потоку (первичный воздух) подсасывается внутрь горелки и смешивается с газом. В результате на выходе из горелки сжиганию подвергается богатая газозоудушная смесь. Одновременно в горящую первичную смесь за пределами горелки подсасывается вторичный воздух из окружающего пространства. В [6] эти пламена именуются смешанными ламинарными пламенами с предварительно перемешанной и не перемешанной смесью, а также для него указывается значение избытка топлива (fuel equivalence ratio ER) $\Phi = ER = \lambda_{pr}^{-1} = 1,4$, где λ_{pr} – коэффициент избытка первичного воздуха. Согласно [6], до 30 % всего объема потребляемого в мире природного газа сжигается при организации пламен описанного типа.

Таким образом, можно полагать, что атмосферные горелки являются разновидностью струйных факельных горелок или горелок Maker со смесителем Вентури. Они формируют бунзеновские пламена (горелки с прямоточным смесителем [5, 7]), которые обеспечивают ламинарное горение богатой предварительно подготовленной смеси с созданием конических пламен (изначально на поверхности конуса (конусов) при выпуске горючей смеси в окружающий воздух и при последующем диффузионном дожигании первичной газозоудушной смеси [5–7]).

Проблема энергоэкологической эффективности использования газового топлива при его сжигании в бытовых газовых плитах является комплексной и связана со многими факторами, оказывающими взаимное влияние в системе «газовая горелка – нагреваемая емкость» (рис. 2).

Газовая плита – специальное устройство для обеспечения тепловой обработки воды, других жидкостей и приготовления пищи. При экспериментальных исследованиях бытовую газовую плиту следует рассматривать как техническую систему, включающую атмосферные газовые горелки, узлы подачи газа с учетом вовлечения окружающего воздуха (первичного и вторичного) и управления процессом сжигания рабочей смеси (рис. 2). В качестве рабочей рассматривается емкость различной геометрии и размеров, для которой определяющей характеристикой служит поверхность тепло-

обмена. Для определения энергетической эффективности системы размеры емкости регламентируются национальными и международными стандартами (Украины [8, 9], России [10], Китая [11] и Евросоюза [12]).

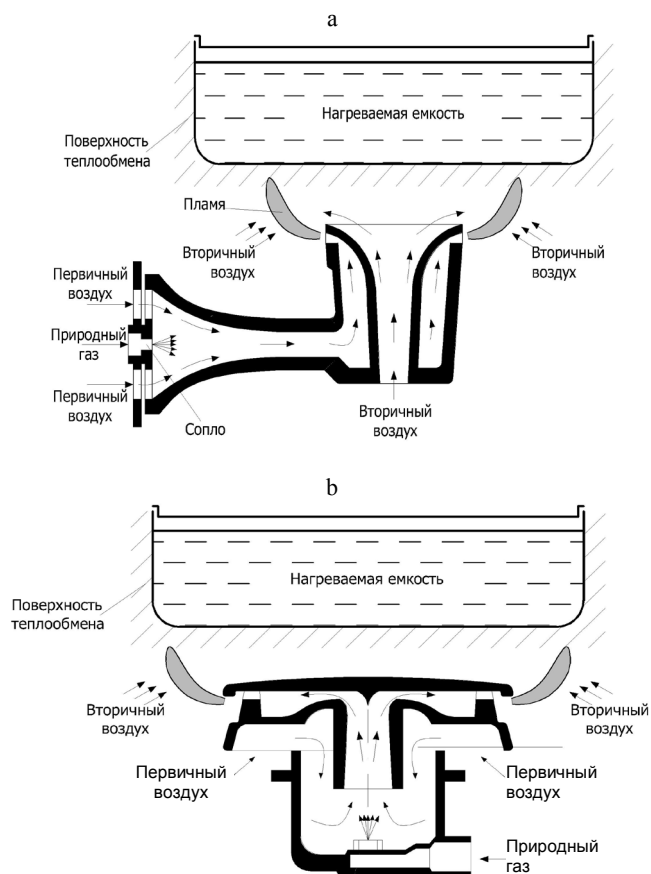


Рис. 2. Принципиальная схема системы «газовая горелка – нагреваемая емкость» для различных способов подвода вторичного воздуха горения: а – центральный и периферийный; б – только периферийный

Fig. 2. The “gas burner – heated vessel” basic system for different modes of supply of secondary combustion air: a – central and peripheral; b – only peripheral

Термодинамика образования вредных компонент в продуктах сгорания при работе бытовых газовых приборов

Основными вредными компонентами продуктов сгорания при сжигании углеводородов в атмосферных горелках газовых плит и водонагревателей являются оксиды углерода (CO) и азота (NO и NO₂). Последние объединены общим обозначением NO_x. Концентрация [NO_x] = [NO] + [NO₂]. Несмотря на наличие в продуктах сгорания углеродных и углеводородных соединений, включая формальдегид [13], именно оксиды NO_x и CO привлекают основное внимание исследователей.

В процессе горения топлива в котлах и других топливосжигающих устройствах образуется преимущественно оксид азота NO [14], во всяком случае, по данным [15], доля NO₂ в общем объеме NO_x составляет не более 2–3 %. В соответствии с результатами исследований, проведенных в США, соотношение $100 [\text{NO}_2]/([\text{NO}] + [\text{NO}_2])$ для котельных агрегатов находится в пределах 5–11 % [15]. К сожалению, в настоящее время во многих источниках не приводятся отдельные значения выбросов [NO] и [NO₂] [16, 17].

При попадании в атмосферу под действием солнечного излучения NO трансформируется в высокотоксичный диоксид азота NO₂, ядовитый газ, который имеет негативное влияние на организм человека. Ученые из Национальной лаборатории имени Лоуренса (США) провели экологические исследования газовой плиты и установили, что при сгорании природного газа диоксид азота может образовываться непосредственно в факелах атмосферных газовых горелок. Это особенно опасно при отсутствии вытяжных устройств над газовыми плитами [13].

Предельно допустимые концентрации (ПДК) регламентируются соответствующими нормативными документами и по NO_x составляют: ПДК_{м.р.} = 0,4 мг/м³ по NO, ПДК_{м.р.} = 0,2 мг/м³ по NO₂ [18]. При этом следует отметить общую тенденцию ослабления жесткости экологических нормативов в Украине. Ранее значение ПДК_{м.р.} для NO₂ было более жесткое и составляло 0,085 мг/м³ [14]. Диоксид азота NO₂ ранее был во втором классе опасных веществ, сейчас NO и NO₂ относятся к третьему классу. Учитывая, что вредное воздействие выбросов компонента X, загрязняющих атмосферу, определяется отношением $[X]/\text{ПДК}_X$ [15], можно утверждать, что 1 ppm [NO₂] по токсичности соответствует 2–5 ppm и более [NO].

Расчет термодинамического равновесия системы NO–O₂–NO₂

На начальном этапе оценки трендов относительного влияния состава исходной горючей смеси на выход токсичных компонент может быть использован термодинамический анализ. Методология расчета термодинамически равновесного состава продуктов реакции базируется на учете исходного состава реагирующей смеси: поэлементного (при фиксированных температурах процесса) и покомпонентного (при одновременном определении теоретической температуры горения), а также параметров процесса горения [19].

Для горения в условиях бытовых приборов обоснованным является термодинамический анализ при изобарно-изотермическом процессе горения: $p = \text{const}$; $T = \text{const}$.

Соответствующие методики были предложены во второй половине XX в., прежде всего в США и СССР. В настоящее время в различных организациях используются программные продукты: TERRA (МВТУ, рук. Б. Н. Трусов), FUEL (Институт газа НАН Украины, рук. Б. С. Сорока) и др.

Принципиальные закономерности образования основных вредных веществ по их отношениям, в частности для NO_x ($[\text{NO}]/[\text{NO}_2]$) и CO_x ($[\text{CO}]/[\text{CO}_2]$), мо-

гут быть найдены в предположении соответствия состояния отдельных компонент и смеси продуктов сгорания уравнению идеального газа [20] через табулированные константы реакций атомизации компонент с использованием простейших реакций



для которой константа равновесия химической реакции

$$K_p = \frac{p_{\text{NO}_2}^2}{p_{\text{NO}}^2 p_{\text{O}_2}} = \left(\frac{D_{\text{NO}_2}}{D_{\text{NO}}} \right)^2 D_{\text{O}_2}^{-1} = \frac{k_{\text{NO}}^2 k_{\text{O}_2}}{k_{\text{NO}_2}^2}, \quad (2)$$

где p_X , k_X – парциальное давление и константа реакции атомизации компонента X ; $X \equiv \text{NO}, \text{O}_2, \text{NO}_2$.

Из (2) следует:

$$\frac{D_{\text{NO}_2}}{D_{\text{NO}}} = (K_p D_{\text{O}_2})^{0,5}; \quad (3)$$

$$\frac{[\text{NO}]}{[\text{NO}_2]} = [K_p(T) D_{\text{O}_2}]^{-0,5}. \quad (4)$$

Что касается оксидов углерода, то процесс доокисления



имеет константу равновесия

$$K_p = \frac{p_{\text{CO}_2}^2}{p_{\text{CO}}^2 p_{\text{O}_2}} = \frac{k_{\text{CO}}^2 k_{\text{O}_2}}{k_{\text{CO}_2}^2}. \quad (6)$$

В (2) и (6) константы реакции атомизации запишутся в виде:

$$k_{\text{CO}_2} = \frac{p_{\text{C}} p_{\text{O}}^2}{p_{\text{CO}_2}}; \quad (7a) \quad k_{\text{CO}} = \frac{p_{\text{C}} p_{\text{O}}}{p_{\text{CO}}}; \quad (7b) \quad k_{\text{O}_2} = \frac{p_{\text{O}}^2}{p_{\text{O}_2}}; \quad (7c)$$

$$k_{\text{NO}_2} = \frac{p_{\text{N}} p_{\text{O}}^2}{p_{\text{NO}_2}}; \quad (7d) \quad k_{\text{NO}} = \frac{p_{\text{N}} p_{\text{O}}}{p_{\text{NO}}}. \quad (7e)$$

Принцип Ле-Шателье – Брауна качественно указывает направления смещения равновесия химических реакций, устанавливая, что внешнее воздействие, выводящее систему из состояния термодинамического равновесия, вызывает процессы, ослабляющие рассматриваемое воздействие [21]. Для приведенных реакций с вредными компонентами, прежде всего с окси-

дами азота и углерода, принцип Ле-Шателье позволяет проанализировать влияние параметров p , T процесса горения на направления реакций.

В случае повышения температуры реакции система отзывается своим охлаждением. На основании принципа Ле-Шателье в ходе экзотермической реакции при нарушении равновесия вследствие роста температуры система будет противодействовать своему нагреву сдвигом в сторону исходных компонент (в сторону обратной – эндотермической – реакции). Экзотермическая реакция горения CO (5) сопровождается сдвигом реакции в сторону исходных компонент ($2\text{CO} + \text{O}_2$) в случае повышения температуры реакции.

При анализе доокисления NO в NO_2 следует прежде всего выяснить характер рассматриваемой реакции. Для определения влияния температуры на ход реакции (1) необходимо оценить ее тепловой эффект. Равновесная теплота реакции Q_p в соответствии с подходом [22] определяется ее величиной и знаком через равновесные полные энтальпии исходных компонент $I_{init,eq}(T_0)$ и продуктов реакции $I_{prod,eq}(T_0)$

$$Q_p = I_{prod,eq}(T_0) - I_{init,eq}(T_0) = 2I_{\text{NO}_2}(T_0) - [2I_{\text{NO}}(T_0) + I_{\text{O}_2}(T_0)],$$

где Q_p – тепловой эффект реакции при $p = \text{const}$.

Или удельный тепловой эффект реакции на 1 кг NO

$$q_p = 0,5Q_p M_{\text{NO}}^{-1}.$$

Для стандартной температуры $T_0' = 293,15 \text{ K}$ (20°C), или $T_0'' = 298,15 \text{ K}$ (25°C), значения полной энтальпии компонент представлены в табл. 1, согласно данным [23].

Таблица 1

Энтальпия компонент реакции (1) при стандартной температуре T_0

Enthalpy of the reaction components (1) at standard temperature T_0

Компонента	$T_0' = 20^\circ \text{C} = 293,15 \text{ K}$		$T_0'' = 25^\circ \text{C} = 298,15 \text{ K}$	
	I_T , кал/моль	I_T , кДж/моль	I_T , кал/моль	I_T , кДж/моль
NO	21600	90,3744	21636	90,5250
O ₂	0	0	35	0,1464
NO ₂	8009	33,5096	8058	33,7146

Сопоставляя полные энтальпии I_T для NO и NO_2 (табл. 1), можно увидеть, что $I_T(\text{NO}) > I_T(\text{NO}_2)$. Это указывает на экзотермический характер реакции (1) и ее сдвиг влево – в сторону исходных реагентов ($2\text{NO} + \text{O}_2$) при повышении температуры. Таким образом, $[\text{NO}]/[\text{NO}_2]$ увеличивается с ростом температуры реакции.

Каждая из реакций доокисления (1) и (5) сопровождается уменьшением объема системы вследствие сокращения числа молей продуктов реакции по сравнению с исходными реагентами: $n_{\text{react}} < n_{\text{init}}$.

При сжатии реакционной смеси равновесие смещается вправо, в сторону продуктов реакции – NO_2 в реакции (1) и CO_2 в реакции (5) соответственно, ибо этот процесс приводит к уменьшению давления и, следовательно, противодействует внешнему давлению. Действительно, при $T = \text{const}$ в закрытом сосуде ($V = \text{const}$) продукты каждой из реакций (в (1) – NO_2 , в (5) – CO_2) создают меньшее давление $p \sim n_{\text{react}}$, чем создавали исходные компоненты [24].

В рассматриваемом случае реакция (1) относится к процессу горения, который протекает в изобарных условиях: давления исходных компонент и продуктов реакции равны между собой. При этом увеличение внешнего давления в соответствии с принципом Ле-Шателье также должно вызвать изменение хода реакции в сторону понижения давления в системе. Поскольку при $T = \text{const}$ смещение равновесия в сторону NO_2 (1) и CO_2 (5) приведет к понижению числа молей $n_{\text{react}} = n_{\text{NO}_2}$ или $n_{\text{react}} = n_{\text{CO}_2}$, то давление в системе уменьшается: $p \sim n_{\text{react}}/V$.

Анализ результатов расчета состава продуктов сгорания природного газа, имеющих одинаковый исходный состав, при разных давлениях процесса подтверждает, что с увеличением давления p наблюдается понижение D_{CO} и рост D_{CO_2} [19].

Таким образом, в соответствии с принципом Ле-Шателье увеличение давления процесса p должно приводить к сдвигу реакции в сторону конечных продуктов как в случае изохорического ($V = \text{const}$), так и изобарического ($p = \text{const}$) процессов.

Важнейшим вопросом при анализе возможности появления NO_2 при сжигании в плитах, о чем указывалось в [13], является рассмотрение равновесия системы $\text{NO}-\text{O}_2-\text{NO}_2$. Константа равновесия реакции (1) в зависимости от температуры может быть численно определена с использованием констант реакций атомизации молекулярных соединений: NO , O_2 , NO_2 ((7d), (7c), (7e)), задействованных в брутто-реакции (1) образования NO_2 . Функциональная зависимость связывает константу равновесия K_p с энергетической характеристикой Q_p реакции.

Численный анализ образования оксидов азота NO и NO_2

Зависимость K_p от температуры T для реакции доокисления NO в NO_2 (1) позволяет сделать вывод о смещении равновесия реакции образования NO_2 в сторону низких температур. С учетом сопутствующего снижения скорости реакции можно в первом приближении предположить, что вероятность появления NO_2 повышается в застойных низкотемпературных областях движения реагирующей смеси, где увеличивается время пребывания молей реагирующих компонент.

В результате проведенного расчета тепловой эффект реакции (1) $Q_p = -113,7296$ кДж, $q_p = -1,8954$ кДж/кг, т. е. реакция окисления NO в NO_2 является экзотермической, а $Q_p < 0$. В соответствии с уравнением максимальной работы Гиббса – Гельмгольца и законом Вант-Гоффа [19]

$$\frac{d \ln K_p}{dT} = \frac{Q_p}{RT^2}. \quad (8)$$

Из (8) можно получить зависимость изменения самой константы равновесия с температурой

$$\frac{d \ln K_p}{dT} = \frac{d \ln K_p}{dK_p} \frac{dK_p}{dT} = K_p^{-1} \frac{dK_p}{dT}. \quad (9)$$

Действительно, расчеты подтверждают смещение реакции образования NO_2 в сторону низких температур (рис. 3).

Тогда для экзотермической реакции:

$$\frac{d \ln K_p}{dT} < 0; \quad \frac{dK_p}{dT} < 0, \quad (10)$$

поскольку знак этих производных совпадает со знаком Q_p .

При использовании уравнения Вант-Гоффа из зависимости (9)

$$\frac{dK_p}{dT} = \frac{K_p Q_p}{RT^2}. \quad (11)$$

Из (11) следует, что изменение константы равновесия с температурой (производная K_p по температуре) сохраняет знак теплоты реакции, так как в правой части (11) остальные сомножители, кроме Q_p , положительные: $K_p > 0$; $R > 0$; $T > 0$. Тогда $dK_p/dT < 0$, если реакция экзотермическая ($Q_p < 0$), и $dK_p/dT > 0$, если реакция эндотермическая ($Q_p > 0$).

Действительно, сравнение зависимостей (8) и (11) для реакции доокисления NO в NO_2 (1) подтверждает справедливость неравенства $dK_p/dT < 0$, поскольку K_p уменьшается с ростом температуры реакции T_{react} и производная по температуре от функции $K_p(T)$ – величина отрицательная (сдвигается постепенно в сторону исходных компонент по мере повышения температуры) (рис. 3). На рис. 3 $T_{\text{react}} = T_t(\lambda)$, где T_t – теоретическая температура горения.

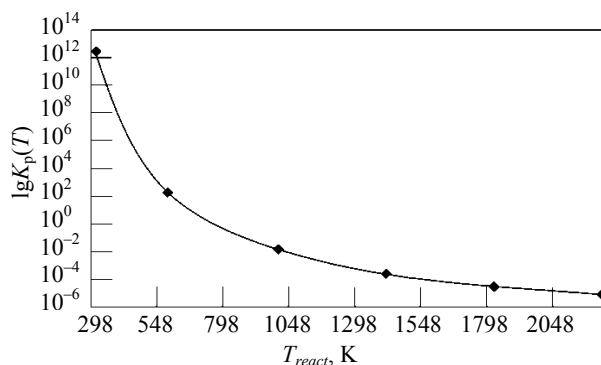
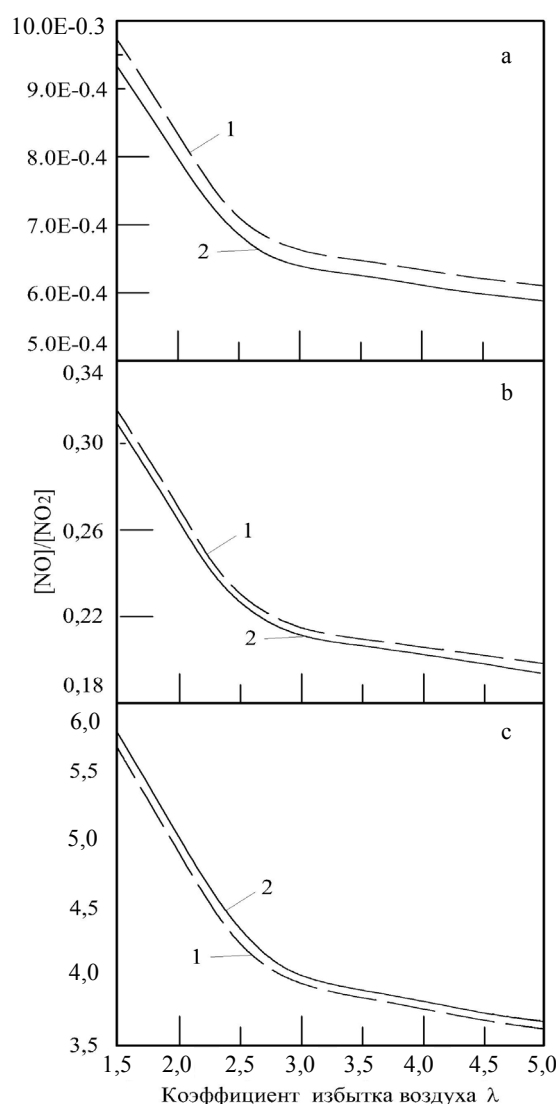


Рис. 3. Зависимость константы K_p равновесия реакции (1) от температуры реакции $T_{\text{react}} = T_t(\lambda)$

Fig. 3. Dependence of the equilibrium constant K_p for reaction (1) on the reaction temperature $T_{\text{react}} = T_t(\lambda)$



концентрации $[NO]$, $[NO_2]$ определены с использованием:
 1 – расчетной константы равновесия реакции (1) по формуле (4);
 2 – состава равновесных продуктов сгорания (программный продукт FUEL)

Fig. 4. Dependence of the $[NO]/[NO_2]$ in accordance with reaction (1) on λ in combustion of methane-air mixture by different temperature of the combustion products of methane with air T_{react} , K: a – 400; b – 600; c – 800;
 the concentrations of $[NO]$, $[NO_2]$ are determined by using:
 1 – calculated values equilibrium constant of the reaction (1) according to formula (4);
 2 – composition of equilibrium combustion products (software product FUEL)

На рис. 4 демонстрируется отношение равновесных концентраций реакции $[NO]/[NO_2]$ в зависимости от коэффициента избытка воздуха для различных температур T_{react} . Данные представлены на рис. 4 двумя способами:

1) с использованием выражения (4) для реакции (1), где константа равновесия K_p реакции рассчитывается через константы реакции атомизации компонент NO , NO_2 , O_2 , а доля O_2 определяется для реакции горения метановоздушных пламен при коэффициенте избытка λ ;

2) по равновесным концентрациям $[NO]$, $[NO_2]$, рассчитанным для теоретических температур горения метановоздушных смесей с коэффициентом избытка λ .

Рис. 4. Зависимость $[NO]/[NO_2]$ в соответствии с реакцией (1) от λ при горении метановоздушной смеси для температуры продуктов сгорания метана с воздухом T_{react} , K: а – 400; б – 600; в – 800;

Несмотря на рост относительной концентрации $[NO_2]$ по отношению к $[NO]$ при низких температурах (600 и 400 K) и даже на превышение $[NO_2]$ по сравнению с $[NO]$, абсолютные значения равновесных концентраций $[NO_2]$ настолько незначительны ($1,30E-05$ при температуре 2000 K, $2,38E-07$ при 800 K соответственно ($\lambda = 1,0$ для метановоздушной смеси)),

что не могут представлять реальную угрозу здоровью людей. Однако в проведенных экспериментах найдены существенно более значительные концентрации этого компонента, что указывает на их сверхравновесный выход в реальных огневых условиях и роль кинетических факторов.

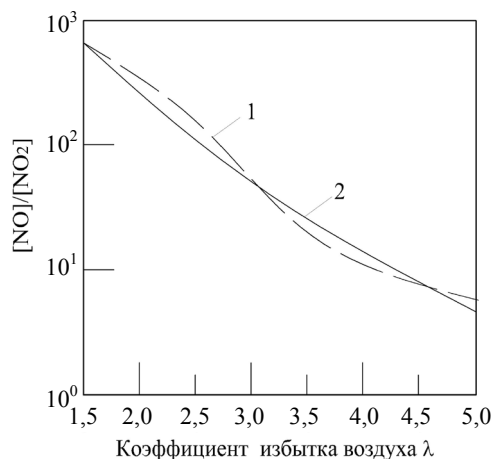
Зависимость отношения концентраций $[\text{NO}]/[\text{NO}_2]$ от коэффициента избытка воздуха λ для теоретических температур горения $T_r(\lambda)$ приведена на рис. 5.

Рис. 5. Зависимость $[\text{NO}]/[\text{NO}_2]$ от λ для теоретических температур горения $T_r(\lambda)$:

1, 2 – то же, что на рис. 4

Fig. 5. Dependence of the $[\text{NO}]/[\text{NO}_2]$ on λ for theoretical combustion temperatures $T_r(\lambda)$:

1, 2 – the same as in Fig. 4



ВЫВОДЫ

1. В Украине используется до 13 млн бытовых газовых плит, вредные выбросы которых влияют на санитарно-гигиеническое состояние и загрязнение воздуха в жилых помещениях, тем самым негативно воздействуя на здоровье основной части населения страны.

2. В Институте газа НАН Украины проводятся систематические расчетно-теоретические и экспериментальные исследования образования токсичных выбросов при сжигании углеводородного топлива (природного и сжиженного газов) в атмосферных горелках газовых плит. В качестве основных загрязнителей воздуха при оценке экологической чистоты продуктов сгорания рассматриваются оксиды углерода CO и азота NO и NO₂.

3. В Национальной лаборатории имени Лоуренса (США) установлено, что при сжигании природного газа в горелках бытовых плит, в отличие от систем сжигания большинства промышленных и силовых энергетических агрегатов, напрямую образуется особо токсичный компонент – диоксид азота NO₂. Этот вывод подтвержден и настоящими исследованиями. Имея в виду возможность непосредственного контакта человека с продуктами сгорания при работе газовых плит и сопутствующие угрозы для здоровья, в исследованиях авторов статьи особое внимание обращено на условия образования и концентрации диоксида азота в пламени и вне его.

4. По результатам термодинамического анализа сопоставлено относительное содержание оксидов азота NO и NO₂ в равновесных смесях продуктов реакции. При анализе составов равновесных продуктов сгорания

смесей природного газа с воздухом, проведенного путем оценки хода реакции $2\text{NO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}_2$, установлено, что сдвиг равновесия в сторону NO_2 имеет место при низких температурах продуктов сгорания (до 800 К).

5. Важнейшая социальная задача данного исследования – пересмотр отношения к экологическим аспектам сжигания газового топлива в кухонных плитах, поскольку это касается широких масс населения стран, использующих газ в быту.

Обозначения

D_X – объемная (молярная) доля компонента X ;
 I_X – полная энтальпия компонента;
 M_X – молекулярная масса компонента X ;
 n – число молей;
 $[\text{O}_2]$ – локальная концентрация O_2 в продуктах сгорания;
 p – давление реагирующей системы, суммарное давление компонента при протекании реакции;
 R – универсальная газовая постоянная;
 T – температура;
 V – объем реагирующей смеси.

Индексы

eq – для равновесного состава продуктов реакции;
init – для исходных компонентов реагирующей смеси;
м.р – максимальная разовая;
prod – для продуктов реакции;
react – для компонентов реакций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пупырев, Е. И. Комплексная модернизация объектов жизнеобеспечения современного мегаполиса / под ред. А. Н. Мирного. М.: Академия коммун. хоз-ва им. К. Д. Памфилова, 2013. 343 с.
2. Осипов, С. Н. О некоторых особенностях энергоснабжения жилых зданий в отопительный период / С. Н. Осипов, В. М. Пилипенко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 1. С. 77–96. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-77-96>.
3. Сорока, Б. С. Сучасний стан та напрями удосконалення пальників побутових газових плит. Частина 1. Науково-технологічні засади ефективного використання палива та екологічно чистого спалювання газу в кухонних плитах / Б. С. Сорока, В. В. Горупа // Енерготехнології та ресурсосбереження. 2017. № 3. С. 3–19.
4. Енергетичний баланс України. Архів [Electronic resource]. Access mode: <http://www.ukrstat.gov.ua/>.
5. Gas Engineers Handbook. Fuel Gas Engineering Practices. Chapter 12. Gas Burner Design / First Edition, Second Printing. Section 12, Chapter 12. N.Y.: The Industrial Press, 1966. P. 12/193–12/194.
6. Варнатц, Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл. Пер. с англ. Г. Л. Агафонова; под ред. П. А. Власова. М.: Физматлит, 2003. 352 с.
7. Gas Engineers Handbook. Fuel Gas Engineering Practices. Chapter 13. Industrial Combustion Systems / First Edition, Second Printing. Section 12, Chapter 13. N.Y.: The Industrial Press, 1966. P. 12/211–12/239.

8. Плити газові побутові. Загальні технічні умови: ДСТУ 2204–93. Київ: Держстандарт України, 1994. 46 с.
9. Плити газові побутові. Частина 1-1. Вимоги щодо безпеки. Загальні положення: ДСТУ EN 30-1-1:2015. (EN 30-1-1:2008+A3:2013, IDT). Київ: Держстандарт України, 2015.
10. Плиты газовые бытовые. Общие технические условия: ГОСТ Р 50696–94. Введен РФ 01.01.1995. М.: Госстандарт, 1994. 55 с.
11. Domestic Gas Cooking Appliances: GB 16410. Issued Date 21 June 2007. The General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, the Standardization Administration of the People's Republic of China, 2008. 51 p.
12. Domestic Cooking Appliances Burning Gas. Part 1-1: Safety General [Electronic resource]: EVS-EN 30-1-1:2008+A3:2013. Mode of access: <https://www.evs.ec/en/evs-en-30-1-1-2008+a3-2013>.
13. Wende, N. Cooking Up Indoor Air Pollution Emissions from Natural Gas Stoves. *Environmental Health Perspectives*, 122 (1). [Electronic resource] / N. Wende. Access mode: <https://ehp.niehs.nih.gov/wp-content/uploads/122/1/ehp.122-A27.pdf>.
14. Сигал, И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива / И. Я. Сигал. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Недра, 1988. 312 с.
15. Сигал, И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива / И. Я. Сигал. Л.: Недра, 1977. 294 с.
16. Ярмольчик, Ю. П. Механизмы образования и методика расчета выбросов загрязняющих веществ при сжигании природного газа в зависимости от эмиссионного класса горелок / Ю. П. Ярмольчик // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 6. С. 565–582. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-565-582>.
17. Письменная, У. Е. Обеспечение устойчивого развития энергетических систем: переход от стоимости к ценности / У. Е. Письменная, Г. С. Трипольская // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 1. С. 14–29. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-14-29>.
18. Шевченко, О. Г. Забруднення атмосферного повітря міста Києва двоокисом азоту / О. Г. Шевченко, С. І. Сніжко, Н. О. Данілова // *Український гідрометеорологічний журнал*. 2015. № 16. С. 6–16. Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Uggj_2015_16_3.
19. Продукты сгорания природного газа при высоких температурах. Состав и термодинамические свойства / И. Н. Карп [и др.]. Киев: Техніка, 1967. 382 с.
20. Пригожин, И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди; пер. с англ. Ю. А. Данилова и В. В. Белого. М.: Мир, 2002. 461 с.
21. Физический энциклопедический словарь // Гл. редактор А. М. Прохоров. М.: Советская энцикл., 1984. 944 с.
22. Soroka, B. S. The Fuel Certification by Heat Engineering Characteristics / B. S. Soroka, A. I. Bershadskiy // *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2014. № 2. С. 3–13.
23. Таблицы термодинамических свойств / В. П. Глушко [и др.]. М.: Изд-во «Наука», 1978. 327 с.
24. Справочник по элементарной химии / Под ред. А. Т. Пилипенко. Киев: Наукова думка, 1985. 560 с.

Поступила 14.11.2019 Подписана в печать 17.02.2020 Опубликовано онлайн 30.07.2020

REFERENCES

1. Pupyrev E. I. (2013) *Comprehensive Modernization of Life Support Facilities in a Modern Metropolis*. Moscow, Academy of Public Utilities named after K. D. Pamfilov. 343. (in Russian).
2. Osipov S. N., Pilipenko V. M. (2017) Some Features of the Power Supply of Residential Buildings During the Heating Season. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (1), 77–96 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-77-96>.
3. Soroka B. S., Gorupa V. V. (2017) Current State and Directions of Improvement of Burners for Household Gas Stoves. Part 1. Scientific and Technological Bases of Efficient Use of Fuel

- and Environmentally Friendly Gas Combustion in Kitchen Stoves. *Energotehnologii i Resursosberezhenie* [Energy Technologies and Resource Conservation], (3), 3–19 (in Ukrainian).
4. Energy Balance of Ukraine. Available at: http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2012/ener/en_bal/arh_2012.htm (in Ukrainian).
 5. *Gas Engineers Handbook. Fuel Gas Engineering Practices. Chapter 12. Gas Burner Design*. N.Y., The Industrial Press, 1966, 12/193–12/194.
 6. Warnatz Yu., Maas W., Dibble R. (2001) *Combustion. Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*. Springer, Berlin, Heidelberg. 299. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04508-4>.
 7. *Gas Engineers Handbook. Fuel Gas Engineering Practices. Chapter 13. Industrial Combustion Systems*. N.Y., The Industrial Press, 1966, 12/211–12/239.
 8. State Standard of the Ukraine 2204–93. *Gas Household Stoves. General Technical Conditions*. Kiev, Derzhstandart Ukraini Publ, 1994. 46 (in Ukrainian).
 9. State Standard of the Ukraine EN 30-1-1:2015. (EN 30-1-1:2008+A3:2013, IDT). *Gas Household Stoves. Part 1-1. Safety Requirement*. Kiev, Derzhstandart Ukraini Publ. (in Ukrainian).
 10. State Standard of Russia P 50696–94. *Gas Household Stoves. General Technical Conditions*. Moscow, Gosstandart Publ., 1994. 55 (in Russian).
 11. GB 16410. *Domestic Gas Cooking Appliances*. The General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, the Standardization Administration of the People's Republic of China, 2008. 51.
 12. EVS-EN 30-1-1:2008+A3: 2013. *Domestic Cooking Appliances Burning Gas. Part 1-1: Safety General*. Available at: <https://www.evs.ee/en/evs-en-30-1-1-2008+a3-2013>.
 13. Wende N. (2014) Cooking Up Indoor Air Pollution: Emissions from Natural Gas Stoves. *Environmental Health Perspectives*, 122 (1). Available at: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.122-A27>.
 14. Segal I. Ya. (1988) *Protection of the Air Basin during Fuel Burning*. 2nd ed. Leningrad, Nedra Publ. 312 (in Russian).
 15. Segal I. Ya. (1977) *Protection of the Air Basin during Fuel Burning*. Leningrad, Nedra Publ. 294 (in Russian).
 16. Yarmolchick Yu. P. (2019) Formation Mechanisms and Methods for Calculating Pollutant Emissions from Natural Gas Combustion Depending on the Burner Emission Class. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Association*, 62 (6), 565–582 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-565-582>.
 17. Pysmenna U. Ye., Trypolska G. S. (2020) Maintaining the Sustainable Energy Systems: Turning from Cost to Value. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Association*, 63 (1), 14–29 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-14-29>.
 18. Shevchenko O. G., Snezhko S. I., Danilova N. O. (2015) Air Pollution by Nitrogen Dioxide in Kiev City. *Ukrains'kii Hidrometeorologichnii Zhurnal = Ukrainian Hydrometeorological Journal*, (16), 6–16 (in Ukrainian).
 19. Karp I. N., Soroka B. S., Dashevskii L. N., Semernina D. (1967) *Natural Gas Combustion Products at High Temperatures. Composition and Thermodynamic Properties*. Kiev, Tekhnika Publ. 382 (in Russian).
 20. Prigogine I., Kondepudi D. (2014) *Modern Thermodynamics. From Heat Engines to Dissipative Structures*. John Wiley & Sons, Ltd. 523. <https://doi.org/10.1002/9781118698723>.
 21. Prokhorov A. M. (ed.) (1984) *Physical Encyclopaedic Dictionary*. Moscow, Sovetskaya Entsiklopediya Publ. 944 (in Russian).
 22. Soroka B. S., Bershadskyi A. I. (2014) The Fuel Certification by Heat Engineering Characteristics. *Energotehnologii i Resursosberezhenie* [Energy Technologies and Resource Conservation], (2), 3–13.
 23. Glushko V. P. et al. (1978) *Thermodynamic Properties of Individual Substances. Vol. 4. Book 2. Tables of Thermodynamic Properties*. Moscow, Nauka Publ. 327 (in Russian).
 24. Pilipenko A. T. (1985) *Handbook of Elementary Chemistry*. Kiev, Naukova Dumka Publ. 560 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-355-364>

УДК 697.97

Энергетическая эффективность малого биореактора в различных климатических зонах*

В. Г. Исаков¹⁾, А. А. Абрамова¹⁾, М. Ю. Дягелев¹⁾

¹⁾Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
(Ижевск, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Предложенная модель оценки теплового баланса и энергоэффективности биореактора позволяет определить для реактора малого размера, работающего на относительно низкоэнергетическом субстрате, величину критического объема, при котором в данных климатических условиях возможна круглогодичная, полностью автономная работа метантенка, и оценить вероятную энергетическую эффективность подобного биореактора (выход товарной теплоты). Для численной характеристики климатической зоны предлагается использовать среднегодовую температуру и/или распространенный в строительной теплотехнике показатель градусо-суток отопительного периода (ГСОП), более полно характеризующего неравномерность среднемесячного распределения температур (степень континентальности климата). Величина критического объема биореактора, при котором возможна круглогодичная автономная работа метантенка на осадке городских сточных вод, изменяется от 7,5 (Владикавказ, ГСОП = 3410) до 17,0 м³ (Томск, ГСОП = 6938), т. е. увеличивается практически пропорционально значению градусо-суток отопительного периода. Следует отметить, что при использовании субстрата с большим выходом биогаза, например свиного навоза (выход 40 г/кг), величина критического объема во всех случаях менее 1 м³. Такие результаты актуальны только для относительно низкоэнергетического сырья. Характер изменения выхода товарной теплоты в зависимости от объема биореактора и климатических условий вполне ожидаем – количество полезно используемой в интересах бизнеса теплоты тем выше, чем больше объем реактора и мягче климат. Однако при объеме реактора менее 5 м³ нелинейность графиков намного выше. Поэтому для проектировщиков особо малых биореакторов проведение подобных расчетов обязательно. Полученные численные значения могут быть полезны как для проектировщика биореакторов, так и для заказчика проекта при оценке экономической эффективности планируемых нововведений.

Ключевые слова: биогазовая установка, метантенк, тепловой баланс, климатические условия, режим сбраживания, анализ факторов, субстрат, осадок очистных сооружений

Для цитирования: Исаков, В. Г. Энергетическая эффективность малого биореактора в различных климатических зонах / В. Г. Исаков, А. А. Абрамова, М. Ю. Дягелев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 4. С. 355–364. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-355-364>

Адрес для переписки

Исаков Виталий Германович
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова
ул. Студенческая, 7,
426069, г. Ижевск, Российская Федерация
Тел.: 8 3412 77-60-55
vodosnab@istu.ru

Address for correspondence

Isakov Vitaliy G.
Kalashnikov Izhevsk
State Technical University
7, Studencheskaya str.,
426069, Izhevsk, Russian Federation
Tel.: 8 3412 77-60-55
vodosnab@istu.ru

* Статья написана в рамках гранта для ученых ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, шифр № 08.04.01/18ИВГ (приказ от 29.12.2018 № 1494 «О грантовой поддержке приоритетных исследований ученых ИжГТУ имени М. Т. Калашникова»).

Energy Efficiency of a Small Bioreactor in Various Climatic Zones

V. G. Isakov¹⁾, A. A. Abramova¹⁾, M. Yu. Dyagelev¹⁾

¹⁾Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation)

Abstract. The authors proposed a model for estimating the heat balance and energy efficiency of a bioreactor that makes possible for a small-sized reactor operating on a relatively low-energy substrate to determine the critical volume, under which the existing climatic conditions allow year-round fully autonomous operation of the digester, as well as for evaluation the potential energy efficiency of such a bioreactor (output commodity heat). For the numerical characteristics of the climatic zone, it is proposed to use the average annual temperature and/or the “degree-day of the heating period” (DDHP) indicator common in construction heat engineering; the DDHP value more adequately characterizing the unevenness of the average monthly temperature distribution, i.e. degree of climate continentality. At the same time, the value of the critical volume of the bioreactor, at which year-round autonomous operation of the digester operating on the municipal sewage sludge, is possible, varies from 7.5 (Vladikavkaz, DDHP = 3410) to 17.0 m³ (Tomsk, DDHP = 6938), i. e. increases almost in proportion to the degree-day of the heating period. It should be noted that when using a substrate with a high biogas yield, e. g., pig manure (a biogas yield of 40 g/kg is adopted), the critical volume in all cases is less than 1 m³. Such results are relevant only for relatively low-energy raw materials. The nature of changes in the output of commodity heat, depending on the volume of the bioreactor and climatic conditions, is quite expectable, viz. the amount of heat that is useful for business interests is higher, the higher is the reactor volume and the milder is the climate. However, when the reactor volume is less than 5 m³, the non-linearity of the graphs is much higher, i. e. for a designer of especially small bioreactors, it seems mandatory to carry out such calculations. The obtained numerical values can be useful both for the designer of bioreactors and for the customer of the project when evaluating the economic efficiency of the planned new innovations.

Keywords: biogas plant, digester, heat balance, climatic conditions, fermentation mode, analysis of factors, substrate, sewage treatment plant sediment

For citation: Isakov V. G., Abramova A. A., Dyagelev M. Yu. (2020) Energy Efficiency of a Small Bioreactor in Various Climatic Zones. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (4), 355–364. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-355-364> (in Russian)

Введение

В России имеется значительное число малых очистных сооружений и предприятий (например, животноводческих), в результате деятельности которых образуются органические отходы, эффективная переработка которых не производится. Из-за масштаба использования это приводит к ряду неблагоприятных экологических последствий: неконтролируемому выбросу в атмосферу метана (парникового газа) и вредных продуктов сгорания; сбросу в окружающую среду загрязненных вод и твердых отходов; выводу из оборота плодородных почв и лесных участков, используемых для размещения отходов, и т. д. Одним из экономически оправданных способов использования органических отходов является их переработка в энергоресурсы и оптимизация процесса вторичного энергопотребления [1, 2]. В ряде случаев возможна переработка отходов путем метанового сбраживания в биореакторе, при этом одновременно решается проблема получения дополнительной тепловой и электрической энергии, а при условии эффективного обеззараживания биомассы – получения высококачественных удобрений.

Однако если энергетическая эффективность работы крупных биореакторов, работающих на сырье с высоким выходом газа (птичий помет, навоз

крупного рогатого скота (КРС), свиной, овечий навоз) [3], не вызывает сомнений, то при использовании малого реактора с относительно низкоэффективным субстратом, например с осадком сточных вод очистных сооружений канализации (сырье, доступное всюду, где есть городские или локальные очистные сооружения малых сельскохозяйственных или пищевых предприятий), возможна проблема недостаточности количества выделяющегося биогаза для компенсации теплотерь в окружающую среду и на нагрев и обеззараживание субстрата только за счет собственной теплоты сгорания образовавшегося метана. То есть не обеспечивается круглогодичный, полностью автономный режим работы (рис. 1) [4, 5].

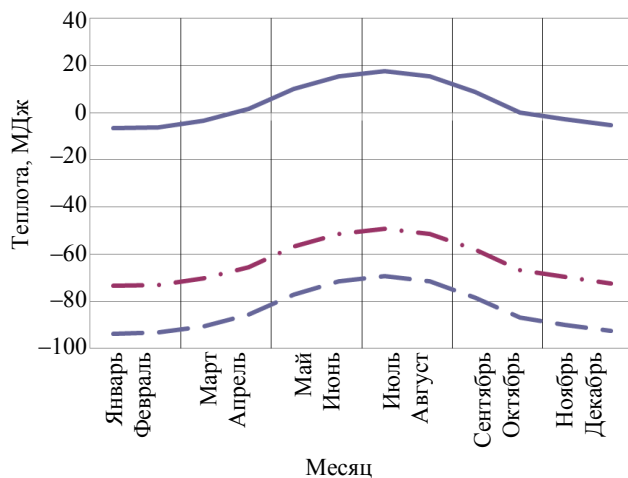


Рис. 1. Тепловой баланс биореактора объемом 5 м³, работающего на осадке сточных вод при наземной установке метантенка (Ижевск): — — — — теплотери; — · — — — тепловой баланс; — — — — товарная теплота

Fig. 1. Daily heat balance of the bioreactor of the volume of 5 m³ operating on sewage sludge when there is a ground installation of the digester (Izhevsk): — — — — heat loss; — · — — — heat balance; — — — — commodity heat

Для биореактора малого размера, работающего в условиях сурового климата, эти проблемы усугубляются:

- неблагоприятным соотношением «поверхность (определяющая теплотери) – объем» (определяет внутреннее тепловыделение и объем биогаза);
- необходимостью мощной теплоизоляции биореактора для уменьшения потерь теплоты;
- повышенными затратами энергии на обеспечение рабочей температуры сбраживания субстрата и компенсацию тепловых потерь;
- необходимостью хранения сырья при положительных температурах для обеспечения возможности насосной подачи в технологическую линию.

В [4] предложена модель оценки теплового баланса биореактора в условиях сурового климата, учитывающая режим сбраживания (мезофильный или термофильный), форму, размеры (емкость) и конструктивное исполнение биореактора (полностью наземное или полуподземное, характеристики теплоизоляции), тип сырья, внутреннее тепловыделение, теплотворную способность биогаза и др. Результаты компьютерной реализации

данной модели и проведенного предварительного численного исследования показали, что круглогодичная работа биогазовой установки в полностью автономном режиме в условиях сурового климата возможна только при объеме метантенка более некоторого критического объема, определяемого как климатическими условиями, так и видом используемого субстрата, конструкцией установки и теплоизоляции. При объеме менее критического автономная работа биореактора возможна лишь в теплое время года. Суммарный годовой выход товарного биогаза¹ практически не зависит от конструкции реактора (наземный или полузаглубленный), что объясняется перераспределением тепловых потерь по временам года при постоянном режиме работы метантенка. Доказано, что мезофильный режим брожения (25–38 °С, оптимум 37 °С) более рационален в суровых климатических условиях (Удмуртская Республика), если ориентирован на получение биогаза как основного продукта сбраживания и его энергетическое использование. При этом при термическом сопротивлении теплоизоляции реактора $R_0 < 1 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С}/\text{Вт}$ добиться полностью автономной круглогодичной работы рассматриваемой биогазовой установки в условиях Удмуртии практически невозможно для реакторов малых и средних объемов, работающих на сырье с низким выходом биогаза.

Цель исследований – уточнение критического размера биореактора для переработки осадка сточных вод, оценка энергетических возможностей метантенков всевозможных размеров (по теплоте сжигания товарного биогаза) в различных температурных и климатических зонах; определение взаимосвязи энергетических характеристик биореактора и степени континентальности климата.

Расчетная схема

Расчет производили для биогазовой установки, изображенной на рис. 2 [6]. Исходный субстрат (осадок сточных вод, навоз крупного рогатого скота, птичий помет и т. д.) разбавляется водой для достижения 86–92 % влажности (обычное соотношение навоза и воды – от 1:3 до 2:1, т. е. количество загружаемого сырья – это сумма отходов и воды, которой они разбавляются), смешивается и измельчается до получения полужидкой однородной массы в приемнике. Далее масса нагревается до 70 °С в течение не менее 1 ч с целью уничтожения бактерий (предполагается, что нагрев будет проводиться за счет тепловой или электрической энергии от вырабатываемого биогаза, например с помощью электронагревателя, тепловых насосов на линии охлаждения субстрата 2–4 и в бункере, подачей горячей воды на разбавление от котла и т. д.). После охлаждения сырье из данной емкости с помощью насоса перекачивается в биореактор (ферментатор), где подогревается теплообменником до температуры анаэробного брожения в зависимости от режима сбраживания. Процесс получения биогаза длится обычно около месяца. Для интенсификации брожения добавляются катализаторы (глюкоза и целлюлоза). Биогаз под собственным давлением через газовый штуцер и конденсатор для удаления влаги идет в газгольдер, отку-

¹ Под товарным биогазом понимается количество биогаза, полученного при полной автономности биогазовой установки (часть теплоты сгорания метана расходуется на собственные нужды установки).

да подается либо для сжигания в отопительных приборах, либо для производства электрической и тепловой энергии в когенерационной энергоустановке. Твердый остаток накапливается в бункере-отстойнике и является хорошим обеззараженным удобрением (содержание азота – 3,5 кг/т, фосфора – 0,8 кг/т, калия – 1,4 кг/т). При оптимальном режиме сбраживания этот остаток не превышает 30 % от массы исходного сырья.

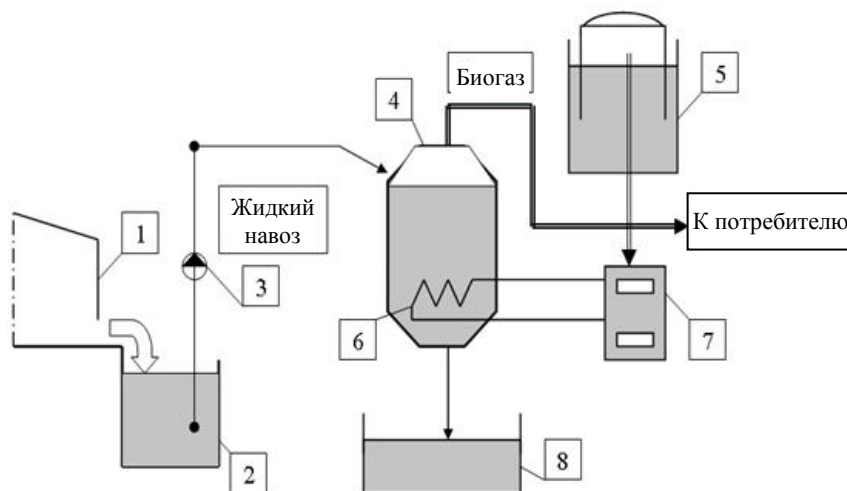


Рис. 2. Принципиальная схема биогазовой установки для переработки жидкого субстрата [6]:

- 1 – животноводческое помещение или бункер для хранения сырья;
2 – приемник субстрата; 3 – насос; 4 – биореактор-метантенк; 5 – газгольдер;
6 – теплообменник; 7 – котел; 8 – бункер-отстойник

Fig. 2. The basic scheme of a biogas plant for processing a liquid substrate [6]:

- 1 – stock building a hopper for storing raw materials; 2 – substrate receiver; 3 – pump;
4 – bioreactor-digester; 5 – gas holder; 6 – heat exchanger; 7 – boiler; 8 – settling tank

Полностью автономный энергонезависимый биореактор средней вместимости потребляет 10–25 % вырабатываемого газа для своих нужд (осуществления термостатирования и перемешивания субстрата). Применение такой схемы для дегельминтизации при мезофильном режиме энергетически более выгодно по сравнению с дающим аналогичный эффект термофильным режимом сбраживания (45–60 °С, оптимум 56 °С) при условии эффективной рекуперации теплоты нагрева в приемнике и ее возврата в биореактор-метантенк (рис. 2). Ориентировка процесса не только на выход товарного биогаза, но и на возможность сельскохозяйственного использования отработанного субстрата в виде экологически безопасного удобрения делает предлагаемую конструктивную схему биореактора наиболее привлекательной для малого бизнеса.

Биореактор работает по проточной схеме при непрерывном или квазинепрерывном процессе – субстрат загружают в реактор ежесуточно (как правило, для малых предприятий в количестве, равном суточному количеству вырабатываемых органических отходов, с учетом воды на разбавление), удаляя соответствующий объем шлама. Общий объем субстрата всегда постоянен и определяется в соответствии с заданным временем пребывания массы в реакторе (для мезофильного режима сбраживания время

оборота реактора составляет от 10 до 20 сут.). Такой вид производства позволяет получить максимальный выход газа при непрерывном процессе газообразования.

Подробное описание работы установки и реализации используемой математической модели приводилось в [4]. Отличительная особенность нового расчета – ориентировка на биореакторы объемом 2–20 м³, предназначенные для использования на малых и локальных очистных сооружениях.

Результаты уточненного расчета по рассматриваемой модели представлены на рис. 3–6. Климатические характеристики соответствовали пяти температурным зонам (табл. 1). Степень континентальности климата оценивалась как по распределению среднемесячных и среднегодовых температур, так и по показателю ГСОП, обычно используемому для оценки величины необходимой теплоизоляции здания:

$$\text{ГСОП} = (t_{\text{в}} - t_{\text{от}})z_{\text{от}},$$

где $t_{\text{от}}$ – средняя температура наружного воздуха в отопительный период, °С; $z_{\text{от}}$ – продолжительность отопительного периода, сут. [7]; $t_{\text{в}}$ – расчетная температура внутреннего воздуха, °С [8].

Таблица 1

Климатические характеристики городов России [8]
Climatic characteristics of Russian cities [8]

Город	Среднегодовая температура, °С	$t_{\text{в}}$, °С	$t_{\text{от}}$, °С	$z_{\text{от}}$, сут./год	ГСОП, °С·сут.
Владикавказ	8,1	20	0,4	174	3410
Ижевск	2,3	21	–5,6	222	5905
Москва	4,1	20	–3,1	214	4943
Казань	3,1	21	–5,2	215	5633
Томск	–0,5	21	–8,4	236	6938

Температура хранения субстрата при температуре наружного воздуха ниже нуля принималась равной 2 °С, предполагая накопление и хранение субстрата в неотапливаемом помещении, обогреваемом за счет теплоты брожения субстрата (реализуемо для малых предприятий при небольшом суточном количестве образующегося субстрата). При температуре наружного воздуха выше нуля температура хранения субстрата принималась равной температуре наружного воздуха.

Диапазон варьирования факторов численного эксперимента выбирался согласно выводам из более раннего расчета [4].

Исходные данные для расчета:

- объем V метантенка – 2–20 м³;
- тип конструкции реактора – надземный, термическое сопротивление изоляции биореактора $R_0 = 3,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$;

– тип субстрата (выход биогаза из осадка сточных вод $B_{уд} = 29$ г/кг загружаемого сырья [3], свиного навоза $B_{уд} = 40$ г/кг [9, 10], птичьего помета $B_{уд} = 60$ г/кг [9, 10]);

– режим сбраживания – мезофильный, $t_b = 38$ °С.

Теплотворная способность биогаза для всех случаев принималась одинаковой – 22000 кДж/м³ (средняя из 18860–26400 кДж/м³ [10]), поскольку содержание метана в биогазе для выбранных субстратов отличается сравнительно мало (60–65 %); тепловой эффект реакции брожения субстрата в реакторе – 10560 Дж/кг газа [11, 12]; коэффициент рекуперации тепла $k_r = 0,95$ (5 % тепловых потерь на линии 2–3–4 и потерь на перемешивание субстрата в биореакторе (рис. 2); коэффициент использования объема реактора $k_{ио} = 0,8$ [11].

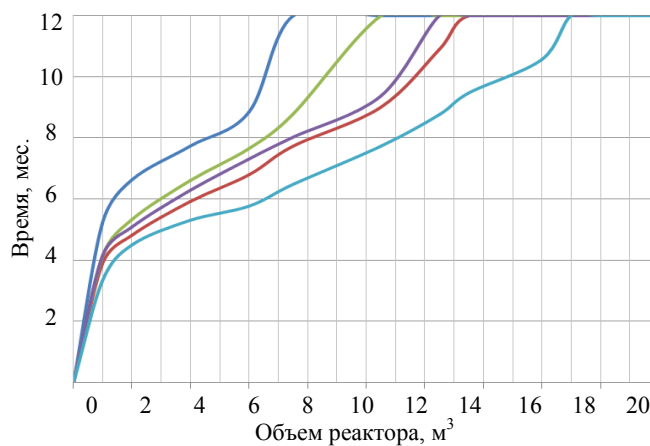


Рис. 3. Прогнозируемое время полностью автономной работы малогабаритного биореактора в разных температурных зонах: — Владикавказ; — Ижевск; — Москва; — Казань; — Томск

Fig. 3. The predicted time for fully autonomous operation of a compact bioreactor in different temperature zones: — Vladikavkaz; — Izhevsk; — Moscow; — Kazan; — Tomsk

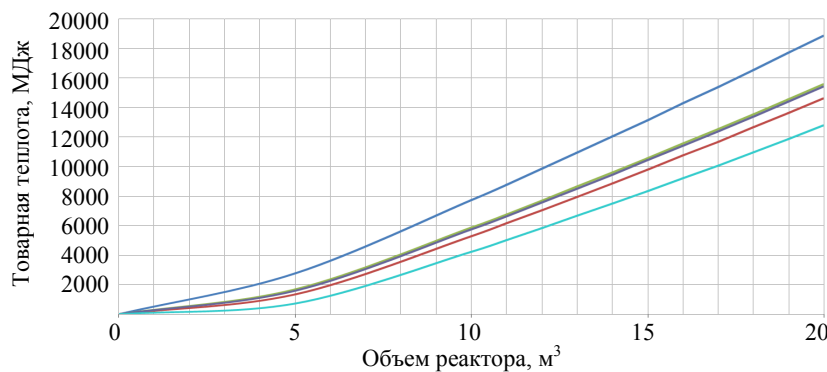


Рис. 4. Зависимость товарной теплоты от объема реактора в разных температурных зонах: — Владикавказ; — Ижевск; — Москва; — Казань; — Томск

Fig. 4. Dependence of product heat on the reactor volume in different temperature zones: — Vladikavkaz; — Izhevsk; — Moscow; — Kazan; — Tomsk

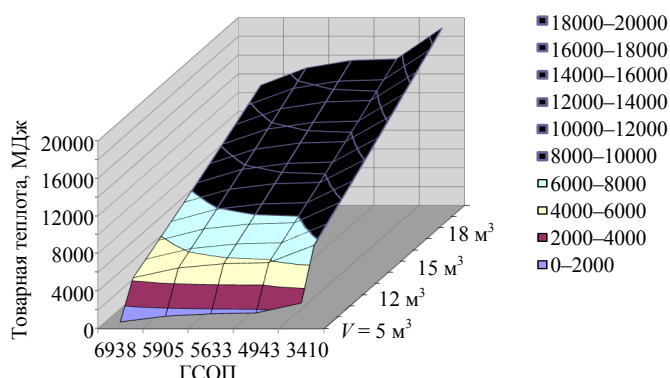


Рис. 5. Влияние степени континентальности климата на выход товарной теплоты при изменении объема биореактора

Fig. 5. The influence of the degree of continental climate on the output of commodity heat when the volume of the bioreactor changes

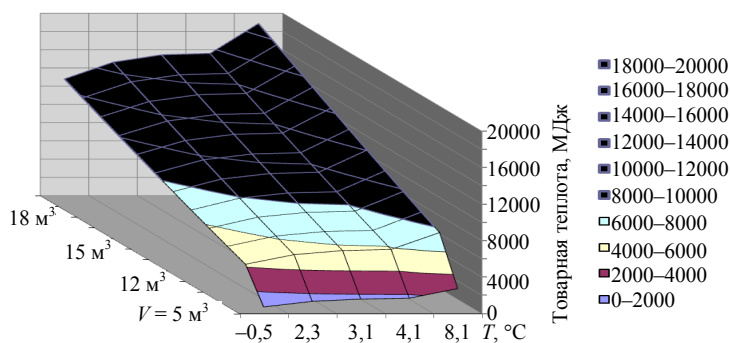


Рис. 6. Влияние среднегодовой температуры на выход товарной теплоты при изменении объема биореактора

Fig. 6. The effect of the average annual temperature on the output of the commodity heat when the volume of the bioreactor changes

Анализ результатов

Из рис. 3–6 видно, что возможная продолжительность работы биогазовой установки в полностью автономном режиме определяется как объемом биореактора, так и климатическими условиями местности. При этом величина критического объема биореактора, при котором возможна круглогодичная автономная работа метантенка на осадке городских сточных вод, изменяется от 7,5 (Владикавказ, ГСОП = 3410) до 17,0 м³ (Томск, ГСОП = 6938), т. е. увеличивается практически пропорционально величине градусо-суток отопительного периода. Результаты получены при коэффициенте рекуперации теплоты 0,95. При снижении эффективности рекуперации выводы будут менее оптимистичными (например, при $k_r = 0,75$ величина критического объема биореактора 17,5 (Владикавказ, ГСОП = 3410) и 38,3 м³ (Томск, ГСОП = 6938)). Следует отметить, что при использовании субстрата с большим выходом биогаза, например свиного навоза (выход биогаза 40 г/кг), величина критического объема во всех случаях менее 1,0 м³, т. е. полученные результаты актуальны только для относительно низкоэнергетического сырья.

Количество полезно используемой теплоты тем больше, чем больше объем реактора и мягче климат. Однако при объеме реактора менее 5 м³ нелинейность графиков намного выше, т. е. для проектировщика особо малых биореакторов проведение подобных расчетов обязательно.

Для прогнозирования выхода товарной теплоты в зависимости от температурно-климатических характеристик местности в качестве численной характеристики климатической зоны можно использовать как среднегодовую температуру, так и распространенный в практике строительной теплотехники показатель ГСОП.

ВЫВОДЫ

1. Предложенная в [4] модель оценки теплового баланса и энергоэффективности биореактора позволяет для реактора малого размера, работающего на относительно низкоэнергетическом субстрате, определить как величину критического объема, при котором в данных климатических условиях возможна круглогодичная, полностью автономная работа метантенка, так и оценить возможную энергетическую эффективность биореактора (выход товарной теплоты).

2. Полученные в расчете численные значения могут быть полезны и для проектировщика биореакторов, и для заказчика проекта при оценке экономической эффективности планируемых нововведений.

3. Для численной характеристики климатической зоны предлагается использовать среднегодовую температуру и/или распространенный в строительной теплотехнике показатель градусо-суток отопительного периода (ГСОП). При этом величина ГСОП более полно характеризует неравномерность среднемесячного распределения температур, т. е. степень континентальности климата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хрусталева, Б. М. Твердое топливо из углеводородсодержащих, древесных и сельскохозяйственных отходов для локальных систем теплоснабжения / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60. № 2. С. 147–158. DOI:10.21122/1029-7448-2017-60-2-147-158.
2. Осипов, С. Н. Повышение эффективности получения тепловой энергии из бытовых стоков / С. Н. Осипов, А. В. Захаренко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 482–498. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-482-498>.
3. Тыршу, М. Комплексная биоэнергетическая установка / М. Тыршу, Н. Константинов, М. Узун // Проблемы региональной энергетики. 2008. № 3. С. 78–85.
4. Тепловой баланс и энергоэффективность биореактора в условиях сурового климата / В. Г. Исаков [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. Т. 16, № 4. С. 154–162.
5. Кононова, Е. А. Математическое моделирование процесса перемешивания субстрата при анаэробном сбраживании в биореакторе / Е. А. Кононова, М. В. Свалова, А. М. Непогодин // Интеллектуальные системы в производстве. 2015. Т. 25, № 1. С. 15–18.
6. Возможность внедрения на птицефабрике инновационной технологии получения энергии и тепла. Биогазовая установка [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://studbooks.net/1233496/agropromyshlennost/biogazovaya_ustanovka. Дата доступа: 14.09.2018.
7. Тепловая защита зданий: СНиП 23-02-2003. Введ. в действие 01.10.2003. М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004. 31 с.

8. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* (с Изменениями № 1, 2): СП 131.13330.2012. Введ. в действие 01.01.2013. М.: Минстрой, 2015. 124 с.
9. Северилов, П. Биогаз для чайников [Электронный ресурс] / П. Северилов // ООО «Стройкомфортсервис 2000». Режим доступа: http://www.betontrans.ru/construction/biogas_1.htm. Дата доступа: 12.10.2018.
10. Производство биогаза из отходов лесной и перерабатывающей промышленности [Электронный ресурс] / Министерство экономического развития Кировской области. Режим доступа: <https://invest.kirovreg.ru/investments/innovatsionnaya-politika/innovatsionnye-proekty/proizvodstvo-biogaza.php?special=Y>. Дата доступа: 20.09.2018.
11. Баадер, В. Биогаз: теория и практика / В. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер; пер. с нем. и предисловие М. И. Серебряного. М.: Колос, 1982. 148 с.
12. Игнатов, Д. В. Математическое моделирование периодического процесса анаэробного сбраживания субстратов: на примере спиртового брожения / Д. В. Игнатов. Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2002. 22 с.

Поступила 03.05.2019 Подписана в печать 08.10.2019 Опубликовано онлайн 30.07.2020

REFERENCES

1. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2017) Solid Fuel of Hydrocarbon, Wood and Agricultural Waste for Local Heat Supply Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Association*, 60 (2), 147–158 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-2-147-158>.
2. Osipov S. N., Zakharenko A. V. (2019) Improving the Efficiency of Heat Power Generation from Household Drains. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Association*, 62 (5), 482–498 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-482-498>.
3. Tirshu M., Konstantinov N., Uzun M. (2008) Complex Biopower Installation. *Problemy Regional'noi Energetiki = Problems of the Regional Energetics*, (3), 78–85 (in Russian).
4. Isakov V. G., Svalova M. V., Abramova A. A., Nepogodin A. M. (2018) Heat Balance and Energy Efficiency of a Bioreactor in a Harsh Climate. *Intellektual'nye Sistemy v Proizvodstve = Intelligent Systems in Manufacturing*, 16 (4), 154–162 (in Russian).
5. Kononova E. A., Svalova M. V., Nepogodin A. M. Mathematical Modeling of the Process of Mixing the Substrate During Anaerobic Digestion in the Bioreactor. *Intellektual'nye Sistemy v Proizvodstve = Intelligent Systems in Manufacturing*, 25 (1), 15–18 (in Russian).
6. *The Possibility of Introducing at the Poultry Farm an Innovative Technology for Producing Energy and Heat. Biogas Plant*. Available at: https://studbooks.net/1233496/agropromyshlennost/biogazovaya_ustanovka. (Accessed 14.09.2018) (in Russian).
7. SNiP [Building Codes and Regulations] 23-02–2003. *Thermal Protection of Buildings*. Moscow, The State Construction Committee of Russia, 2004. 31 (in Russian).
8. Updated Version of SNiP [Building Codes and Regulations] 23-01–99* (with Changes No 1, 2): SP 131.13330.2012. *Construction Climatology*. Moscow, Ministry of Construction, 2015. 124 (in Russian).
9. Severilov P. *Biogas for Dummies*. Available at: http://www.betontrans.ru/construction/biogas_1.htm. (Accessed 12.10.2018) (in Russian).
10. Production of Biogas from Waste of the Forest and Processing Industry. *Ministry of Economic Development of the Kirov Region*. Available at: <https://invest.kirovreg.ru/investments/innovatsionnaya-politika/innovatsionnye-proekty/proizvodstvo-biogaza.php?special=Y> (Accessed 20.09.2018) (in Russian).
11. Baader W., Dohne E., Brenndorfer M. (1978) *Biogas in Theorie und Praxis* [Biogas: Theory and Practice]. Darmstadt, Kranichstein. (in German).
12. Ignatov D. V. (2002) *Mathematical Modeling of the Periodic Process of Anaerobic Fermenting of Substrates*. Voronezh, Voronezh State Technological Academy. 22 (in Russian).

Received: 3 May 2019

Accepted: 8 October 2019

Published online: 30 July 2020

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-365-379>

УДК 621.165: 533.6

Анализ эффективности вариантов выхлопного отсека паровой турбины

В. Г. Солодов^{1,2)}, В. А. Конев¹⁾

¹⁾Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет (Харьков, Украина),

²⁾Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
(Харьков, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Представлены результаты численного исследования газодинамических и энергетических характеристик выхлопного отсека цилиндра низкого давления, включающего последнюю ступень с рабочей лопаткой длиной 1100 мм и выхлопной тракт, в условиях их взаимовлияния. Разработаны модели вариантов отсека, включающие межступенчатый зазор, отбор пара перед диафрагмой последней ступени, два отсоса пара из межвенцового зазора с камерой влагоудаления, надбандажные протечки, инжекцию пара из камеры влагоудаления в диффузор. Течение в расчетной области описывается полной системой нестационарных уравнений Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу – Фавру. Турбулентные эффекты описаны на основе модели Ментера SST в ступени и модифицированной модели Спаларта – Аллмараса в тракте. Интегрирование системы уравнений осуществлялось с помощью авторского программного комплекса MTFIS[®]. Расчетные подобласти аппроксимировались гексагональными сетками. Использовалась неявная разностная TVD-схема конечных объемов 2-го порядка точности на базе решения задачи Римана. При вычислении применяли вариант алгоритма, основанного на расщеплении вычислительного процесса для многопроцессорных платформ. Модель ступени использует осреднение потоков массы, импульса и энергии в окружном направлении в межступенчатом зазоре. Рассчитывались один канал диафрагмы с предвключенным фрагментом, а также один канал рабочего венца и течение в патрубке. Обмен параметров между ступенью и патрубком осуществлялся на основе осреднения по массовому расходу. Расчеты выполнены на базе табличной модели влажного пара в приближении равновесной конденсации. Рассмотрены направления совершенствования проточной части выхлопного отсека. Выполнено исследование работы вариантов отсека для номинального режима турбины К-220-44-2М АЭС «Ловииса». Проанализирована эффективность понижения крышки сборной камеры, управления потоком с помощью листовых ребер над обечайкой диффузора, расширения сборной камеры в плоскости горизонтального разреза, а также организации выхода избыточного пара из камеры влагоудаления через тангенциальные щели в нижней половине выпуклой оболочки диффузора.

Ключевые слова: цилиндр низкого давления, последняя ступень, выхлопной отсек, численные исследования, влажный пар, расход пара, протечки пара, инжекция, коэффициенты потерь

Для цитирования: Солодов, В. Г. Анализ эффективности вариантов выхлопного отсека паровой турбины / В. Г. Солодов, В. А. Конев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 4. С. 365–379. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-365-379>

Адрес для переписки
Солодов Валерий Григорьевич
Харьковский национальный
автомобильно-дорожный университет
ул. Ярослава Мудрого, 25,
61002, г. Харьков, Украина
Тел.: +38 0577 07-37-30
solodov.v@gmail.com

Address for correspondence
Solodov Valerii G.
Kharkiv National Automobile
and Highway University
25, Yaroslava Mudrogo str.,
61002, Kharkov, Ukraine
Tel.: +38 0577 07-37-30
solodov.v@gmail.com

Analysis of the Effectiveness of Variants of the Exhaust Compartment of a Steam Turbine

V. G. Solodov^{1,2}, V. A. Konev¹

¹Kharkiv National Automobile and Highway University (Kharkiv, Ukraine),

²National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (Kharkiv, Ukraine)

Abstract. The results of a numerical study of the gas-dynamic and power characteristics of the exhaust compartment of low-pressure cylinder, including the last stage with a blade of 1100 mm length and the exhaust path, in terms of their interaction are presented. Numerical models of exhaust compartment variants, including steam extraction in front of last stage diaphragm, two steam suction from the interring gap with a dehumidification chamber, above-band leakages, steam injection from the dehumidification chamber into the diffuser channel have been developed. The flow in each computational subdomain is described by the complete system of non-stationary Reynolds – Favre equations averaged by Navier – Stokes. Turbulent effects are described with the SST Menter model in the stage, and with the modified Spalart – Allmaras turbulence model in the path. The integration of system of equations was carried out using an author's software package. The calculated subdomains were approximated by hexagonal grids. The solver used an implicit difference TVD-scheme of finite volumes of the 2nd order of accuracy based on the solution of the Riemann problem. A variant of the algorithm based on splitting the computational process for multi-processor platforms was used in the calculation. The model of stage used an averaging the mass, momentum and energy fluxes in the circumferential direction in the interstage gap. One channel of the diaphragm with a pre-connected fragment, as well as one channel of the working ring and the flow in the branch pipe were calculated. Parameters were exchanged between the stage and the branch pipe on the basis of mass flow averaging. The calculations were based on a table model of wet steam in the approximation of equilibrium condensation. The variants of improvement of the flow part of the exhaust compartment were considered. A study of the operation of the compartment options for the nominal mode of the K-220-44-2M turbine of the Loviisa nuclear power plant was performed. The effectiveness of lowering the cap of the collecting chamber, controlling the flow using sheet ribs above the diffuser shell, expanding the collecting chamber in the plane of the horizontal connector, and ensuring the release of excess steam from the moisture removal chamber through the tangential slots in the lower half of the convex shell of the diffuser were analyzed.

Keywords: low-pressure cylinder, last stage, exhaust compartment, numerical study, wet steam, steam consumption, steam leakage, injections, loss coefficients

For citation: Solodov V. G., Konev V. A. (2020) Analysis of the Effectiveness of Variants of the Exhaust Compartment of a Steam Turbine. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (4), 365–379. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-365-379> (in Russian)

Введение

Совершенствование энергетической паровой турбины в значительной мере предопределяет разработку эффективного и надежного цилиндра низкого давления (ЦНД), центральное место в котором занимает выхлопной отсек, включающий последнюю ступень и выхлопной тракт в составе выхлопного и переходного патрубков. В мощных паровых турбинах ТЭС и особенно АЭС потери с выходной скоростью составляют значительную величину от располагаемого теплоперепада [1–3], поэтому совершенствование газодинамических и энергетических характеристик выхлопного тракта может обеспечить заметное повышение КПД турбоагрегата.

Выхлопной тракт определяет вибрационную надежность рабочих лопаток (РЛ) последней ступени, поэтому вопросы газодинамической отработки выхлопных трактов постоянно находятся в центре внимания проектирующих организаций [1–3]. Вместе с тем экспериментальные исследования

ступеней, патрубков и выхлопных отсеков, проведенные отечественными и зарубежными специалистами, не дают систематизированного материала для анализа работы выхлопных отсеков. Поэтому в исследованиях важную роль играет численное моделирование течения.

Авторами проведено численное исследование газодинамических и энергетических характеристик выхлопного отсека ЦНД, включающего последнюю ступень с РЛ длиной 1100 мм и выхлопной тракт, в условиях их взаимодействия. Разработаны модели вариантов выхлопного отсека, включающего межступенчатый канал, отбор пара перед диафрагмой последней ступени, два отсоса пара из межвенцового зазора в камеру влагоудаления, надбандажные протечки, инъекцию пара из камеры влагоудаления в канал диффузора. Рассмотрены возможные направления совершенствования формообразования проточной части выхлопного отсека ЦНД.

Характеристика объекта исследования

Конструкция отсека перспективного ЦНД с последней ступенью, имеющей РЛ длиной 1100 мм, выполнена с традиционным подвальным расположением конденсатора. Особенности такой ступени являются обратная закрутка сопловых лопаток с уменьшением угла выхода потока из сопловых каналов от корня к периферии, цельнофрезерованный полочный бандаж, одна промежуточная демпферная связь и развитая система влагоудаления. Последняя ступень соединялась с горловиной конденсатора выхлопным трактом, состоящим из выхлопного и переходного патрубков.

Выхлопной патрубок (ВП) состоял из осерадиального диффузора и сборной камеры с элементами силовой системы. Выхлопной патрубок имеет встроенный опорный подшипник, поэтому прочность сборной камеры обеспечивается элементами силовой системы, в которой в качестве основной принята стержневая система жесткости.

Обтекаемая поверхность козырька диффузора выполнена профилированной и является первой частью обечайки диффузора выхлопного патрубка. Со второй частью обечайки она сочленяется через замкнутую вихревую камеру. Камера служит для размещения коллектора с форсунками для охлаждения пара на холостом ходу. Между торцом обода диафрагмы и полкой козырька образуются два канала удаления влаги из межвенцового зазора ступени. Исходный диффузор выполнен с радиальностью $\bar{D}_{2д} = D_{2д}/D_{у.к} = 1,296$ и степенью расширения $n_d = F_{2д}/F_1 = 2,256$, т. е. $n_d > n_n$. Здесь $D_{у.к}$ – внутренний диаметр уплотнительного кольца (козырька); $D_{2д}$ – выходной диаметр диффузора; n_d, n_n – коэффициент диффузорности диффузора и патрубка; $F_1, F_{2д}$ – площадь входа и выхода диффузора. Согласно [1, 4, 5], степень расширения осерадиального диффузора в системе ВП должна составлять 0,7–0,8 n_n или менее. Эффективность перерасширенного диффузора подтверждена исследованиями, проведенными в Московском энергетическом институте на модели ВП [6, 7].

Переходной патрубок выполнен с большим градиентом увеличения поперечного размера, что связано с его ограниченной длиной. Размеры выхлопного тракта: осевая длина осерадиального диффузора $\bar{L}_д = L_д / D_{у.к} = 0,53$, где $L_д$ – расстояние от выходной кромки рабочей лопатки на периферии до

задней стенки сборной камеры патрубка; $D_{y.k}$ – внутренний диаметр уплотнительного кольца (козырька).

Длина сборной камеры ВП $\bar{L}_{ВП} = L_{ВП} / D_{y.k} = 0,58$, ширина – $\bar{B}_{ВП} = B_{ВП} / D_{y.k} = 2,13$, где $L_{ВП}$, $B_{ВП}$ – длина и ширина сборной камеры. Степень расширения ВП с такими размерами $n_{ВП} = F_{2ВП} / F_1 = 2,0$ ($n_{ВП}$, $F_{2ВП}$ – коэффициент диффузорности выхлопного патрубка и площадь его выхода). По данным [4], в исходном варианте выхлопного патрубка значения $\bar{L}_{ВП}$, $n_{ВП}$ приняты минимальными.

Схема потоков пара на фрагменте проточной части выхлопного отсека показана на рис. 1.

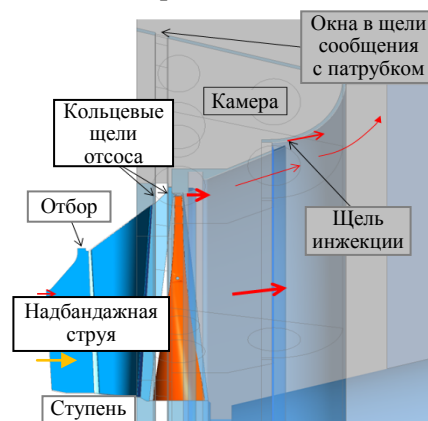


Рис. 1. Схема фрагмента проточной части выхлопного отсека

Fig. 1. The scheme of a flow path fragment of the exhaust compartment

Описание численного метода и алгоритма расчета

Течение в каждой расчетной подобласти описывается полной системой нестационарных уравнений Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу – Фавру. Система дополняется дифференциальными уравнениями модели турбулентности. Интегрирование системы уравнений Навье – Стокса и ассоциированных формул осуществляется с помощью программного комплекса MTFS[®] [8], который описан и тестирован в [9].

Расчетные подобласти аппроксимируются неструктурированными гексагональными сетками (рис. 2).

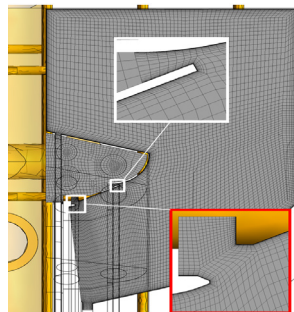


Рис. 2. Сеточное разбиение пространства выхлопного тракта

Fig. 2. The meshing of the space of the exhaust path

В расчетах применяли неявную разностную TVD-схему конечных объемов 2-го порядка точности на основе решения задачи Римана на гранях

элементарных объемов [10]. Использовали вариант алгоритма [9] с расщеплением вычислительного процесса для многопроцессорных платформ. Для постановки условий на границах применяли каналовую формулировку, в которой на входной границе задавали распределение полных параметров и направление вектора скорости, на выходных границах – распределения противодавления. Твердые стенки предполагались адиабатическими, на них задавали условие прилипания и равенство нулю эффективной вихревой вязкости. Турбулентные эффекты описаны на основе модели Менгера [9, 11] в ступени и модифицированной дифференциальной модели турбулентности Спаларта – Аллмараса [9, 11] в патрубке.

Трехмерная модель проточной части построена по геометрическим данным на основе CAD-программ твердотельного моделирования. Для сложных областей применен блочно-структурированный метод построения сеток [9]. Мощности сеточного разбиения составляют около $(1,5e + 06)$ гексаэдров в расчетной области канала соплового аппарата и около 2,0 млн гексаэдров в области канала рабочего колеса. Выхлопной и переходной патрубки аппроксимированы сеткой около $(15,5e + 06)$ гексаэдров. Пограничные слои описываются облегающими сетками на основе экспоненциального сгущения ячеек к стенке. Сетки обеспечивают параметр погранслоя: $Y^+ < 2$ – в области ступени; $Y^+ < 4$ – в области патрубка.

Математическая модель ступени [9] основана на осреднении потоков массы, импульса и энергии в окружном направлении в межступенчатом зазоре за время прохождения лопатки ротора вдоль шага решетки статора. При моделировании рассчитывалось течение через один канал диафрагмы с предвключенным фрагментом, соответствующим зазору за предыдущей ступенью, а также через один канал рабочего венца и течение в патрубке. Передача параметров от ступени к патрубку и обратно осуществлялась на основе осреднения по массовому расходу.

Расчеты вариантов выполнялись при задании на входе равномерных в окружном направлении распределений полных параметров давления, температуры, влажности и направления потока по данным теплового расчета ЦНД. На выходе из патрубка задавались: в конденсаторе – давление, в щели отбора – расход. Из периферийной части межвенцового зазора пар выводился в камеру влагоудаления на обечайке диффузора. Из камеры часть пара инжестировалась через кольцевую щель на обечайке диффузора, а другая часть сбрасывалась в сборную камеру патрубка. В процессе расчета баланс расходов выдерживался в пределах 0,1 % от суммарного входного расхода, кроме случаев неустранимой нестационарности, вызываемой отрывными явлениями (выхлоп переходного патрубка).

Все расчеты выполнены на основе модели влажного пара. Использовано приближение равновесной конденсации без учета возможного переохлаждения, движения капель, жидких пленок.

Методика обработки данных расчетных исследований

Методика обработки данных численного эксперимента для получения интегральных параметров в характерных сечениях ступени изложена в [9, 12] и опирается на переменные во времени поля давления, плотности,

температуры, степени влажности, энтальпии, энтропии и трех компонент вектора скорости в абсолютной либо вращающейся системе отсчета, ассоциированные с центрами расчетных ячеек. Временная составляющая полей в процессе расчета усредняется на представительном интервале времени, на котором средние значения не изменяются.

В результате для каждого выбранного поперечного сечения получается набор осредненных по расходу газодинамических параметров, распределенных вдоль радиальной координаты в соответствии с координатами слоев равного массового расхода. Далее по осредненным в сечении значениям газодинамических параметров получали распределения вдоль радиуса значений полной энтальпии, энтропии в центрах слоев равного расхода. Для канала статора в качестве расчетных выбирались сечения, соответствующие входной и выходной (интерфейсной) границам канала.

Располагаемый перепад на ступени вычисляли по формуле

$$E_0 = H_{0c}^* + H_{0p} = h_0^* - h_{2t},$$

где H_{0c}^* , H_{0p} – располагаемый перепад на сопле и рабочем венце; t – теоретическое значение параметра; 0, 2 – сечения входа, интерфейса и выхода ступени; (*) – для параметров торможения; h_0^* , h_{2t} – энтальпия пара на входе и выходе ступени.

Располагаемые перепады на сопле и рабочем венце принимаются соответственно:

$$H_{0c}^* = h_0^* - h_{1t}; \quad H_{0p} = h_{1p} - h_{2pt}.$$

Относительные потери располагаемого перепада на сопле и на РК по отношению к перепаду на ступень соответственно:

$$\zeta_c^{ст} = \Delta H_c / E_0 = (h_1 - h_{1t}) / E_0; \quad \zeta_p^{ст} = \Delta H_p / E_0 = (h_2 - h_{2pt}) / E_0.$$

Величины энтальпий h_{1t} , h_{2t} берутся из таблиц водяного пара по расчетным значениям давления и температуры в сечениях; h_1 , h_2 – из расчета.

Реакция ступени и потеря с выходной скоростью C_2 вычисляются по формулам:

$$\rho = H_{0p} / E_0; \quad \zeta_{в.с} = 0,5 C_2^2 / E_0.$$

Для канала ротора в качестве расчетных выбираются сечения, соответствующие входной и выходной границам канала во вращающейся системе отсчета. Сечение за кромкой рабочей лопатки расположено на расстоянии около 10 мм и охватывает всю длину лопатки и область надбандажного зазора до козырька.

Эффективность системы выхлопного и переходного патрубков определялась по полным и внутренним потерям согласно формулам [1]:

$$\zeta_{вп} = (P_n^* - P_k) / q_{вх}; \quad \zeta_{вн} = (P_n^* - P_k^*) / q_{вх},$$

где $q_{вх}$ – скоростной напор на входе в патрубок; индексы «н», «к» – начальное и конечное сечения патрубка.

Коэффициент окружной неравномерности поля статического давления p на входе в диффузор определялся на основании среднерасходных значений статического давления

$$\Omega_p = (p_{\max} - p_{\min}) / q_{\text{вх}}.$$

Коэффициент неравномерности поля скорости $\vec{u}$ по выходной площади ВП вычислялся на основании среднерасходных значений расходной компоненты скорости [1]

$$\Omega_u = (u_{\max} - u_{\min}) / u_{\text{ср}}.$$

Постановка задачи моделирования

Расчеты течения влажного пара в вариантах выхлопного отсека в составе последней ступени и выхлопного тракта выполнены при задании на входе идентичных радиальных распределений значений давления и температуры торможения, влажности и направления вектора скорости. Течение рассчитывалось на основе входных условий за РЛ предвключенной ступени с учетом надбандажной протечки из уплотнения предвключенной ступени. Также реализован заданный отбор пара на периферии входной области в диафрагму ступени. Струя надбандажной протечки на выходе из надбандажной щели предпоследней ступени задавалась закрученной под углом 50° к оси турбины в направлении вращения при влажности 4 %. Полная температура струи надбандажной протечки из предвключенной ступени составляла $T_0 = 333$ К при расходе 0,56 кг/с. В выходном сечении переходного патрубка задавалась средняя величина статического давления согласно тепловым расчетам.

За сопловой лопаткой в межвенцовом зазоре реализованы два кольцевых отсоса влажоемкого пара и влаги в камеру влагоудаления на обечайке диффузора и последующий отвод одной части в канал диффузора через щель инжекции. Другая часть пара отводилась через специальные окна (или щели) в стенке камеры влагоудаления непосредственно в сборную камеру выхлопного патрубка. Модель рабочей лопатки реализована с надбандажной щелью и проволоочной связью. Надбандажная щель, бандаж рабочего венца, утолщение рабочей лопатки и проволоочная связь моделировались в полном объеме, как в [13].

Расчетные модели содержали осерадиальный диффузор с периферийной и корневой камерами на входе, реализованный с кольцевой щелью для инжекции пара из камеры влагоудаления. Диффузор располагался в сборной камере патрубка. Над диффузором были открыты окна для сброса части влажного пара в пространство сборной камеры, которая стеснена выемкой для доступа к подшипнику вала и содержит разделительные ребра в плоскости симметрии патрубка. Выхлопной патрубок соединен с переходным патрубком, имеющим загромождения в виде горизонтальной стержневой системы и поперечной системы труб.

В проводимых исследованиях рассчитывались варианты выхлопного отсека для номинального режима турбины К-220-44-2М АЭС «Ло-

вииса» (четырёхступенчатый отсек) при пропуске массового расхода около 52,5 кг/с и давлении в конденсаторе $p_{\text{конд}} = 2942$ Па [14].

Вариант L4 построен на основе варианта L4/2_2, детально описанного в [14]. При этом высота крышки L4 от плоскости разъема уменьшена до 3600 мм, относительная высота крышки снижена с 1,98 до 1,74.

Вариант L4_В сформирован из исходного варианта L4 путем установки двух изогнутых листовых ребер ортогонально к передней стенке патрубка в двух симметричных секторах верхней половины ВП с осевым размером 990 мм, равным осевой длине обечайки диффузора, для разбивания вихревой структуры в верхней части пространства выхлопного патрубка (рис. 1, 3).

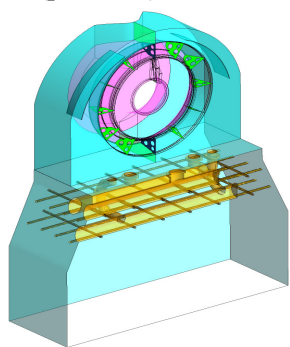


Рис. 3. Модель выхлопного и переходного патрубков (вариант с листовыми ребрами)

Fig. 3. Model of exhaust and transition branch pipes (version equipped with sheet ribs)

Вариант L4_Е получен из L4 в результате расширения сборной камеры в плоскости, перпендикулярной оси турбины. Таким образом, исходная сборная камера L4 расширена в плоскости горизонтального разъема на 1600 мм при неизменных размерах выхлопа ВП.

Вариант L4_М (рис. 4b) получен из исходного варианта диффузора L4 (рис. 4a) в результате устройства в нижней половине сборной камеры диффузора (рис. 4b) с меньшей степенью расширения и большей радиальностью. При этом выход избыточного пара из камеры влагоудаления организован через тангенциальные щели в стенке камеры в нижней половине патрубка с целью инжектирования основного потока для заполнения пространства под камерой влагоудаления [15].

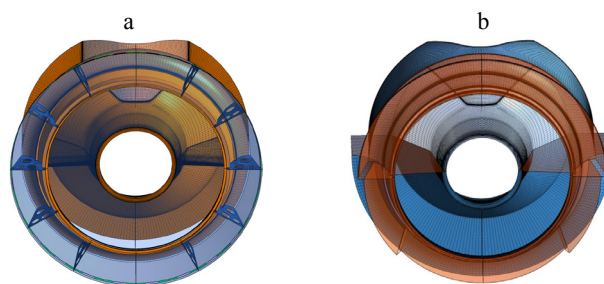


Рис. 4. Варианты диффузора (вид по ходу пара):

a – исходный, камера влагоудаления с отверстиями;
b – асимметричный, камера влагоудаления со щелями в нижней половине

Fig. 4. Variants of a diffuser (view is in the course of the steam):
a – source one, a moisture removal chamber with holes;
a moisture removal chamber with slots in the lower half

Структура течения в моделях выхлопного патрубка в виде изолиний числа Маха M в различных сечениях показана на рис. 5–7. Ось OZ на рис. 5 направлена от передней стенки выхлопного патрубка по потоку от наблюдателя; размер Z отсчитывается от передней стенки ВП.

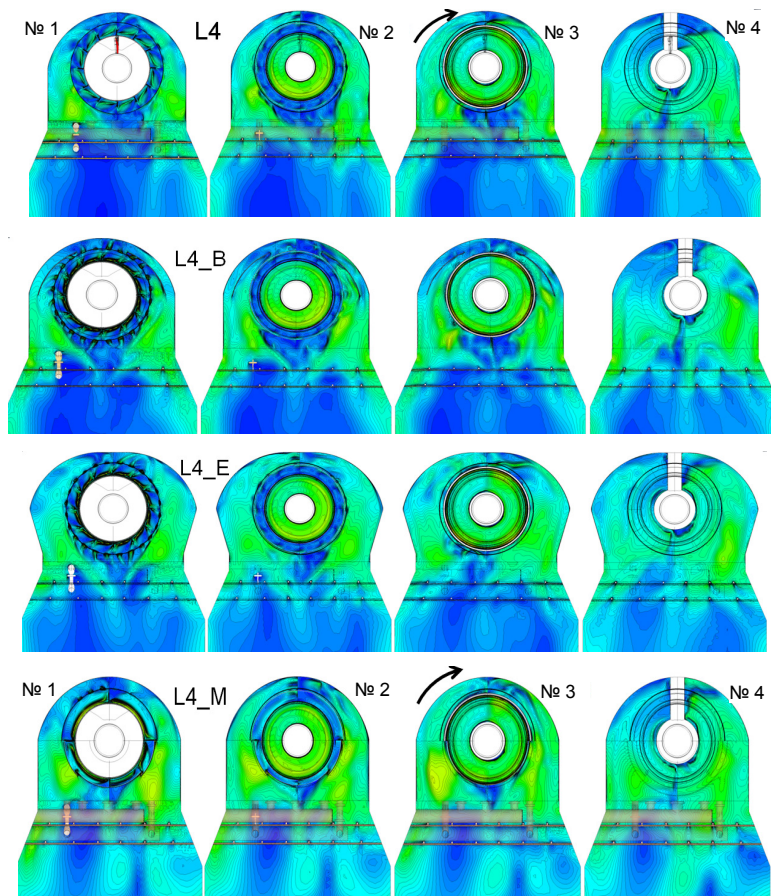


Рис. 5. Структура течения в моделях выходного патрубка в сечениях: № 1 – $Z = 0$; № 2 – 0,3 м; № 3 – 0,78 м; № 4 – 1,4 м (шкала чисел Маха дана на рис. 6)

Fig. 5. Flow pattern in branch pipe models in sections: No 1 – 0; No 2 – 0.3 m; No 3 – 0.78 m; No 4 – 1.4 m (scale of Mach numbers is given in Fig. 6)

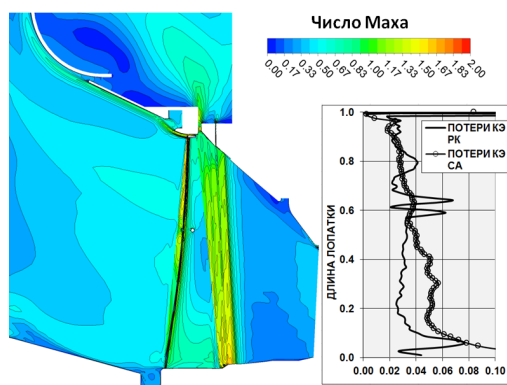


Рис. 6. Потери кинетической энергии вдоль длины лопатки в каналах соплового аппарата и рабочего колеса

Fig. 6. The loss of kinetic energy along the length of the blade in the in the channels of the nozzle and the impeller

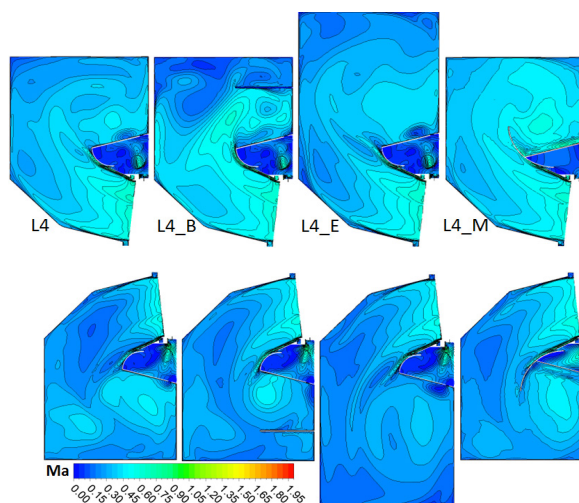


Рис. 7. Числа Маха в сечении горизонтального разъема для вариантов L4, L4_B, L4_E, L4_M (вид сверху)

Fig. 7. Mach numbers in the cross section of the horizontal connector for the variants L4, L4_B, L4_E, L4_M (an overhead view)

Результаты исследования и сравнения различных вариантов выхлопного отсека

Рассмотрим результаты исследований различных вариантов выхлопного отсека ЦНД в сравнении с вариантом L4/2_2 [14].

Перепад на отсек определяется средним полным давлением на входе в ступень около 14100 Па. Потери кинетической энергии, отнесенные к располагаемому перепаду на ступень, в соплах с 4,41–4,5 %, на рабочих каналах 3,52–3,62 %, потери с выходной скоростью 13,2–13,6 % (табл. 1).

Таблица 1

Потери кинетической энергии на ступени
Loss of kinetic energy on the stage

Вариант выхлопного патрубка	Потери, %			КПД
	в сопловом аппарате	в рабочем колесе	с выходной скоростью	
L4	4,50	3,60	13,2	0,9188
L4_B	4,50	3,52	13,2	0,9198
L4_E	4,46	3,57	13,3	0,9197
L4_M	4,41	3,62	13,6	0,9197

КПД ступени варианта L4 составляет 0,9188 против 0,9217 для L4/2_2 [14], что означает некоторое увеличение сопротивления ВП варианта L4. Таким образом, ступень работает в одном режиме для всех вариантов патрубка. Потери кинетической энергии вдоль длины лопатки в каналах соплового аппарата и рабочего колеса показаны на рис. 6. Обращают на себя внимание периферийный рост потерь из-за банджа и протечки, локальный всплеск потерь за лопаточным утолщением и проволоочной связью, а также в прикорневой области вследствие резкого раскрытия проточной части. Потери от проволоочной связи 0,2 % перепада на ступень [13].

Коэффициенты неравномерности статического давления Ω_p в поясах на входе в диффузор приведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты неравномерности статического давления на входе в диффузор**Static pressure nonuniformity coefficients at the inlet of the diffuser**

Пояс рабочей лопатки	Коэффициент Ω_p для варианта			
	L4	L4_B	L4_E	L4_M
80 % L	1,24	1,36	1,04	1,38
50 % L	0,62	0,72	0,51	0,71
20 % L	0,64	0,76	0,57	0,75

Примечание: L – длина рабочей лопатки.

Ступень в отсеке L4 работает на режиме при объемном расходе $GV_2 = 2117 \text{ м}^3/\text{с}$. Степень неравномерности давления в поясах 0,8L, 0,5L, 0,2L на входе в диффузор для L4 (табл. 2) является одной из самых низких для рассмотренных вариантов отсеков. Поток на входе в диффузор на данном режиме более закручен в сравнении с L4/2_2, а угол α_2 составляет около 110° в ядре входного течения.

Осредненные по расходу параметры в сечениях выхлопного тракта (на входе в диффузор, на выходе из выхлопного и переходного патрубков), коэффициент неравномерности на входе в диффузор Ω_p и потери на выхлопном патрубке $\zeta_{\text{ВП}}$ приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры в сечениях выхлопного тракта**Parameters in exhaust path sections**

Вариант	Параметр	Вход в ступень	Межвенцовый зазор	Вход в диффузор	Выход из па трубка		Ω_p	$\zeta_{\text{ВП}}$
					выхлопного	переходного		
L4	p^* , Па	14100	13309	3483	3253	3014	2,31	0,73
	p , Па	12943	5993	2732	2933	2942		
	M	0,365	1,167	0,608	0,402	0,182		
	Y [.]	0,066	0,095	0,116	0,106	0,102		
L4_B	p^* , Па	14100	13077	3435	3284	3026	2,42	0,67
	p , Па	12943	5993	2722	2959	2942		
	M	0,365	1,168	0,61	0,404	0,194		
	Y [.]	0,066	0,095	0,116	0,107	0,102		
L4_E	p^* , Па	14100	13308	3424	3251	3001	2,05	0,62
	p , Па	12943	5993	2666	2953	2939		
	M	0,365	1,170	0,617	0,387	0,170		
	Y [.]	0,066	0,095	0,117	0,107	0,107		
L4_M	p^* , Па	14100	13308	3395	3243	2954	2,16	0,57
	p , Па	12943	5994	2587	2925	2873		
	M	0,365	1,167	0,633	0,406	0,198		
	Y [.]	0,066	0,095	0,117	0,106	0,106		

Примечание: p^* – полное давление; p – статическое давление; M – число Маха; Y – влажность.

Характеристики надбандажной протечки в вариантах не изменяются из-за сверхзвукового режима. На обечайке диффузора струя локально разгоняется, за расширительной камерой прилегает к поверхности козырька, теряя скорость до околосвуковых величин, далее прилегает к конической части обечайки диффузора. Затем струя инжекции подсасывает основной поток, и отрыва от обечайки не происходит. Отрыв незначительной интенсивности наступает в конце обечайки диффузора. Таким образом, для данного режима надбан-

дажная протечка и струя инъекции в совокупности стабилизируют обтекание обечайки диффузора. Этому также способствует и закрутка потока, которая в среднем составляет около 20° от осевого направления. Однако центробежный эффект от закрутки приводит и к негативным явлениям, к которым относятся:

1) отрыв потока в окружном направлении от стенки выемки для доступа к валу в верхней части ВП;

2) неустойчивый отрыв потока от обтекателя диффузора в радиальном направлении, который происходит на изломах втулки.

С увеличением среднего радиуса по ходу потока в диффузоре отрыв интенсифицируется, особенно вблизи второго излома втулки. Перечисленные отрывные образования нестационарны и приводят к пульсации расхода пара через выхлопное сечение патрубка. Диффузор и сборная камера в сравнении с вариантом L4/2_2 более заполнены в нижней части ВП из-за уменьшенной высоты крышки.

В диффузоре и сборной камере поток тормозится до средней скорости по числу Маха 0,402 в выходном сечении ВП. Осредненная расходная составляющая скорости на выходе из ВП составляет 138 м/с. Представление о структуре течения в ВП можно получить по рис. 5 и 7. Структура потока в патрубке несимметрична относительно плоскости геометрической симметрии ВП вследствие не осевого выхода из ступени.

Полные потери для варианта L4 больше на 4–5 %, чем для L4/2_2 (разброс определяется нестационарностью течения в ВП), что связано в основном с уменьшением высоты крышки патрубка на 12,2 %. Следует заметить, что полные потери определяются ориентировочно в связи с проблемой осреднения сильно неравномерных потоков и наличием инъекции высокоэнергетического пара в промежутке между измерительными сечениями.

Варианты L4_B и L4_E характеризуются существенной нестационарностью течения в переходном патрубке. Степень в составе рассматриваемых отсеков имеет незначительно повышенный КПД для L4_B, L4_E, L4_M (табл. 1) и незначительно повышенные потери с выходной скоростью. Осредненный во времени объемный расход в варианте L4_E составляет $2225 \text{ м}^3/\text{с}$, среднее значение влажности за кромками рабочего колеса для вариантов 11,7 %. В диффузоре влажность не более 13,0 %.

Параметры надбандажной протечки вдоль обечайки диффузора сохраняются в сравнении с исходным L4. По основным характеристикам работа ступени в составе рассматриваемых отсеков не отличается от других вариантов.

L4_E характеризуется значительным снижением коэффициентов неравномерности статического давления на входе в диффузор (до 30 %) на всех радиусах (табл. 2) при практически одинаковом в вариантах скоростном напоре на входе в диффузор, что подтверждает тенденцию, отмеченную в [1]. Именно увеличение поперечных размеров сборной камеры приводит к выравниванию полей параметров в ВП, приближает условия работы диффузора к условиям работы свободного диффузора. В этой связи полные потери в выходном сечении выхлопного патрубка в рассматриваемом ряду менее базового L4/2_2 и исходного L4 вариантов.

L4_B характеризуется достаточно высокой неравномерностью на входе в диффузор во всех поясах, вызывает значительную нестационарность течения в сборной камере, предположительно, из-за вихревого характера течения. Вихревая структура размещается под листовым ребром и стесняет пространство сборной камеры. Рассмотренный способ уменьшения потерь не дает положительных результатов в улучшении структуры течения.

Вариант L4_М отсека содержит асимметричный диффузор. В исходном диффузоре L4 открытые окна камеры влагоудаления создают дополнительное сопротивление течению в сборной камере вследствие сброса части высокоэнергетического пара ($\sim 3,5$ кг/с), интенсифицируют отрыв в нижней части патрубка под оболочкой камеры влагоудаления (рис. 5). Отрыв провоцирует периодический сход вихрей в нижней части ВП, увеличивает нестационарность выхлопа и потери давления. L4_М направлен на уменьшение этого эффекта путем замены окон на тангенциальные щели в стенке камеры влагоудаления на обечайке диффузора (рис. 4). В рассматриваемом варианте расход пара на входе в диффузор составляет 49,35 кг/с. Расход инжекции через кольцевую щель в обечайке диффузора (при закрытых окнах) около 2,99 кг/с, расход пара через цилиндрическую поверхность выхода из диффузора примерно 51,14 кг/с, расход пара на выходе из ВП 52,1 кг/с. Разница в расходах (с учетом нестационарности в патрубке) составляет величину расхода от сброса пара через указанные выше щели. Таким образом, в варианте L4_М расход пара в инжекцию увеличивается в сравнении с L4, сброс пара из камеры влагоудаления через тангенциальные щели уменьшается, что соответствует тенденции, отмеченной в [16, 17].

По результатам расчетов для номинального режима КПД варианты ВП в табл. 1 практически не отличаются от L4. Потери с выходной скоростью несколько больше варианта L4 и составляют 13,6 %. Объемный расход пара при массовом расходе за ступенью 49,35 кг/с составляет $2266 \text{ м}^3/\text{с}$ в сравнении с исходным вариантом L4, в котором объемный расход равен $2117 \text{ м}^3/\text{с}$ при массовом расходе за ступенью 49,24 кг/с.

Коэффициенты неравномерности давления на поверхности входа в диффузор для рассматриваемого варианта L4_М больше, чем для L4 (табл. 2), потери полного давления уменьшаются (табл. 3).

Применение варианта L4_М увеличивает наполненность сборной камеры (рис. 5, 7), уменьшает объем и количество безрасходных зон, особенно под камерой влагоудаления вблизи плоскости симметрии конструкции. Нижняя половина сборной камеры работает лучше исходного варианта.

На частичных режимах закрутка пара за рабочим колесом вызывает выраженную диагональную структуру потока, прижатие потока к обечайке диффузора в дополнение к действию струи надбандажной протечки и кольцевой инжекции в канал диффузора вдоль обечайки. В этой связи представляет интерес исследование частичных режимов работы ВП с асимметричным диффузором.

ВЫВОДЫ

1. Представлены результаты исследований формообразующих параметров проточной части выхлопного тракта и аэродинамических воздействий на газодинамические и энергетические характеристики выхлопного отсека. Интегральные газодинамические и энергетические характеристики ступени, структура потока в ступени для рассмотренных вариантов выхлопного патрубка практически совпадают. Уменьшение высоты крышки выхлопного патрубка (вариант L4) на 12 % приводит к перераспределению расходов с увеличением скоростей в нижней половине патрубка. Наблюдаются небольшой рост полных потерь на выходе из выхлопного патрубка на ≈ 5 % и рост коэффициентов неравномерности во входном сечении диффузора во всех поясах на $\approx 3\text{--}10$ %.

2. Увеличение ширины сборной камеры (вариант L4_E) повышает нестационарность течения в ней, снижает неравномерность поля давления на входе в диффузор до 30 % и полные потери на 15 %.

3. Применение выхлопного патрубка с асимметричным диффузором и щелями в стенке нижней половины камеры влагоудаления (L4_M) увеличивает наполненность сборной камеры, уменьшает объем и количество малорасходных зон, особенно под камерой влагоудаления вблизи плоскости симметрии конструкции. Нижняя половина сборной камеры функционирует лучше исходного варианта. Полные потери снижаются на 21,9 %.

4. На основании анализа результатов исследований вариантов L4, L4_B, L4_M можно сделать вывод, что минимальные проходные сечения в патрубке находятся не в плоскости разъема, как принято считать, а ниже на 0,12–0,20 диаметра диффузора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мигай, В. К. Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин / В. К. Мигай, Э. И. Гудков. Л.: Машиностроение, 1981. 272 с.
2. Дейч, М. Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин / М. Е. Дейч, А. Е. Зарянкин. М.: Энергия, 1970. 384 с.
3. Зарянкин, А. Е. Выхлопные патрубки паровых и газовых турбин / А. Е. Зарянкин, Б. П. Симонов. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 273 с.
4. Аэродинамическое профилирование и расчет выхлопных патрубков цилиндров низкого давления паровых турбин: РТМ 108.020.120-77. НПО ЦКТИ, 1979. 40 с.
5. Выхлопная часть осевой турбомшины: авт. св. SU1839520A1, СССР, 1989.
6. Исследование выхлопного патрубка ЦНД паровой турбины / В. Ф. Касилов [и др.] // Теплоэнергетика. 1990. № 5. С. 35–39.
7. Касилов, В. Ф. Исследование средств активного воздействия на закрученное течение в сборной камере выходных патрубков цилиндров низкого давления паровых турбин / В. Ф. Касилов // Теплоэнергетика. 2000. № 11. С. 28–33.
8. Научно-прикладной программный комплекс MTFS® для расчета трехмерных вязких турбулентных течений жидкостей и газов в областях произвольной формы: сертификат гос. регистр. авторских прав № 5921 / В. Г. Солодов, Ю. В. Стародубцев. Укр. гос. агентство по авторским и смежным правам. 07.16.2002.
9. Солодов, В. Г. Опыт трехмерного моделирования сжимаемых вязких турбулентных течений в турбомашинах / В. Г. Солодов, Ю. В. Стародубцев // Аэрогидродинамика: проблемы и перспективы: сб. статей. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т, 2004. С. 134–157.
10. Merkle, C. Convergence Acceleration of the Navier-Stokes Equations Through Time-Derivative Preconditioning / C. Merkle, S. Venkateswaran, M. Deshpande // AGARD-CP578-NATO. 1995. P. 1–10.
11. Солодов, В. Г. Моделирование турбулентных течений. Расчет больших вихрей / В. Г. Солодов. Харьков: Харьк. нац. автодор. ун-т, 2011. 168 с.
12. Аэродинамические характеристики ступеней тепловых турбин / Н. Н. Афанасьева [и др.] Л.: Машиностроение, 1980. 263 с.
13. Исследование аэродинамических и энергетических характеристик выхлопного отсека ЦНД «ступень – диффузор» / В. Л. Швецов [и др.] // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія: «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». 2014. Т. 1055, № 12. С. 12–20.
14. Исследование аэродинамических и энергетических характеристик выхлопного отсека ЦНД / В. Л. Швецов [и др.] // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія: «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». 2015. Т. 1124, № 15. С. 41–50.
15. Выхлопная часть паровой турбины: пат. SU1724903A1 СССР / Ю. Ф. Косяк, В. Н. Галацан, А. В. Гаркуша, Э. И. Гудков, В. А. Конев, В. Н. Сарабун, В. В. Тарасенко, Ю. А. Юдин. Опубл. 07.04.1992.
16. Сабуров, Э. Н. Аэродинамика и устойчивость потока в относительно длинных циклонных камерах / Э. Н. Сабуров, Д. А. Онохин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 6. С. 527–538. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-527-538>.

17. Сорока, Б. С. Эффективность использования газового топлива и окислительной смеси при их увлажнении / Б. С. Сорока, Н. В. Воробьев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 6. С. 547–564. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-547-564>.

Поступила 26.05.2019 Подписана в печать 14.08.2019 Опубликовано онлайн 30.07.2020

REFERENCES

1. Migai V. K., Gudkov E. I. (1981) *Design and Calculation of Output Diffusers of Turbomachines*. Leningrad, Mashinostroenie Publ. 272 (in Russian).
2. Deich M. E., Zariankin A. E. (1970) *Gas Dynamics of Diffusers and Exhaust Hoods of Turbomachines*. Moscow, Energiya Publ. 324 (in Russian).
3. Zariankin A. E., Simonov B. P. (2002) *Exhaust Hoods of Steam and Gas Turbines*. Moscow, MEI Publ. 273 (in Russian).
4. RTM [Guiding Technical Material] 108.020.120–77. *Aerodynamic Profiling and Calculation of Exhaust Hoods of Low-Pressure Cylinders of Steam Turbines*. JSC “NPO CKTI”, 1979. 40 (in Russian).
5. Author’s Certificate SU1839520A1. USSR. (1989) Exhaust Part of Axial Turbomachine (in Russian).
6. Kasilov V. F., Galatsan V. N., Konev V. A., Denisov V. N. (1990) The Study of LPC Exhaust Hood of Steam Turbine. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, (5), 35–39 (in Russian).
7. Kasilov V. F. (2000) The Study of Means of Active Influence on the Swirled Flow in the Assembly Chamber of the Outlet Hoods of Low Pressure Cylinders of Steam Turbines. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, (11), 28–33 (in Russian).
8. Solodov V., Starodubtsev Yu. (2002) *The Scientific Application Software MTFs® for Calculation of 3D Viscous Turbulent Liquid and Gas Flows in Arbitrary Shape Domains*. Certificate of State Registration No 5921, Ukrainian State Agency of Copyrights and Related Rights (in Russian).
9. Solodov V. G., Starodubtsev Yu. V. (2004) The Experience of 3D Modeling of Compressible Viscous Turbulent Flows in Turbomachinery. *Aerogidrodinamika: Problemy i Perspektivy. Sb. Statei [Aerohydrodynamics: Problems and Prospects. Digest of Articles]*. Kharkiv, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, 134–157 (in Russian).
10. Merkle C., Venkateswaran S., Deshpande M. (1995) Convergence Acceleration of the Navier-Stokes Equations Through Time-Derivative Preconditioning. *AGARD-CP578-NATO*, 1–10.
11. Solodov V. G. (2011) *Turbulent Flow Modeling. Large Eddy Simulation*. Kharkiv, Kharkiv National Automobile and Road University Publishing House. 168 (in Russian).
12. Afanas'eva N. N., Busurin V. N., Gogolev I. G., D'yakonov R. I. (et al.) (1980) *Heat Turbine Stages Aerodynamical Characteristics*. Leningrad, Mashinostroenie Publ. 263 (in Russian).
13. Shvetsov V., Kozheshkurt I., Konev V., Khandrimailov A., Solodov V. (2014) The Study of Aerodynamic and Power Characteristics of LPC “Stage – Diffuser” Exhaust Compartment. *Visnik Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu “Kharkivs'kii Politekhnicnii Institut”. Seriya: “Energetichni ta Teplotekhnichni Protseesi i Ustatkuvannya” = NTU “KhPI” Bulletin: Power and Heat Engineering Processes and Equipment*. 1055 (12), 12–20 (in Russian).
14. Shvetsov V., Kozheshkurt I., Konev V., Khandrimailov A., Solodov V. (2015) Studying Aerodynamic and Energetic Characteristics of the Exhaust Section of LPC. *Visnik Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu “Kharkivs'kii Politekhnicnii Institut” Seriya: “Energetichni ta Teplotekhnichni Protseesi i Ustatkuvannya” = NTU “KhPI” Bulletin: Power and heat Engineering Processes and Equipment*, 1124 (15), 41–50 (in Russian). <https://doi.org/10.20998/2078-774x.2017.08.01> (in Russian).
15. Kosyak Yu. F., Galatsan V. N., Garkusha A. V., Gudkov E. I., Konev V. A., Sarabun V. N., Tarasenko V. V., Yudin Yu. A. (1992) *Exhaust Part of Steam Turbine*. Patent No SU17 24903A1 USSR (in Russian).
16. Saburov E. N., Onokhin D. A. (2018) Aerodynamics and Stability of the Flow in Relatively Long Cyclone Chambers. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Association*, 61 (6), 527–538 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-527-538>.
17. Soroka B. S., Vorobyov N. V. (2019) Efficiency of the Use of Humidified Gas Fuel and Oxidizing Mixture. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Association*, 62 (6), 547–564. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-547-564>.

Received: 26 May 2019

Accepted: 14 August 2019

Published online: 30 July 2020

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-380-388>

УДК 536.25:620.98

Особенности расчета лучистой составляющей теплового потока горизонтального пучка из оребренных труб с вытяжной шахтой*

А. Б. Сухоцкий¹⁾, Г. С. Маршалова¹⁾, Е. С. Данильчик¹⁾

¹⁾Белорусский государственный технологический университет
(Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. В статье рассматривается теплообмен излучением пучков из труб с круглыми ребрами с окружающей средой и вытяжной шахтой. Система уравнений, описывающая всю совокупность первичных процессов, из которых складывается радиационный теплообмен ребристых пучков, очень сложна в математическом отношении. Поэтому расчеты лучистого теплообмена проводятся исходя из ряда упрощающих предпосылок с вынужденным искажением реальной физической картины. Кратко рассмотрены основные способы расчета излучения, используемые в инженерной практике: расчет по среднему угловому коэффициенту и зональный метод. Предложен уточненный зональный метод расчета лучистой составляющей теплового потока горизонтального пучка из оребренных труб с вытяжной шахтой. Проведено экспериментальное исследование однорядных пучков из оребренных труб с различными межтрубными шагами S_1 (64 и 70 мм) для малых чисел Рейнольдса $Re = 130–720$ в широком диапазоне определяющей температуры на входе в пучок (16–83 °С). Алюминиевое оребрение трубы пучка имеет следующие параметры: диаметр винтового оребрения $d = 0,0568$ м; диаметр трубы по основанию $d_0 = 0,0264$ м; высота, шаг и средняя толщина ребра соответственно $h = 0,0152$ м, $s = 0,00243$ м и $\Delta = 0,00055$ м. Движение воздуха в пучке осуществлялось гравитационной тягой, создаваемой вытяжной прямоугольной шахтой. Экспериментальный пучок устанавливался над шахтой, а воздух перед поступлением в шахту предварительно подогревался, что позволило расширить диапазон температур воздуха на входе в пучок. Обнаружено, что неправильный учет переизлучения пучка с вытяжной шахтой при проведении расчетов однорядных оребренных пучков приводит к снижению конвективной теплоотдачи на 7–25 %.

Ключевые слова: биметаллическая ребристая труба, алюминиевое круглое оребрение, вытяжная шахта, зональный метод расчета, лучистая составляющая теплового потока, естественная конвекция воздуха

Для цитирования: Сухоцкий, А. Б. Особенности расчета лучистой составляющей теплового потока горизонтального пучка из оребренных труб с вытяжной шахтой / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Маршалова, Е. С. Данильчик // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 4. С. 380–388. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-380-388>

Адрес для переписки

Сухоцкий Альберт Борисович
Белорусский государственный
технологический университет
ул. Свердлова, 13а,
220006, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 327-87-30
alk2905@mail.ru

Address for correspondence

Sukhotski Al'bert B.
Belarusian State
Technological University
13a, Sverdlova str.,
220006, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 327-87-30
alk2905@mail.ru

* Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант T19PM-076).

Specific Features of Calculating the Radiant Component of the Heat Flow of Horizontal Bunch from Finned Tubes with Exhaust Shaft

A. B. Sukhotski¹⁾, G. S. Marshalova¹⁾, E. S. Danil'chik¹⁾

¹⁾Belarusian State Technological University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article discusses the heat exchange of radiation of bunches of round finned tubes with the environment and the exhaust shaft. The system of equations describing the entire set of primary processes that make up the radiation heat exchange of finned bundles is very complex mathematically; therefore, the calculations of radiant heat transfer are usually based on a number of simplifying assumptions with a involuntarily distortion of the real physical picture. The main methods for calculating radiation used in engineering practice, viz. calculation by the average angular coefficient and the zonal method are briefly considered. A refined zonal method for calculating the radiant component of the heat flow of a horizontal bunch of finned tubes with an exhaust shaft is proposed. An experimental study of single-row bunches of finned tubes with different annular steps S_1 (64 and 70 mm) was carried out for small Reynolds numbers $Re = 130-720$ in a wide range of the determining temperature at the beam inlet (16–83 °C). The aluminum finning of the bunch tube had the following parameters: screw finning diameter $d = 0.0568$ m; diameter of the tube at the base $d_0 = 0.0264$ m; height, step and average fin thickness, respectively, $h = 0.0152$ m, $s = 0.00243$ m and $\Delta = 0.00055$ m. Air movement in the bunch was carried out by gravitational traction created by a rectangular exhaust shaft. The experimental bunch was installed above the shaft, and the air was preheated before entering the shaft, which allowed expanding the temperature range of the air at the entrance to the bunch. It was found that incorrect accounting for a bunch reemission with an exhaust shaft when calculating single-row finned bunches causes a decrease in convective heat transfer by 7–25 %.

Keywords: bimetallic ribbed tube, aluminum round fins, exhaust shaft, zonal method for calculating, radiant component of the heat flow, natural air convection

For citation: Sukhotski A. B., Marshalova G. S., Danil'chik E. S. (2020) Specific Features of Calculating the Radiant Component of the Heat Flow of Horizontal Bunch from Finned Tubes with Exhaust Shaft. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (4), 380–388. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-380-388> (in Russian)

Введение

Трубы с поперечными круглыми ребрами находят широкое применение в технике. Из них изготавливают теплообменные секции аппаратов воздушного охлаждения, калориферы, испарители холодильных камер и т. п. При эксплуатации теплообменника в режиме свободной конвекции значимая часть теплоты отводится излучением, которая может преобладать в суммарном тепловом потоке и зависит от геометрических параметров пучка и характеристик поверхности излучения [1]. При расчете излучения ребристых труб возникают дополнительные сложности в разработке методик из-за влияния на процесс межреберного шага.

В инженерной практике используют два основных метода расчета теплообмена излучением: расчет по среднему угловому коэффициенту и зональный метод [2].

Первый способ применяется в случаях, когда замкнутую систему можно представить только из двух тел. В пределах каждого тела температура и степень черноты считаются постоянными. Данный метод используется только для двух бесконечных плоскостей. Для сложных вогнутых тел он дает допустимый результат при условии, что степени черноты поверхностей тел достаточно велики и стремятся к единице. Однако в теплообменниках часто применяют трубы с алюминиевыми ребрами, а степень черноты алюминия порядка 0,1–0,2, и использование метода расчета по среднему угловому коэффициенту может привести к значительной погрешности. Поэтому в работах по изучению конвективного теплообмена в пучках оребренных труб с вытяжной шахтой отсутствуют указания по учету лучистой составляющей [3, 4] либо применяется разработанная в [1] методика расчета для свободной конвекции [5–7], в основе которой лежит зональный метод с выделением в пучке двух зон (рис. 1а): зона 2 – наружные половины труб крайних поперечных рядов; зона 3 – остальная часть пучка. Зоной 1 считается окружающая среда, состоящая из двух плоскостей, ограничивающих пучок.

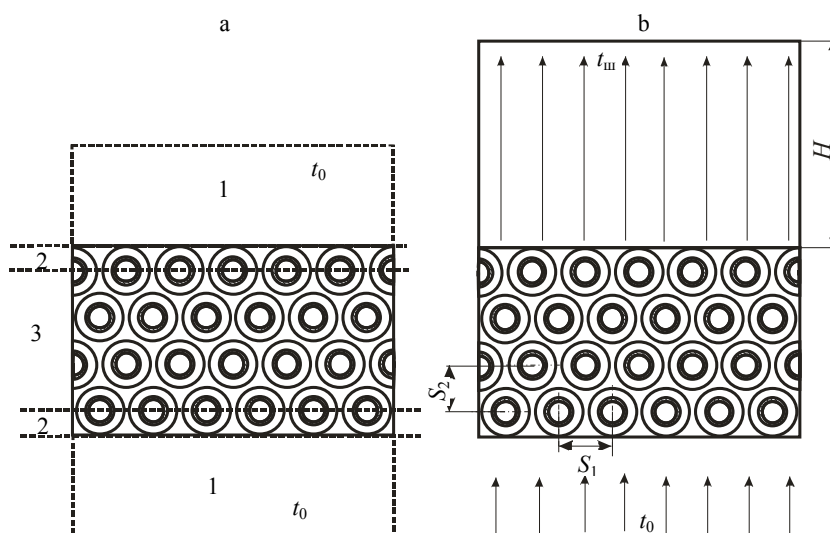


Рис. 1. Схема к расчету излучения пучка без шахты (а) и с шахтой (б)

Fig. 1. The scheme for the calculation of the radiation bunch without a shaft (a) and with a shaft (b)

Формула расчета зональным методом теплового потока излучением, Вт, применительно к пучку оребренных труб

$$Q_{\text{л}} = c_0 F \varepsilon_{\text{эф}} \varphi_{\text{т-о}} \frac{(\Phi_{1-3} + \Phi_{2-3}(z-1))}{z} \left[\left(\frac{273 + t_{\text{ст}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{\text{к}}}{100} \right)^4 \right], \quad (1)$$

где c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $\varepsilon_{\text{эф}}$ – эффективная степень черноты системы тел «пучок – среда»; F – пло-

щадь теплоотдающей оребренной поверхности пучка, м^2 ; $\Phi_{\text{т-о}}$ – средний угловой коэффициент излучения одиночной круглоребристой трубы к окружающей среде, учитывающий геометрические параметры оребрения трубы; Φ_{1-3} – разрешающий угловой коэффициент излучения от первой зоны к третьей; Φ_{2-3} – то же от второй зоны к третьей; z – количество рядов в пучке, шт.; $t_{\text{ст}}$ – средняя температура поверхности стенки у основания ребер труб пучка, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{к}}$ – температура поверхности камеры, пола и потолка вокруг пучка, равная температуре окружающего воздуха: $t_{\text{к}} = t_0$, $^{\circ}\text{C}$.

Окружающая среда считалась абсолютно черным телом, поскольку площадь поверхности камеры намного превышала взаимную поверхность лучистого теплообмена пучка. Формулы для расчета угловых коэффициентов [1] не учитывают влияние продольного шага S_2 труб в пучке, так как по [8] это влияние пренебрежимо мало и угловые коэффициенты от трубного пучка к среде практически всецело зависят от поперечного шага S_1 . На угловые коэффициенты также мало влияет и тип компоновки труб в пучке – коридорная или шахматная. Достоверность данной методики расчета подтверждена экспериментально в [9–11].

При установке над пучком вытяжной шахты (рис. 1б) верхняя зона 1 становится зоной вытяжной шахты с температурой стенок $t_{\text{ш}}$. Принимая в первом приближении шахту как абсолютно черное тело, получим формулу для расчета теплового потока, Вт, излучением пучка оребренных труб с шахтой:

$$Q_{\text{л}} = Q_{\text{л}}^0 + Q_{\text{л}}^{\text{ш}}; \quad (2)$$

$$Q_{\text{л}}^0 = (0,5 + \gamma) c_0 \varepsilon_{\text{эф}} F \Phi_{\text{т-о}} \frac{(\Phi_{1-3} + \Phi_{2-3}(z-1))}{z} \left[\left(\frac{273 + t_{\text{ст}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{\text{к}}}{100} \right)^4 \right]; \quad (3)$$

$$Q_{\text{л}}^{\text{ш}} = (0,5 - \gamma) c_0 \varepsilon_{\text{эф}} F \Phi_{\text{т-о}} \frac{(\Phi_{1-3} + \Phi_{2-3}(z-1))}{z} \left[\left(\frac{273 + t_{\text{ст}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{\text{ш}}}{100} \right)^4 \right]; \quad (4)$$

где γ – коэффициент излучения в отверстие шахты ($0 \leq \gamma \leq 0,5$), $\gamma = 0,5 S_{\text{отв}} / (S_{\text{ш}} + S_{\text{отв}})$; $S_{\text{отв}}$, $S_{\text{ш}}$ – площадь отверстия и внутренних стенок шахты, м^2 .

Таким образом, тепловой поток, Вт, отведенный от пучка к воздуху конвекцией, рассчитывается из уравнения

$$Q_{\text{к}} = W - Q_{\text{л}} - Q_{\text{п}}, \quad (5)$$

где W – тепловая мощность, подводимая к пучку, Вт; $Q_{\text{п}}$ – тепловые потери через торцы труб и токоподводы, Вт.

При составлении теплового баланса следует учитывать, что верхний лучистый поток нагревает стенки шахты, которая передает теплоту стенок воздуху в ней, а нижний лучистый поток рассеется в окружающую среду

$$Q_k + Q_{\text{л}}^{\text{ш}} = c_p \rho V (t_{\text{ш}} - t_0), \quad (6)$$

где c_p , ρ – средняя изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К), и плотность, кг/м³, воздуха, определяемые при температуре $0,5(t_0 + t_{\text{ш}})$; V – объемный расход воздуха через пучок, м³/с.

В [5] проведены исследования однорядного пучка с шахтой для различных межтрубных шагов S_1 , равных 58, 61, 64 и 70 мм. Оребренные трубы пучка имели следующие параметры: диаметр винтового оребрения $d = 0,0568$ м; диаметр трубы по основанию $d_0 = 0,0264$ м; высота, шаг и средняя толщина ребра соответственно $h = 0,0152$ м, $s = 0,00243$ м и $\Delta = 0,00055$ м; теплоотдающая длина оребрения трубы $l = 0,3$ м; общая длина оребренной трубы $l = 0,33$ м. Коэффициент оребрения трубы составил $\phi = 21$. Материал ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М, несущей трубы – сталь.

Экспериментальные данные обрабатывали и представляли в безразмерном виде – в числах Нуссельта $Nu = \alpha d_0 / \lambda$ и Рейнольдса $Re = w d_0 / \nu$, где α – коэффициент конвективной приведенной теплоотдачи от оребрения пучка к воздуху, Вт/(м²·°С); w – скорость воздуха в сжатом (узком) поперечном сечении пучка, м/с. Плотность ρ , кг/м³, коэффициенты теплопроводности λ , Вт/(м·К), и кинематической вязкости ν , м²/с, принимали для температуры окружающей среды $t_0 = (16–25)$ °С.

В результате обобщения экспериментальных данных при различных поперечных шагах установки труб с отклонением менее 5 % получено уравнение для расчета числа Нуссельта

$$Nu = 0,00129 \left(\frac{d_0}{d_3} \right)^{0,9} Re^{0,96}, \quad (7)$$

где d_3 – эквивалентный диаметр сжатого поперечного сечения пучка, м,

$$d_3 = \frac{2s}{2h + s} S_1 \left(1 - \frac{1}{S_1} \left(d_0 + 2 \frac{h\Delta}{s} \right) \right). \quad (8)$$

Уравнение (7) действительно в интервале изменения $Re = 130–720$, $d_0/d_3 = 4,85–7,21$. К сожалению, в данной работе тепловой поток излучением пучка в шахту $Q_{\text{л}}^{\text{ш}}$ рассчитывался по t_0 , а скорость потока и число Рейнольдса определялись без учета рассеивания в окружающую среду $Q_{\text{л}}^0$.

Цель исследований – уточнение формулы для расчета теплоотдачи конвекцией однорядного оребренного пучка с шахтой в широком диапазоне определяющей температуры на входе в пучок ($t_{\text{вх}}$).

Экспериментальное исследование и анализ

Для экспериментального исследования использовались такие же трубы, как и в [4], а однорядный пучок собирался с межтрубными шагами S_1 , равными 64 и 70 мм. Схема экспериментальной установки, аппаратное

оснащение ее измерительными приборами, методика и порядок проведения опытов изложены в [7, 12].

Исследования проводились в два этапа. Сначала пучок устанавливался под прямоугольной вытяжной шахтой высотой $H = 0,52$ м (рис. 2а) и определялись его теплоотдающие характеристики при $t_{\text{вх}} = t_0$. Затем он устанавливался над шахтой (рис. 2б, 3). Причем во втором случае воздух, проходящий через исследуемый однорядный пучок, предварительно подогревался в дополнительном трехрядном пучке, установленном под шахтой. Подогрев воздуха был необходим для обеспечения тяги в шахте и для расширения исследуемого диапазона определяющей температуры $t_{\text{вх}} = t_{\text{ш}}$.

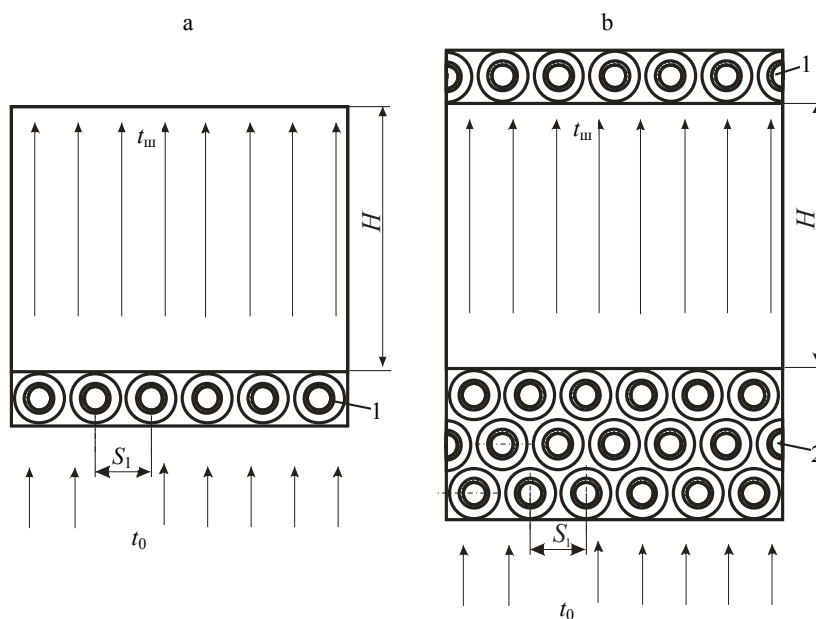


Рис. 2. Схема экспериментальной установки с размещением однорядного пучка под (а) и над шахтой (б): 1 – исследуемый однорядный пучок; 2 – дополнительный греющий пучок

Fig. 2. The scheme of experimental installation with placing of a single-row bunch under (a) and above shaft (b): 1 – single-row bunch under study; 2 – additional heating bunch



Рис. 3. Экспериментальная установка с пучком над шахтой

Fig. 3. Experimental installation with a bunch above the shaft

Скорость воздуха в сжатом поперечном сечении пучка

$$w = \frac{V}{f_{сж}}, \quad (9)$$

где $f_{сж} = \ln S_1 [1 - d/S_1]$ – площадь сжатого сечения пучка, m^2 ; n – число труб в одном руду пучка, $n = 6$ шт.

В результате обобщения экспериментальных данных по теплоотдаче однорядного горизонтального пучка, представленных на рис. 4, с отклонением, не превышающим 7 %, получено уравнение

$$Nu = C Re^{0,89}, \quad (10)$$

где C – коэффициент пропорциональности, $C = 0,0114$ для $S_1 = 64$ мм и $C = 0,0096$ для $S_1 = 70$ мм.

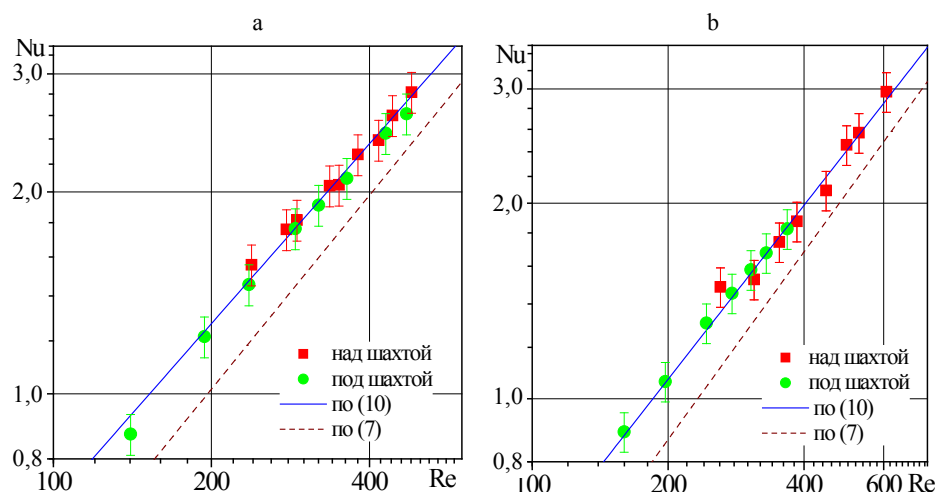


Рис. 4. Зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса при межтрубном шаге S_1 :
а – 64 мм; б – 70 мм

Fig. 4. Dependence of the Nusselt number on the Reynolds number for annular step S_1 :
а – 64 mm; б – 70 mm

Уравнение (10) действительно в интервале изменения $Re = 130-580$, $d_0/d_3 = 4,85-7,21$. Для теплофизических свойств воздуха при расчете чисел Нуссельта и Рейнольдса определяющей являлась температура воздуха на входе в пучок $t_{вх} = (16-83) ^\circ C$.

ВЫВОДЫ

1. Предложенная методика расчета лучистой составляющей позволила уточнить формулы для расчета теплоотдачи конвекцией однорядного оре-

бренного пучка с шахтой в широком диапазоне определяющей температуры воздуха на входе в пучок.

2. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что применение методики расчета лучистой составляющей для свободной конвекции при проведении расчетов теплоотдачи однорядных оребренных пучков с вытяжной шахтой приводит к погрешности в 7–25 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самородов, А. В. Методика теплового расчета аппарата воздушного охлаждения в режиме свободной конвекции воздуха / А. В. Самородов, Р. Ф. Теляев, В. Б. Кунтыш // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2002. № 1–2. С. 20–30.
2. Блох, А. Г. Теплообмен излучением / А. Г. Блох, Ю. А. Журавлев, Л. Н. Рыжков. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
3. Мильман, О. О. Экспериментальное исследование теплообмена при естественной циркуляции воздуха в модели воздушного конденсатора с вытяжной шахтой / О. О. Мильман // Теплоэнергетика. 2005. № 5. С. 16–19.
4. 3D CFD Simulations of Air Cooled Condenser-II: Natural Draft Around a Single Finned Tube Kept in a Small Chimney / A. Kumar [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. No 92. P. 507–522.
5. Маршалова, Г. С. Тепловой расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой / Г. С. Маршалова. Минск, 2019. 153 с.
6. Сухоцкий, А. Б. Экспериментальное исследование и обобщение данных по интенсифицированной конвективной теплоотдаче однорядных пучков ребристых труб в потоке воздуха / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Маршалова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 6. С. 552–563. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-552-563>.
7. Сухоцкий, А. Б. Экспериментальное исследование теплоотдачи однорядного пучка из оребренных труб при смешанной конвекции воздуха / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 4. С. 352–366. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-4-352-366>.
8. Самородов, А. В. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками / А. В. Самородов. Архангельск, 1999. 176 с.
9. Новожилова, А. В. Обобщенная зависимость для теплоотдачи горизонтальных пучков оребренных труб при свободной конвекции воздуха / А. В. Новожилова, З. Г. Марьина // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2016. № 10. С. 13–16.
10. Позднякова, А. В. Совершенствование характеристик и разработка методики расчета промежуточных калориферов лесосушильных камер / А. В. Позднякова. Архангельск, 2003. 147 с.
11. Волков, А. В. Повышение эффективности сушки длительносохнущих пиломатериалов в камерах периодического действия / А. В. Волков. Архангельск, 2003. 154 с.
12. Сидорик, Г. С. Экспериментальный стенд для исследования тепловых и аэродинамических процессов смешанно-конвективного теплообмена круглоребристых труб и пучков / Г. С. Сидорик // Труды БГТУ. Серия 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2018. № 1. С. 85–93.

REFERENCES

1. Samorodov A. V., Telyaev R. F., Kuntyshev V. B. (2002) Method of Thermal Calculation of the Air Cooling Device in the Mode of Free Air Convection. *Izvestiya Vuzov. Problemy Energetiki = Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, (1–2), 20–30 (in Russian).
2. Blokh A. G., Zhuravlev Yu. A., Ryzhkov L. N. (1991) *Heat Exchange by Radiation*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 432 (in Russian).
3. Mil'man O. O. (2005) Experimental Study of Heat Exchange during Air Natural Circulation in a Model of an Air Condenser with an Exhaust Shaft. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, (5), 16–19 (in Russian).
4. Kumar A., Joshi J. B., Nayak A. K., Vijayan P. K. (2016) 3D CFD Simulations of Air Cooled Condenser-II: Natural Draft Around a Single Finned Tube Kept in a Small Chimney. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 92, 507–522. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.136>.
5. Marshalova G. S. (2019) *Thermal Calculation and Design of Air Cooling Devices with Exhaust Shaft*. Minsk. 153 (in Russian).
6. Sukhotskii A. B., Marshalova G. S. (2018) Intensified Convection Heat Transfer of Single-Row Bundle of Finned Tubes in an Air Stream: Experimental Study and Generalization of the Obtained Data. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 552–563 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-552-563>.
7. Sukhotskii A. B., Sidorik G. S. (2017) Experimental Study of Heat Transfer of a Single-Row Bundle of Finned Tubes in Mixed Convection of Air. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (4), 352–366 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-4-352-366>.
8. Samorodov A. V. (1999) *Improving the Method of Thermal Calculation and Design of Air Cooling Devices with Staggered Finned Bundles*. Arkhangelsk. 176 (in Russian).
9. Novozhilova A. V., Mar'ina Z. G. (2017) A Generalized Dependence for Convective Heat Transfer in Horizontal Bundles of Finned Tubes with Free Air Convection. *Chemical and Petroleum Engineering*, 52 (9–10), 669–674. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0250-9>.
10. Pozdnyakova A. V. (2003) *Improvement of Characteristics and Development of Methods for Calculating Intermediate Heaters of Wood Drying Chambers*. Arkhangelsk. 147 (in Russian).
11. Volkov A. V. (2003) *Improving the Drying Efficiency of Long-Drying Lumber in Batch Chambers*. Arkhangelsk. 154 (in Russian).
12. Sidorik G. S. (2018) Experimental Stand for the Study of Thermal and Aerodynamic Processes of Mixed-Convection Heat Exchange of Round-Ribbed Pipes and Bundles. *Trudy BGTU. Seriya 1. Lesnoe Khozyaistvo, Prirodopol'zovanie i Pererabotka Vozobnovlyаемых Resursov = Proceedings of BSTU. Forestry. Environmental Management. Reprocessing of Renewable Resources*, (1), 85–93 (in Russian).