

**Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова**

ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

**Научно-исследовательская лаборатория
возобновляемых источников энергии**

**ГЕОГРАФИЯ
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ
ИСТОЧНИКОВ
ЭНЕРГИИ**



Коллективная монография

Под редакцией М.Ю. Берёзкина, С.В. Киселевой

ИД «Энергия»

Москва – 2021

УДК 911.3

ББК 65.04

ISBN 978-5-98908-486-9

*Печатается по решению
Ученого совета географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова
Published by the decision of the Academic Council of the Faculty of Geography
Lomonosov Moscow State University*

Рецензенты:

доктор биологических наук, профессор географического факультета МГУ
имени М.В.Ломоносова Голубева Елена Ильинична,
доктор географических наук, профессор географического факультета МГУ
имени М.В.Ломоносова Красовская Татьяна Михайловна

География возобновляемых источников энергии / Под редакцией М.Ю. Берёзкина, С.В. Киселевой. Коллективная монография. – М.: ИД «Энергия», 2021. – 200 с. DOI:10.5281/zenodo.5525761

Коллектив авторов:

Андреев Т.И., Берёзкин М.Ю., Бушуев В.В., Габдерахманова Т.С., Грибков С.В., Дегтярев К.С., Зайченко В.М., Залиханов А.М., Киселева С.В., Нефедова Л.В., Нечаев А.М., Нигматулин Р.И., Нигматулин Р.С.И., Показеев К.В., Рафикова Ю.Ю., Синюгин О.А., Соловьёв А.А., Соловьёв Д.А., Чекарев К.В., Чернова Н.И., Шилова Л.А.

The geography of renewable energy / Edited by M.Yu. Berezkin, S.V. Kiseleva. Collective monograph. – М.: Publishing House "Energia", 2021. – 200 p. DOI:10.5281/zenodo.5525761

Collective of authors:

Andreenko T.I., Berezkin M.Yu., Bushuev V.V., Gabderakhmanova T.S., Gribkov S.V., Degtyarev K.S., Zaichenko V.M., Zalikhanov A.M., Kiseleva S.V., Nefedova L.V., Nechayev A.M., Nigmatulin R.I., Nigmatulin R.S.I., Pokazeev K.V., Rafikova Yu.Yu., "Sinyugin O.A., Solovyev A.A., Solovyev D.A., Chekarev K.V., Chernova N.I., Shilova L.A.

Монография посвящена памяти многолетнего руководителя коллектива научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета Московского государственного университета профессора Александра Алексеевича Соловьёва. В монографии представлены труды как самого А.А. Соловьёва, так и его коллег по лаборатории и соратников в научной работе. Рассмотрены проблемы и достижения в области изучения возобновляемых источников энергии, экономико-географические, ресурсные, технологические аспекты возобновляемой энергетики. Представлены исследования в области гидродинамики и термодинамики, которым много лет научной деятельности посвятил А.А.Соловьёв.

Издание предназначено для широкой аудитории специалистов в области возобновляемой энергетики, экономической географии, рационального природопользования, экологии и устойчивого развития, преподавателей и научных сотрудников вузов, студентов и аспирантов.

ISBN 978-5-98908-486-9

© Коллектив авторов, 2021

Посвящается памяти профессора, академика РАН, Заслуженного научного сотрудника Московского университета, заведующего лабораторией возобновляемых источников энергии географического факультета Московского университета Александра Алексеевича Соловьева (1943-2020).



ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ ... 6

ВОСПОМИНАНИЯ КОЛЛЕГ И СОРАТНИКОВ А.А. СОЛОВЬЕВА

Профессор Александр Алексеевич Соловьев – 50 лет научной жизни в Московском университете (*Грибков С.В., Нефедова Л.В., Соловьев Д.А.*) ... 8

Профессор Александр Алексеевич Соловьев – ведущий специалист по возобновляемой энергетике в Московском университете (*Показеев К.В.*) ... 13

Профессор Александр Алексеевич Соловьев – незаурядный ученый (*Нигматулин Р.И.*) ... 17

Профессор Александр Алексеевич Соловьев – памяти ученого, учителя, отца (*Соловьев Д.А.*) ... 20

ПРИОРИТЕТЫ И ДОСТИЖЕНИЯ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ А.А. СОЛОВЬЕВА

К методике дорожного картирования возобновляемой энергетики ... 22

Вертикальная и горизонтальная конвекция в энергетических установках парникового типа (*совместно с Нигматулиным Р.И.*) ... 26

Моделирование процессов воздухообмена в испарительных башенных градирнях ... 37

Оценка силового воздействия сбросного потока от волн перемещения в условиях гидрологически опасных природных явлений (*совместно с Соловьевым Д.А., Шиловой Л.А.*) ... 48

Исследование возобновляемых источников воды ... 62

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ А.А. СОЛОВЬЕВА ... 70

СТАТЬИ СОТРУДНИКОВ ЛАБОРАТОРИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ МГУ

Перспективные направления развития в сфере экономики энергетических технологий и оценки рисков возобновляемой энергетики (*Соловьев А.А., Нефедова Л.В., Рафикова Ю.Ю., Соловьев Д.А., Зайченко В.М.*) ... **86**

Финансовые методы управления рисками в энергетике при использовании возобновляемых энергоресурсов (*Нефедова Л.В., Соловьев А.А.*) ... **101**

Технологические инновации в возобновляемой энергетике для промышленной политики России (*Берёзкин М.Ю., Синюгин О.А., Соловьев А.А.*) ... **112**

«Зеленая» энергия Арктики для устойчивого развития (*Бушуев В.В., Нефедова Л.В., Соловьев Д.А., Габдрахманова Т.С.*) ... **120**

Эколого-экономическая эффективность атомной и возобновляемой энергетики (*Берёзкин М.Ю., Дегтярев К.С., Соловьев А.А.*) ... **126**

Водородная энергетика и декарбонизация экономик стран и регионов мира (*Дегтярев К.С., Берёзкин М.Ю., Киселева С.В., Нефедова Л.В.*) ... **135**

Отходы растениеводства как ресурсная база развития биоэнергетики в регионах Юга России (*Андреев Т.И., Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю.*) ... **143**

Повышение энергоэффективности получения биотоплива из микроводорослей технологиями гидротермального сжижения (*Чернова Н.И., Киселева С.В., Залиханов А.М.*) ... **151**

Сифонные водозаборные сооружения в водоемах-охладителях электростанций (*Соловьев А.А., Залиханов А.М., Соловьев Д.А., Чекарев К.В.*) ... **164**

О гидродинамическом механизме образования атмосферного вихря (*Нечаев А.М., Соловьев А.А.*) ... **173**

Парусные энергетические установки (*Чекарев К.В., Залиханов А.М., Дегтярев К.С.*)... **180**

ОБ АВТОРАХ ... 198

ПРЕДИСЛОВИЕ

Коллективная монография посвящена памяти профессора Александра Алексеевича Соловьева – многолетнего руководителя научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета Московского государственного университета. В монографии представлены труды как самого А.А. Соловьева, так и его коллег по лаборатории и соратников в научной работе.

В первую часть монографии вошли воспоминания о профессоре А.А. Соловьеве – незаурядном ученом, ведущем специалисте в области изучения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в нашей стране, о его жизненном пути, большой педагогической и научно-просветительской деятельности.

Вторая часть монографии посвящена приоритетам и достижениям в научных исследованиях профессора А.А. Соловьева. Среди них возобновляемая энергетика (ВЭ), и, в частности, методика разработки дорожной карты ВЭ в России. Предложенные автором подходы затрагивают прогноз развития возобновляемой энергетике, тренды потребления энергии, а также картографическое отражения ресурсов, потенциалов и иных характеристик возобновляемых энергетических ресурсов на территории Российской Федерации.

Еще одним крупным направлением деятельности профессора А.А.Соловьева, которое он возглавлял с конца 1980-х гг., являются гидроаэродинамические основы возобновляемой энергетике. В рамках этого направления в монографии представлен разработанный метод эффективного преобразования энергии лучистого излучения в энергию воздушных течений при комбинированной горизонтально-вертикальной центробежной конвекции, сопровождающейся нелинейным взаимодействием разномасштабных движений среды. В результате этих исследований и экспериментов с моделью установки «солнечный камин с трубой» рассчитан коэффициент преобразования энергии солнечной радиации в энергию искусственно-го вихря.

Одна из крупных практически значимых работ профессора А.А. Соловьева, вошедших в монографию, связана с моделированием процессов теплообмена в испарительных башенных градирнях при регулировании воздушных потоков в них. Александром Алексеевичем (совместно с Нигматулиным Р.И.) были получены экспериментальные результаты моделирования процессов аэродинамического и тепло-массообменного взаимодействия воздушных и водных потоков в градирнях. Установлено, что использование систем регулирования направленности и интенсивности потоков воздуха, охлаждающих оборотную воду теплоэлектростанций, может привести к значимому росту выработки электроэнергии.

В монографии представлены также работы А.А. Соловьева, имеющие прикладное значение для изучения процессов в природных средах. В частности, исследование силового воздействия сбросного потока от волн перемещения в условиях гидрологически опасных природных явлений (совместно с Соловьевым Д.А. и Шиловой Л.А.) и исследование возобновляемых источников пресной воды в виде ресурса водяных паров атмосферы.

В третий раздел монографии вошли статьи сотрудников лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ, которые были

написаны, в том числе, совместно с профессором А.А. Соловьевым. Сюда вошли статьи об экономике возобновляемой энергетики, рисках при использовании возобновляемых энергоресурсов, а также финансовых методах управления рисками в ВЭ. Кроме этого, рассмотрены ряд технологических инноваций в возобновляемой энергетике для эффективного использования их в промышленной политике России.

Приводятся статьи, посвященные региональным исследованиям возобновляемой энергетики России. На примере солнечных электростанций Республики Алтай показана эффективность методики оценки природно-ресурсных рисков в возобновляемой энергетике. Рассмотрены проблемы и перспективы применения технологий возобновляемой энергетики в суровых природных условиях Арктики, оценена потенциальная роль станций на ВИЭ в условиях глобальных климатических изменений. Определены основные механизмы воздействия этих изменений на условия эксплуатации и эффективность работы энергообъектов ВЭ.

Еще одна тематика, получившая отражение в третьей части коллективной монографии, – это тенденции в развитии атомной и водородной энергетике. На примере атомной энергетике показано, что снижение ее доли в мировом энергетическом балансе пока не может быть компенсировано за счет возобновляемых источников энергии и приводит к росту использования ископаемых энергоносителей. В целях устойчивого развития неуглеродной энергетике необходимо развивать возобновляемую и атомную энергетике там, где эти объекты конкурентоспособны, обеспечены потреблением, а риски экологических последствий производства энергии минимальны. Что касается водородной энергетике, то существует целый ряд экологических и технологических барьеров на пути реализации амбициозных сценариев роста производства и потребления водорода. В связи с этим оспаривается распространённое утверждение о водороде как эффективном средстве быстрой декарбонизации энергетике, а также состоятельность экологической аргументации водородной экономики.

Другое направление, которое многие годы развивается сотрудниками лаборатории, – это биоэнергетика. В монографию вошли две работы, посвященные изучению ресурсной базы отходов растениеводства для развития биоэнергетике в регионах Юга России, и повышению энергоэффективности получения биотоплива из микроводорослей технологиями гидротермального сжижения.

Наконец заключительные статьи монографии отражают теоретические и экспериментальные исследования, идеи которых были или предложены или поддержаны профессором А.А. Соловьевым. Таковыми являются экспериментальное моделирование сифонных водозаборных сооружений в водоемах-охладителях электростанций, экспериментальные исследования парусной энергетической установки, преобразующую кинетическую энергию ветра в электрическую, лабораторное и численное моделирование атмосферного вихря.

В заключение отметим, что в монографии нашли свое отражение те аспекты возобновляемой энергетике, которые можно рассматривать как основу междисциплинарной области знания, и развитию которой Александр Алексеевич Соловьев посвятил многие годы своей научной жизни. Это дает основание надеяться, что книга вызовет интерес не только энергетиков, географов, физиков, биологов, но и представителей других смежных научных направлений.

ВОСПОМИНАНИЯ КОЛЛЕГ И СОРАТНИКОВ А.А. СОЛОВЬЕВА

ПРОФЕССОР АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ СОЛОВЬЕВ – 50 ЛЕТ
НАУЧНОЙ ЖИЗНИ В МОСКОВСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

С.В. ГРИБКОВ, Л.В., НЕФЕДОВА, Д.А., СОЛОВЬЕВ

Аннотация: В статье приведена биография профессора Московского университета Соловьева Александра Алексеевича (24.05.1943 - 27.05.2020).

Ключевые слова: персоналии, история науки, Московский университет, возобновляемые источники энергии (ВИЭ), Комитет ВИЭ

А.А.Соловьев родился в г. Барнаул Алтайского края 24 мая 1943 г. в семье советских служащих. После окончания средней школы поступил на физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова. В 1968 г. с отличием окончил физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, в 1968-1970 гг. обучался в аспирантуре физического факультета. В Московском университете работает с 1970 г. На физическом факультете в 1973-1987 гг. работал в должности ассистента кафедр общей физики и молекулярной физики. С 1988 г. работал на Географическом факультете: до 2007 г. в должности ведущего научного сотрудника, заведующего сектором научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии (НИЛ ВИЭ), а с 2007 г. – заведующий НИЛ ВИЭ (рис. 1).

После успешной защиты кандидатской диссертации А.А.Соловьеву в 1973 г. была присвоена ученая степень кандидата физико-математических наук, в 1997 г. – ученое звание научного сотрудника/доцента по специальности. В 2002 г. Александр Алексеевич успешно защитил докторскую диссертацию, получив степень доктора физико-математических наук. В 2005 г. ему было присвоено ученое звание профессора. Александр Алексеевич был награжден медалью Российской инженерной академии «165 лет В.Г.Шухова», почетным знаком «250 лет МГУ», имел благодарности декана географического факультета, являлся ветераном труда. В 2019 г. решением Ученого Совета МГУ ему присуждено почетное звание «заслуженный научный сотрудник Московского университета».

В область научных интересов А.А.Соловьева входили проблемы теоретической геофизики, гидроаэромеханики и термодинамики природных энергетических систем, географии возобновляемых источников энергии, экологии и рационального природопользования, истории и методологии естественных наук.

За годы работы в Московском университете Александр Алексеевич являлся руководителем и участником работ по созданию геоинформационной системы «Возобновляемые источники энергии России» [1], систем производства энергии на основе утилизации сбросного тепла тепловых электростанций и др. Результаты работ в рамках развитого им нового научного направления — гидроаэродинамическая гелиоэнергетика – были отражены в его докторской диссертации на тему «Гидродинамика конвективных и вращательных движений в условиях лучистого нагрева». Им было разработано методическое и программное обеспечение исследова-

дований по комплексному анализу влияния объектов энергетики на окружающую среду, динамике регионального энергопотребления в отраслях топливно-энергетического комплекса, изучению процессов генерации энергии в природных энергоносителях [2–5].



Рис.1. Коллектив НИЛ ВИЭ географического факультета МГУ. 2012 г. (профессор А.А.Соловьев в центре в первом ряду)

К основным научным достижениям А.А. Соловьева можно отнести следующие:

- Предложено новое решение проблемы волновой дисперсии в жидких средах с учетом теплообмена в волне, устраняющее парадокс недиссипативности акустических волн. Работы нашли отражение в кандидатской диссертации «Поглощение ультразвуковых волн в жидкостях».
- В исследованиях физической природы интенсивных атмосферных вихрей, установлены критериальные комплексы и универсальные зависимости турбулентной генерации импульса от притока солнечной энергии в гидродинамически неустойчивых потоках интенсивных атмосферных вихрей.
- Разработаны инновационные технологические решения, обеспечивающие рациональное использование тепловых отходов энергетических машин высокой мощности, функционирующих в низкоширотных регионах с жарким климатом.
- Совместно с профессором В.В. Алексеевым теоретически и экспериментально обоснована технология получения пресной воды из атмосферного воздуха с использованием энергии возобновляемых источников, перспективная для практического использования в аридных районах [3, 6].

В последние годы Александр Алексеевич руководил научно-исследовательской работой НИЛ ВИЭ географического факультета МГУ по теме: «География и рациональное использование возобновляемых источников энергии».

В рамках указанной темы им проводились комплексные методологические исследования эффективности и безопасности функционирования объектов возобновляемой энергетики в регионах России. Предложены методики расчетов географического потенциала возобновляемых энергоресурсов на территориях, доступных для их освоения и испытывающих потребность в энергоснабжении с помощью ВИЭ. Александр Алексеевич разработал методику расчета коэффициентов тепловой и экологической эффективности тепломассообменных процессов с воздухорегулированием в гидротехнических контурах электростанций, которая была апробирована на практике при эксплуатации объектов энергетики низко-широтного размещения в экстремальных климатических условиях [7].

С участием Соловьева А.А. создан ряд экспериментальных установок для изучения экологически эффективных и безопасных режимов функционирования аэродинамических преобразователей энергии солнечного излучения (парниковые энергоустановки). На основе экспериментального и теоретического моделирования термодинамического цикла трансформации энергии были предложены новые способы генерации искусственного ветра в парниковых энергоустановках применительно к климатическим условиям России [8].

В годы работы Александром Алексеевичем заведующим НИЛ ВИЭ в лаборатории были организованы комплексные исследования географических аспектов возобновляемой энергетики, создана геоинформационная система «Возобновляемые источники энергии России», содержащая данные о ресурсах, валовом и техническом потенциал различных видов ВИЭ на территории страны, базы данных по объектам возобновляемой энергетики на территории Российской Федерации, аналитические материалы, расчетные алгоритмы и др. Было продолжено развитие водородослевой энергетики, в рамках которой созданы и апробированы методы эффективного крупномасштабного культивирования микроводорослей – продуцентов сырья для биотоплива и ценных сопутствующих продуктов.

Им опубликовано более 200 научных работ, в том числе около 20 учебных пособий, монографий и книг, получено более 30 патентов на изобретения, два из них в 2019 г. [9-10]. Результаты исследований Александра Алексеевича опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, в иностранных изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus. Наиболее известными и общепризнанными работами Соловьева А.А. последних лет, являются книги «Основы гидромеханики» (2012) и «Физическая гидромеханика» (2005) (в соавторстве с профессором Рс.И. Нигматулиным), «Сборник задач по гидромеханике» (2009), «Динамические аналогии в нетрадиционной энергетике» (1999), а также серия «Курсов лекций по возобновляемой энергетике» (2012, 2015, 2018 в соавторстве с сотрудниками НИЛ ВИЭ).

Научная работа Соловьевым А.А. сочеталась с педагогической деятельностью. С 1991 г. А.А. Соловьев читал ряд курсов на кафедре Теоретической механики Московской академии водного транспорта (МГАВТ), разработал программы лекционных курсов по тематическим дисциплинам: «Техническая гидромеханика», «Условные процессы водных путей»; «Механика жидкостей в гидросооружениях», «Подземная гидромеханика грунтов», «Турбулентные течения». Им подготовлены курс лекций «Возобновляемые источники энергии гидросферы и атмосферы» для программы по повышению квалификации и переподготовке кадров (приклад-

ная гидрометеорология), «Устойчивое развитие энергетики» для кафедры физической географии мира и геоэкологии географического факультета МГУ.

Профессор А.А.Соловьев возглавлял Оргкомитет VII–XI научных молодежных Школ «Возобновляемые источники энергии», проведенных на географическом факультете МГУ в 2012–2018 гг. (рис. 2). Им были прочитаны лекции и проведены семинары для слушателей Школы, при его участии и под редакцией подготовлены и выпущены сборники материалов и лекций. Тематика Школы раскрывала как общие проблемы развития возобновляемой энергетики и эколого-географические аспекты использования возобновляемых источников энергии, так и научно-технические проблемы отдельных видов ВИЭ (использование ветро-, геоло-, биоэнергетических ресурсов, малой гидроэнергетики, новые технологии в возобновляемой энергетике; водородная энергетика; гибридные системы).



Рис.2. XI Школа молодых ученых «Возобновляемые источники энергии», проведенная на географическом факультете МГУ в 2018 г. (профессор А.А.Соловьев в центре в первом ряду)

Необходимо отметить и его большую научно-организационную деятельность в качестве редактора отечественных и зарубежных научных журналов, сборников научных трудов в области возобновляемой энергетики. Он являлся членом редколлегии научных журналов: Вестник Российского университета дружбы народов «Процессы в геосредах» (ВАК), (2012-2015); International scientific-technical journal «Industrial Technology and Engineering» (Scopus). Соловьев А.А. был действительным членом Российской Академии естественных наук, Российской инженерной академии, членом Ученого совета географического факультета МГУ, диссертационных советов Д212.203.33 в РУДН, и Д223006.01 в МГАВТ, был членом президиума Комитета возобновляемых источников энергии Российского союза инже-

нерных организаций, членом Научного совета по нетрадиционным источникам энергии РАН, Международной ассоциации по водородной энергетике.

Александр Алексеевич прожил яркую жизнь, полностью отданную науке. Он снискал огромное уважение у коллег, пользовался заслуженным авторитетом руководителя лаборатории. Его кончина – непоправимая утрата для российской науки. Светлая память о нем навсегда сохранится в сердцах его друзей, коллег и учеников.

Литература

1. Рафикова Ю., Киселева С.В., Нефедова Л.В. Использование ГИС-технологий в области возобновляемой энергетики: зарубежный и отечественный опыт // *Альтернативная энергетика и экология*. 2014. № 12. С. 96–106.
2. Нефедова Л.В., Соловьев А.А. Анализ рисков освоения возобновляемых источников энергии в России // *Проблемы анализа риска*. 2015. Т. 12, № 6. С. 56–63.
3. География и рациональное использование возобновляемых источников энергии / под редакцией А.А.Соловьева. Коллективная монография. Издательский дом "Энергия" Москва, 2019. 288 с.
4. Соловьев А.А. Возобновляемая энергетика геосфер: новые идеи и перспективные методы исследований // *Окружающая среда и энергоснабжение*. 2020. № 2. С. 6–9.
5. Nefedova L., Solovyev A., Rafikova Y., Solovyev D. Renewable energy as a factor of sustainable development and regulation of ecological problems in Africa // *E3S Web Conf.* / под ред. Redina M. и др. 2020. Т. 169. С. 05009. DOI: 10.1051/e3sconf/202016905009.
6. Solovyev A.A., Solovyev D.A., Shilova L.A. Environmental and Social Aspects of Consumption of Water Resources and the Use of Atmospheric Moisture Condensers // *Adv. Intell. Syst. Comput. (EMMFT-2018)*, Springer, Cham. 2019. Т. 983. С. 395–402. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_40.
7. Solovyev A., Solovyev D., Shilova L., Adamtsevich A. The modelling of power plant's evaporative cooling tower operation taking into account hydrometeorological conditions // *E3S Web Conf.* / под ред. Sayegh M.A. и др. 2019. Т. 116. С. 00081. DOI: 10.1051/e3sconf/201911600081.
8. Solovyev A., Solovyev D., Shilova L. Solar-vortex power plants: Principles of effective work and technical requirements on the preparation of initial data for design // *MATEC Web Conf.* / под ред. Andreev V. и др. 2018. Т. 196. С. 04075. DOI: 10.1051/matecconf/201819604075.
9. Соловьев А.А., Чекарев К.В. Установка для моделирования гидродинамических процессов // *Бюллетень: Изобретения, полезные модели*. 2019. № 2, с. 1-7
10. Соловьев А.А., Чекарев К.В., Соловьев Д.А. Биогазовая аэродинамическая установка // *Бюллетень: Изобретения, полезные модели*. 2019. № 16. С. 488–495.

ПРОФЕССОР АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ СОЛОВЬЕВ – ВЕДУЩИЙ
СПЕЦИАЛИСТ ПО ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ В МОСКОВСКОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ

К.В. ПОКАЗЕЕВ

С Александром Алексеевичем Соловьевом мне довелось познакомиться в конце семидесятых годов прошлого века, когда после окончания аспирантуры физического факультета МГУ был назначен заведующим Гидрофизической лаборатории. Весь гидрокорпус, в котором находилась Гидрофизическая лаборатория, находился в административном подчинении физического факультета, но в гидрокорпусе работали лаборатории и группы не только физического факультета, но и сотрудники НИИ механики, геологического и географического факультетов. В гидрокорпусе расположилась и созданная Лаборатория возобновляемых источников энергии, которую возглавил Вячеслав Викторович Алексеев. С ним я был хорошо знаком: до своего назначения на должность руководителя новой лаборатории он работал на физическом факультете и мы с ним сидели в одной комнате. Именно из увлекательных рассказов Алексеева мне довелось узнать об исследованиях, которые велись по заказам Римского клуба, о проблемах экологии, о возобновляемой энергетике. Формирование лаборатории по новому научному направлению проводилось с привлечением сотрудников географического и физического факультетов, среди них был и А.А. Соловьев. При создании новой лаборатории возникало много административных и чисто технических проблем, поэтому мне часто приходилось взаимодействовать с сотрудниками лаборатории. Например, в составе Гидрофизической лаборатории физического факультета была большая группа механиков, и был хороший парк станков, чего не было у географов. Не всегда это взаимодействие было простым, при этом выделялся А.А. Соловьев – своим спокойствием, прагматическим подходом, нацеленностью на результат. Это обеспечивало отличную сочетаемость с увлеченностью и импульсивностью Алексеева В.В. Александр Алексеевич Соловьев, наряду с Вячеславом Викторовичем Алексеевым, по праву является основателем фундаментальных исследований по возобновляемой энергетике в МГУ.

Следует отметить, что первоначально планировалось создать Лабораторию возобновляемых источников энергии как межфакультетскую лабораторию МГУ, однако это предложение встретило ряд трудностей, а руководство географического факультета оказалось наиболее восприимчивым к необходимости реализации развития данной тематики в МГУ, поэтому Лаборатория была создана на географическом факультете.

Интенсивное взаимодействие с Александром Алексеевичем Соловьевым продолжилось на новом уровне в конце девяностых годов прошлого века, когда на физическом факультете начали проводить всероссийские конференции «Физические проблемы экологии (Физическая экология)». Первая конференция была проведена в 1997 году, последняя – четвертая – в 2004 году. Проведение конференции сопровождалось изданием сборника под названием «Физические проблемы экологии (Физическая экология)». Издание сборника продолжалось до 2013 года, всего было издано 19 томов. А.А. Соловьев принимал самое активное участие не только в работе конференции, но и в ее организации, подготовке изданий трудов конфе-

ренции. При этом он привлекал и сотрудников своей лаборатории, например, М.Ю. Берёзкина, не только к участию в конференции, но и к выполнению технической работы, что было просто необходимо.

Но этим не ограничивалось мое взаимодействие с А.А. Соловьевым. С 1998 г., когда я начал заведовать кафедрой физики моря и вод суши физического факультета, Александр Алексеевич систематически читал для студентов кафедры избранные лекции по возобновляемой энергетике, неоднократно был руководителем или рецензентом дипломных работ. Когда в 2015 г. был организован журнал «Процессы в геосредах», А.А. Соловьев вошел в состав редакции журнала. Он принимал самое деятельное участие в работе редакции: писал статьи, привлекал авторов в новый журнал, рецензировал.

Александр Алексеевич интересовался историей науки, причем делал это на высоком профессиональном уровне. Им была написана книга (в соавторстве с И.П. Базаровым, рис. 1) нетривиального содержания о выдающемся советском теплофизике – своем учителе и руководителе кандидатской диссертации – профессоре А.С. Предводителеве [1]. Кроме этого, он написал книгу о выдающемся ученом в области гидроаэродинамики и термоупругости – профессоре А.А. Померанцеве [2].



Рис. 1. Ассистент кафедры молекулярной физики А.А.Соловьев и профессор кафедры квантовой статистики И.П. Базаров – соавтор книги о профессоре А.С. Предводителеве (1975 г.)



Рис. 2. Экспериментальный полигон Морского гидрофизического института РАН по масштабному культивированию спирулины для энергетических целей. Кацивели, Крым (1990-е гг.)

Мне посчастливилось проводить практику студентов кафедры физики моря и вод суши на экспериментальном полигоне Морского гидрофизического института РАН в поселке Кацивели в 1990-х гг. В то время экспериментальный полигон и Морской гидрофизический институт входили в академию Украины. Работавший в это время на полигоне А.А. Соловьев оказывал нам всемерную помощь, знакомил студентов с исследованиями сотрудников Лаборатории возобновляемых источников энергии, в частности с исследованиями по масштабному культивированию спирулины для энергетических целей (рис. 2). Александр Алексеевич был великолепным популяризатором и воспитателем, эта сторона его талант проявился в

статьях, которые он регулярно писал для газеты «Советский физик», издаваемой на физическом факультете.

Одну из этих статей, статью с говорящим названием – «Возобновляемая энергетика – место рождения – физфак», мне хотелось бы привести здесь полностью [3].

«Двадцать лет назад в Московском университете была организована научно-исследовательская лаборатория возобновляемых источников энергии. В те годы к возобновляемым источникам энергии отношение было, мягко говоря, скептическое. Существовало расхожее мнение, что ресурсы ископаемых углеводородных топлив безграничны или, во всяком случае, далеки от истощаемости, и низкоэффективные и дорогие возобновляемые источники энергии не способны обеспечить нарастающие потребности в энергии.

Профессор В.В.Алексеев (1940–2007), тогда старший научный сотрудник кафедры физики моря и вод суши, с группой учеников и единомышленников впервые обратил внимание на остроту проблемы диверсификации источников энергии и рационального использования природных ресурсов с учетом надвигающихся экологических задач.

Он предложил проект ускорения природного процесса газообразования из быстрорастущих и высокоурожайных водорослей, выращиваемых в искусственных условиях на водных плантациях с переработкой биомассы в биогаз (метан).

Эта технология легла в основу организации в Московском университете первой в Советском Союзе исследовательской лаборатории занимающейся фундаментальными проблемами в области возобновляемой энергетики. Многопрофильность и междисциплинарность заявленной тематики требовала объединения различных научных знаний и участия специалистов разного научного профиля (физиков, математиков, биологов, химиков, географов, экономистов).

По предложению ректора МГУ, академика РАН В.А. Садовниченко, в те годы проректора, и поддержке чл.-корр. РАН, заведующего кафедрой рационального природопользования географического факультета МГУ А.П. Капицы было принято решение о создании отдельного самостоятельного структурного подразделения с научными и образовательными программами на географическом факультете Московского университета. На этом факультете наиболее благоприятным образом складывались условия для объединения усилий естественников и гуманитариев для решения многопрофильных задач альтернативной энергетики и охраны окружающей среды.

За годы, прошедшие с момента организации в МГУ лаборатории возобновляемых источников энергии, основной состав которой составили воспитанники физического факультета, удалось разработать и решить ряд фундаментальных задач, получивших прикладное развитие. В первую очередь это проект биоконверсии солнечной энергии в метан (БИОСОЛЯР). Проведены успешные испытания пилотной биогазовой станции морского базирования в Крыму на экспериментальном полигоне Морского гидрофизического института НАН Украины в поселке Качивели. К сожалению, успех пришелся на то время, когда отмечался спад к востребованности научных разработок. Тем не менее, в последние годы проект БИОСОЛЯР, приобретает новую динамику практической реализации в масштабах малой энергетики. Созданы плантации водорослей в ряде областей России, стра-

нах СНГ. Рядом зарубежных компаний принято решение о строительстве водорослевых биоэлектростанций в Греции, Италии, ОАЭ.

С момента создания лаборатории получили развитие работы в направлении адаптации энергетических механизмов природных явлений к разработке технологий преобразования возобновляемой энергии в формы доступные для потребления. Одной из таких технологий, является система преобразования инфракрасной составляющей солнечной радиации в энергию вихревых воздушных потоков. Разработаны физико-математические и ресурсные основы солнечно-вихревых электростанций. В России по проекту лаборатории начато строительство пилотной станции в Палласовском районе Волгоградской области. Совместно с итальянской компанией ATWAY и Болонским университетом в настоящее время реализуется проект солнечно-вихревой электростанции в окрестности Равенны.

Одно из приоритетных направлений исследований лаборатории связано с использованием углеродных нанотрубок для повышения эффективности фотосинтеза водорослей в процессе обеспечения направленного, адресного питания клеток, а также создания генетически модифицированных штаммов водорослей, являющихся источником биодизельного топлива.

Не менее остро, чем энергетика, на повестке дня современного общества стоит проблема пресной воды. Лаборатория к решению задачи получения воды подходит в направлении использования процесса конденсации атмосферной влаги на различных поверхностях. Разработаны физико-математические основы извлечения пресной воды из атмосферной влаги. Созданы макетные экспериментальные установки по производству атмосферной воды. Определен вклад в общий водный баланс Земли, до сих пор не учитываемой в расчетах, конденсационной составляющей.

В течение ряда лет лаборатория тесно сотрудничает с кафедрой физики моря и вод суши. Направление сотрудничества, развивается в плане исследования процессов взаимодействия атмосферы и океана, энергетики интенсивных атмосферных вихревых образований (ураганов). Отрадно, что возрождение сотрудничества с прародителями лаборатории через участие студентов в решении исследовательских задач, приносит свои плоды, пополняя ряды исследователей инициативными, увлеченными наукой молодыми учеными, готовыми посвятить себя перспективным задачам возобновляемой энергетики. И это вполне отвечает пониманию того, что только те, кто сегодня поставит себе на службу чистые, возобновляемые источники энергии станут ведущей силой в XXI веке».

Прошу обратить внимание на последнюю фразу.

Прогноз содержащейся в ней и сделанный более десяти лет назад Александром Алексеевичем Соловьевом, полностью оправдался в наши дни!

Литература

1. Базаров И.П., Соловьев А.А. Александр Саввич Предводителей. – М.: Изд-во МГУ, 1985. 158 с.
2. Соловьев А.А. Алексей Александрович Померанцев. М.: Физический факультет МГУ, 2000. 76 с.
3. Соловьев А.А. Возобновляемая энергетика – место рождения – физфак // Советский физик. 2009. №3 (72). С. 39-45.

ПРОФЕССОР АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ СОЛОВЬЕВ – НЕЗАУРЯДНЫЙ
УЧЕНЫЙ

Р.И. НИГМАТУЛИН

Александр Алексеевич Соловьев – ученик и последователь научной школы члена-корреспондента АН СССР Александра Саввича Предводителя в области молекулярной физики и теплофизики. С конца 1980-х гг. он возглавлял научное направление «Гидроаэродинамические основы возобновляемой энергетики», предложил новое решение проблемы акустической дисперсии в жидкостях, провел ряд фундаментальных исследований по физической природе интенсивных атмосферных вихрей, установил критериальные комплексы и универсальные зависимости турбулентной генерации энергии импульса и энергии гидродинамически неустойчивых конвективных и вращающихся потоков в условиях постоянного притока лучистой энергии, разработал крупномасштабные гидродинамические преобразователи солнечной энергии, к которым относятся интенсивные парниковые вихревые электростанции и водорослевые энергосистемы морского базирования.



За столом профессор А.С. Предводителей со своим учеником, аспирантом А.А. Соловьевым (справа). Кафедра молекулярной физики физического факультета МГУ (1970 г.).

Я познакомился с Александром Алексеевичем почти 20 лет назад, когда он делал у нас в Башкирском государственном университете доклад по своей докторской диссертации [1]. И тогда я понял, что это особый человек, со складом ума, который в наше время уже редко встречается. Сейчас процесс мышления нередко передоверяется машине, и само мышление в какой-то степени подменяется вычислениями.

– Роберт Искандерович, Вы и Александр Алексеевич – люди одного поколения. И, возможно, вы сходным образом оценивали то, что сейчас происходит в науке...

А Александр Алексеевич был человек, способный, с помощью мышления и интуиции, схватывать качественную суть вещей, опираясь на фундаментальные физические законы. И, конечно, очень интересно направление, связанное с вихревыми движениями, которое он разрабатывал.

К сожалению, мы с ним не были близко знакомы, он больше общался с моим братом, Раисом Искандеровичем. Они вместе написали очень интересный учебник по гидромеханике [2]. Здесь подход и особый стиль Александра Алексеевича тоже проявился – он обладал редким искусством доходчиво и увлекательно излагать материал.

Да, конечно, мы говорили с Александром Алексеевичем об этом, наши точки зрения здесь совпадали. Я должен прямо сказать, что происходящее сейчас – это разрушение, и науки и, как следствие, страны. Нечто похожее с нашей истории уже было. Об этом мне рассказывал мой отец. Когда он приехал из деревни в Москву, это был 1926 г., и поступил на рабфак в Московский университет. Он, благодаря ещё «царским» преподавателям, получил там блестящее образование, но этим учёным и преподавателям не доверяли – именно потому, что «царские», поэтому ректором университета и деканами факультетов ставили студентов и аспирантов. Потом ситуация выправилась, хотя Сталин, с одной стороны, был и великим разрушителем, с другой – он смог вернуть её в нормальное русло. Место в руководстве наукой вновь заняли учёные, и науку снова стали финансировать и сделали престижным занятием.

Тогда для этого потребовалось менее 20 лет после революции, сейчас же прошло уже 30 лет, но в руководстве наукой, по-прежнему, случайные и некомпетентные люди, которым невежественные высокопоставленные люди внушили миссию реорганизаций, вольно или невольно занимают разрушением. Эти «высокопоставленные» не способны создать условия для развития экономики и производительных сил. У нас ВВП на душу населения меньше даже, чем у бывших соц-странах и бывших наших республиках Прибалтики. И вместо того, чтобы работать над проблемами экономики, привлекая ученых и практиков, они порушили образование и здравоохранение. Россия тяжелее всех стран мира прошла «ковидный» 2020 год. Прирост смертности в 2020 г. на миллион жителей у нас 2200, а в США 1400, в Европе около 1000, хотя порушенная наука смогла создать 3 вакцины, а вот вакцинировалось у нас только 10%, а в США 50%.

Между тем, русская система организации науки, включающая Академию наук и ведущие университеты, создавалась веками. Она начала создаваться еще Петром I, Екатериной II и Ломоносовым. В наших условиях она оптимальна и, заметим, наиболее экономична, исходя из того, что у нас не самая богатая страна. Так зачем же разваливать то, что складывалось столетиями и доказало свою эффективность?

И ответственность за происходящее лежит на руководстве страны, тем более – у нас очень многое зависит от первых лиц. За последствия же ещё придётся платить и, как обычно, расплачиваться будет народ.

Разрушение происходит не только в науке, но и в образовании, в школьном в том числе. Я это вижу по нашим студентам, которых нам приходится уже после поступления подтягивать по школьному курсу математики.

Сейчас господствует идея, что детей нельзя нервировать и перенапрягать экзаменами и лишними нагрузками. Но ведь вся жизнь – это нервы. Как к ней подготовиться, если избегать нагрузок в школе?

Другая идея, тоже господствующая в наше время – это представление о необходимости тех или иных предметов: «А зачем ему синусы, если он будет работать таксистом?» и тому подобное. Но всё – и синусы, и поэзия Пушкина, и география, и физика, и биология необходимо для тренировки мозга, тренировки мышления, выявления у молодых людей талантов.

Упрощение до добра не доводит. Я хорошо знаю США, и могу сказать, что сейчас и у нас, и у них сходные тенденции. В Америке, по сути, нет всеобщего школьного напряженного «с синусами» образования для всех. И я думаю, происходящее сейчас там – бунт агрессивных невежд, «комбедов», ставящих на колени большинство нации – результат плохого образования для большинства. А настоящее напряженное образование в школах и университетах реализуется для нескольких процентов молодых людей.

– А что бы Вы посоветовали нынешним студентам и молодым учёным?

Своим студентам я всегда говорю, что человеческий мозг способен к восприятию абстрактных понятий в математике, теоретической физике, биологии, истории, географии, иностранных языков, лет до 25-27. Дальше мы уже на этой основе строим всё остальное. Поэтому главное – не теряйте времени! И не бойтесь напрягаться, учить предметы, сдавать экзамены – без напряжения ничего не получится ни в жизни, ни в науке.

Беседовал К.С. Дестерев

Литература

1. Соловьёв А.А. Гидродинамика конвективных и вращательных движений в условиях лучистого нагрева // Дисс. на соискание учёной степени доктора физико-математических наук. 2003.
2. Нигматулин Рс. И., Соловьёв А. А. Физическая гидромеханика. — Издательская группа ГЭОТАР-Медиа Москва, 2005. — 512 с.

АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ СОЛОВЬЕВ – ПАМЯТИ
УЧЕНОГО, УЧИТЕЛЯ, ОТЦА...

СОЛОВЬЕВ Д.А.



Месяц май прошлого 2020 года – тяжелый месяц не только для нашей семьи, но и для всего географического факультета МГУ. Череда смертей преподавателей, больших ученых, профессоров... Так, в начале мая ушел последний из могикан факультета – Георгий Иванович Рычагов. Каждый, кто связан с географией знает его классический учебник – «Основы геоморфологии». Помню, что тогда же на сайте факультета появились сообщения о смерти Вадима Николаевича Михайлова, по чьему учебнику «Гидрология суши» я учился в свое время, как и многие географы и геофизики. Потом пришло сообщение об уходе из жизни известного эконом-географа Евгения Наумовича Перцика. И в самом конце этого месяца в разгар пандемии КОВИД-19 после непродолжительной болезни 27 мая ушел от нас наш любимый отец Александр Алексеевич Соловьев. Я не буду говорить о его научных достижениях – вы о них хорошо знаете из воспоминаний коллег, опубликованных в этом сборнике. Хочу только сказать несколько слов о его характере и глубоком научном мировоззрении. В последнее время мы вместе с ним много работали в смежных областях на стыке энергетики, экологии и проблем изменения климата, чем, собственно, я и занимаюсь в ИО РАН. Готовили совместные статьи, выступали на конференциях в том числе с моими коллегами из МГУ, ИО РАН, ОИВТ РАН, МГСУ. Очень помогали в моей научной работе его замечания и предложения: обычно он хвалил меня, но давал предельно конкретные корректировки и всегда находил еще одну сторону вопроса, о которой я даже не догадывался – все благодаря его феноменальной научной эрудиции! Его отношение всегда было очень человеческим и заботливым, он всегда поддерживал любое начинание, давал советы, что вот если доработать вот здесь и вот здесь, можно получить прекрасный результат, подать статью в хороший журнал, оформить заявку на грант, создать новую установку, сделать заявку на патент. Поэтому, конечно, я возлагал очень

много надежд на научное наставничество отца, и его уход стал большой потерей, для меня и для всех, кто работал с ним в последние годы. В конце концов, он был просто бескорыстным, добрейшим человеком, настоящим ученым – профессором Московского Университета, у которого хотелось чему-то научиться. Рядом с ним становилось спокойно, голова работала яснее, и появлялись новые идеи. Александр Алексеевич безусловно останется в истории МГУ, в памяти его учеников, коллег, детей и внуков, а его научные труды принесут пользу многим поколениям.



Профессор А.А. Соловьев сопровождает во время посещения лаборатории возобновляемых источников энергии декана географического факультета Касимова Н.С. и ректора МГУ Садовниченко В.А. (2010 г.)



Профессор А.А. Соловьев вручает Диплом участнику Школы «Возобновляемые источники энергии» (2012 г.)



Профессор А.А. Соловьев ведет заседание Школы «Возобновляемые источники энергии» (2018 г.)

ПРИОРИТЕТЫ И ДОСТИЖЕНИЯ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ А.А. СОЛОВЬЕВА

К МЕТОДИКЕ ДОРОЖНОГО КАРТИРОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

А.А. СОЛОВЬЕВ

Аннотация. В связи с реализацией «Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2030 года» обсуждаются некоторые методологические подходы дорожного картирования применительно к планированию технологий возобновляемой энергетики в России. Предлагается уточнение алгоритмов для двух важнейших узлов дорожной карты технологий возобновляемой энергетики, имеющих прогноз динамики развития энергетики и географические карты различного пространственно-временного и параметрического назначения, которые в существующих системах дорожного картирования практически не используются.

Ключевые слова: дорожная карта, энергетика, возобновляемые источники энергии, география.

В арсенале средств планирования развития возобновляемых источников энергии, используются дорожные карты [1, 2]. Замена традиционного планирования дорожным картированием обусловлена необходимостью адекватного учета диверсификации спроса и предложений на инновационные технологические разработки, а также способов преодоления технических, экономических, политических, социальных, экологических барьеров, возникающих на пути практической реализации идей [2].

Разработкам дорожных карт возобновляемой энергетики уделяется повышенное внимание исследователей, главным образом в США и Европе [3, 4]. Дорожное картирование в нашей стране не очень распространенный инструмент планирования [5]. Это объясняется тем, что пока не сформированы унифицированные методологические подходы и аналитические алгоритмы дорожного картирования. Нет полной ясности относительно формата и структуры дорожных карт. Поэтому представляется актуальным обсуждение опыта разработки дорожных карт и рассмотрение некоторых принципиальных методологических подходов дорожного картирования применительно к планированию технологий возобновляемой энергетики в России.

В международной практике технологического планирования возобновляемых источников энергии выделяются следующие три этапа: подготовка исследования; собственно картирование; реализация дорожной карты. Одним из ключевых моментов начального этапа картирования является прогноз производства и потребления энергии всех видов энергоисточников (традиционных и возобновляемых) и сравнительные тренды технологий возобновляемых источников энергии.

Прогностический анализ динамики развития возобновляемых источников энергии, как правило, базируется на результатах многоаспектного междисциплинарного обсуждения. По их результатам создаются численные модели прогноза с

многочисленными способами описания внутренних связей в различных системах потребителей энергии, их взаимоотношений с внешней средой [6]. Качество прогнозов оказывается зависящим от интуиции специалистов и потому, в большинстве случаев, содержит значительные погрешности. Громоздкость математических расчетов, необходимость применения численных методов затрудняют проверку результатов и при наличии логических неточностей приводят к быстрой потере прогнозами своей актуальности.

Главным недостатком прогностических моделей, на результатах которых производится дальнейшее построение дорожных карт, с нашей точки зрения, является отсутствие функциональных соотношений аналитического типа, которые позволяли бы, не прибегая к трудоемким и длительным вычислениям производить непосредственное определение темпов потребления энергии, эффективности использования энергии по отдельным технологиям, допустимой интенсивности использования природных ресурсов. В работах последних лет нами развивается аналитический подход к оценкам прогноза развития возобновляемых источников энергии [7]. Для феноменологического описания временной динамики потребления энергии установлены уравнение энергетического состояния между скоростью потребления первичной энергии и численностью населения, в которые входит в качестве постоянного параметра для различных типов возобновляемых источников энергии предельно допустимое подушное ускорение энергопотребления $R = 0,5 \cdot 10^{-3}$ тут/чел \cdot год².

Уравнение энергетического состояния предлагается использовать при составлении дорожных карт возобновляемых источников энергии. Для детализации структуры потребления энергии, производимой различными источниками энергии в рамках предлагаемого подхода, может быть использована дифференциальная форма записи уравнения энергетического состояния:

$$\left(\frac{\partial n}{\partial \tau}\right)_e = -\left(\frac{\partial e}{\partial \tau}\right)_n \bigg/ \left(\frac{\partial e}{\partial n}\right)_\tau. \quad (1)$$

В уравнении (1) в качестве безразмерных величин фигурируют соответственно: e -скорость энергопотребления; n -численность; τ - обратное время, а также коэффициент $\left(\frac{\partial e}{\partial n}\right)_\tau = C_\tau$, характеризующий величину, которую можно рассматривать как емкость источника энергии.

Под емкостью источника энергии понимается количество произведенной энергии, которое может быть использовано в процессе потребления, если число пользователей увеличивается на одного человека. По фактическим данным [8, 9] для российской энергетики с использованием уравнения (1) был произведен подсчет емкости различных источников возобновляемой энергии.

На рис. 1, выборочно, в виде трендов темпов годового прироста числа потребителей энергии, представлены результаты расчета для двух наиболее продвинутых технологий возобновляемой энергетики. Они свидетельствуют о том, что до 2030 г. рост пользователей ветроэнергетических технологий будет заметно опережать темп нарастания потребителей энергии использующих продукцию геотер-

мальных электростанций. Судя по временной динамике изменения потребителей, использующих энергию, производимую на основе двух значимых для отечественных нетрадиционных возобновляемых источников энергии, переход к фазе резкого роста можно ожидать, начиная с 2030 г. По-видимому, это будет происходить на основе результатов реализации инновационных подходов к принципам преобразования возобновляемой энергии.

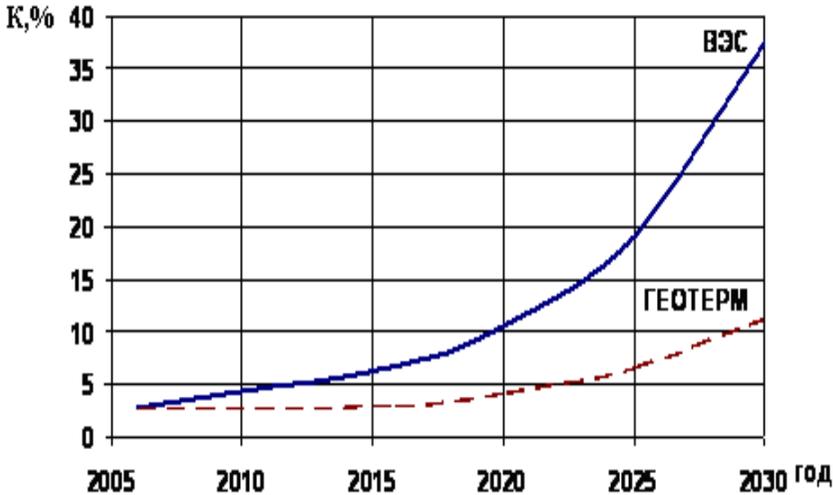


Рис. 1. Темп прироста числа пользователей энергии $K = \frac{de}{dt}$ в %, произведенной ветровыми и геотермальными станциями России за год.

К весьма важной составляющей дорожной карты возобновляемой энергетики, необходимой для получения адекватной картины развития технологии, относятся географические карты. В существующих системах дорожного картирования географические карты практически не используются. Методикам построения различных пространственно-временных карт, обосновывающих целесообразность использования различных технологий возобновляемой энергетики, обычно не уделяется должного внимания. Имеются в виду не только ресурсные географические карты потенциалов различных возобновляемых источников энергии. Для всестороннего планирования развития технологий возобновляемых источников энергии методами дорожного картирования, необходима серия географических карт, построенных для различных территорий с использованием большого числа разнообразных расчетных параметров.

В качестве таких параметров подлежащих картированию весьма показательными являются: коэффициенты отношения дефицита потребления энергии к потенциалу возобновляемых энергоресурсов; отношение количества энергии произведенной возобновляемыми источниками к потребляемой энергии; число, показывающее относительную величину энергии экспортируемой или импортируемой в

другие территориальные образования по соотношению к энергии, потребляемой в регионе производителя энергии. В Московском университете разработаны методики географического картирования демонстрирующих степень территориальной и временной эффективности использования различных систем возобновляемой энергетики. Главная особенность этих методик, заключается в использовании прецизионных способов программной обработки комплекса данных, полученных от космических спутников и сети наземных станций природного и хозяйственного мониторинга. Для примера на рис. 2 приведена карта коэффициента превышения ресурсной обеспеченности возобновляемой энергии по отношению к потребляемой электроэнергии по регионам Российской Федерации. По результатам картографического районирования выделяются три группы регионов: ресурсно-дефицитные, ресурсно-сбалансированные и перспективного развития. Регионы перспективного развития имеют наибольший потенциал использования технологий возобновляемой энергетики, в которых ресурс на порядок превышает потребности в энергии. В данную группу попадают регионы, как правило, богатые несколькими взаимодополняющими видами возобновляемых ресурсов и не имеющие мощной промышленной инфраструктуры, а так же небольшое население. Это, в частности, Приморский край, Республика Бурятия, Калмыкия.

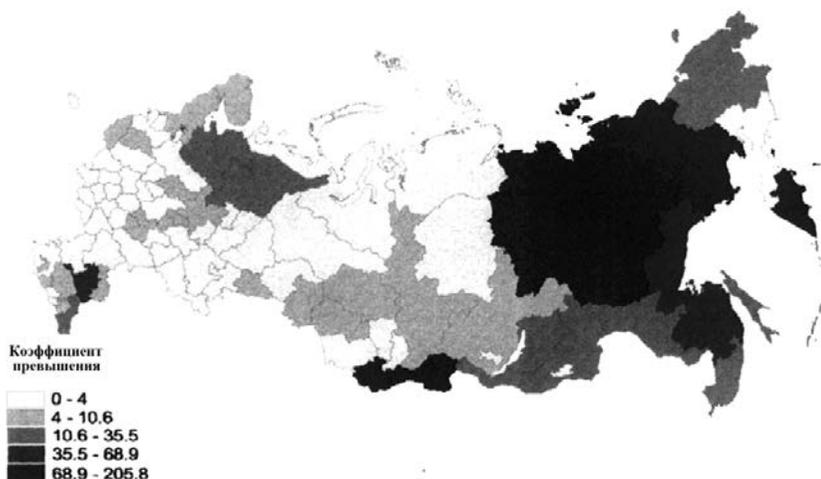


Рис. 2. Превышение потенциала возобновляемых энергоресурсов над значениями потребляемой энергии по регионам России [5].

В статье только намечены основные направления уточнения формата дорожных технологических карт возобновляемой энергетики. Дальнейшие работы по повышению эффективности дорожных карт возобновляемой энергетики следует выполнять в направлении приближения их к инструментам управления с выработкой аналитических способов оценок имеющегося потенциала, риска угроз развития, созданием расчетных методик выбора оптимальных вариантов потенциальной рентабельности и ресурсной затратности.

Литература

1. Макки Ст. Практические инструменты для новых идей, 2007.
2. Безруких П.П., Стребков Д.С. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии. М.:ГНУ ВИЕСХ РАСХН, 2005.
3. Makhijani A. Carbon-Free and Nuclear-Free: A Roadmap for U.S. Energy Policy.
4. Institute for Energy and Environmental Research, 2007.
5. Global Renewable Energy Roadmap, REMap 2030: IRENA (2014); www.irena.org/remap
6. Лидин К.Л. Многообразие построения дорожных карт, 2006.
7. Makarov A. A. Quality of Energy: Way to the Global Problem. // Proceedings of Summer School. CEES. Princeton.: University Press, 1990.
8. Соловьев А.А. Аналитические методы прогноза энергопотребления // Энергетическая политика. Вып.5, 2009, С.17-22.
9. Макаров А.А. Энергетика в XXI веке// Вестник РАН, 2009, Том 79, №4. - С. 291-308.
10. Бушуев В.В., Макаров А.А., Мастепанов А.М. Энергетика России. 1920-2020 гг. Том 2: Энергетическая политика на рубеже веков, ИД Энергия, 2010.

ВЕРТИКАЛЬНАЯ И ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ КОНВЕКЦИЯ
В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ ПАРНИКОВОГО ТИПА

Рс.И. НИГМАТУЛИН, А.А. СОЛОВЬЕВ

Аннотация. Анализируются принципы построения солнечных энергетических установок, в которых течение создается за счет парникового эффекта. Рассматривается эффективность преобразования энергии лучистого излучения в энергию течений при комбинированной горизонтально-вертикальной центробежной конвекции, сопровождающейся нелинейным взаимодействием разномасштабных конвективных движений среды. Представлены результаты экспериментальных исследований коэффициента преобразования энергии солнечной радиации в энергию искусственного вихря в модели установки «солнечный камин с трубой». Сделано заключение о том, что преобразование солнечной энергии турбулентными, вихревыми течениями является перспективным вариантом энергетических установок, использующих горизонтальную конвекцию, инициированную солнечным нагревом призматического слоя.

Ключевые слова: конвекция, лучистый теплообмен, коэффициент полезного действия.

Условные обозначения

C – теплоемкость, дж/кг·град; H – высота вытяжной трубы; m ; \hat{L} – длина пути воздуха в коллекторе, нормированная на его радиус; R – радиус коллектора, м;

Re – число Рейнольдса; Γ – циркуляция скорости, $\text{м}^2/\text{с}$; Q – интенсивность солнечной радиации $\text{Вт}/\text{м}^2$; S_m – площадь трубы, м^2 ; S_R – площадь коллектора, м^2 ; T – температура, град $^{\circ}\text{C}$; V_t , V_r , V_z – составляющие скорости: тангенциальная, радиальная, осевая, $\text{м}/\text{с}$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; h – высота коллектора м ; ρ – коэффициент пропускания радиации верхним покрытием коллектора; r_m – радиус трубы, м ; (r, φ, z) – координаты цилиндрической системы отсчета; α – альbedo подстилающей поверхности; Θ – угол входа потока в коллектор; τ – время, перемещения частиц среды в коллекторе, с ; ν – кинематический коэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; μ – коэффициент полезного действия, %; V' – коэффициент турбулентной вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; π – статическое давление, отнесенное к удельному весу, м ; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$. Индексы: $кр$ – критический; 0 – значение внутри коллектора; ∞ – фоновое значение; m – значение на границе вихря.

Введение

В основе энергетических установок, работающих на парниковом эффекте, до сих пор сохраняется малоэффективный подход преобразования тепловой энергии в энергию прямоточных свободно-конвективных течений [1]. Генерация энергии в солнечно-парниковых электростанциях сравнима с вязкой диссипацией, в результате чего коэффициент полезного действия не превышает долей процента [2]. В работе ставится задача проанализировать эффективность преобразования энергии лучистого излучения в кинетическую энергию течений с использованием комбинированной горизонтально-вертикальной центробежной конвекции.

Солнечно-парниковые электростанции известные в литературе как «solar chimney» (солнечная труба), представляют собой коллектор (парник) с трубой в центре [3]. Ветровой поток, концентрируемый в вытяжной трубе, формируется за счет вертикальной конвекции воздушных масс, нагретых в приземном слое солнечным излучением. В конце 1980-х гг. близ города Манзанарес в Испании на этом принципе была построена солнечно-парниковая электростанция [4]. По проекту она должна была генерировать мощность в 100 кВт, но фактически максимально достигнутая мощность не превышала 36 кВт. Такие факторы, как высокая себестоимость энергии (60 центов за кВт-час), низкий КПД преобразования лучистой энергии (0,26 %) при относительно громоздких размерах энергетической установки (диаметр коллектора 250 м, высота трубы 200 м) приводили к негативным заключениям относительно перспектив ее дальнейшего использования. Тем не менее, на том же принципе в 2003 г. в Австралии начато строительство электростанции «солнечная труба» [5]. Коэффициент преобразования энергии солнечного излучения электростанции мощностью 200 МВт по результатам расчетов должен составлять 1,5 %.

Значение коэффициента преобразования энергии солнечного излучения при условии, что поток формируется только вертикальной конвекцией, определяется величиной вертикального перепада давления, температурой приземного слоя, длиной пути перемещения и временем нагрева воздушных масс в коллекторе. Поэто-

му реальный способ увеличения КПД солнечно-парниковых электростанций связывается с использованием относительно высокой трубы и протяженного солнечного коллектора. С этой целью в австралийской установке проектируется труба высотой 1000 м, а солнечный коллектор диаметром – 7500 м. Между тем, такое решение проблемы интенсификации термовосходящих течений, инициированных ИК-нагревом приземного слоя солнечного коллектора, не является однозначным. Поскольку оно изначально игнорирует, играющие существенную роль в создании искусственного ветра, горизонтальные конвективные течения, обусловленные перепадом температур внутри и вне коллектора, а также завихренность, входящего в коллектор потока. По существу говоря, как испанский, так и австралийский проекты солнечно-парниковой электростанции связывают генерацию энергии искусственного ветра с моделью термика [6]. Тогда как реально формирующиеся в электростанции течения следует рассматривать в рамках модели смерча, энергия, которого определяется не столько вертикальным напором, сколько угловой закруткой горизонтальных спирально сходящихся к центру воздушных масс.

Для оценки возможности интенсификации течений в солнечно-парниковой электростанции с взаимосвязанными вертикальными и горизонтальными конвективно закрученными потоками в настоящей работе поставлена цель получить приближенное решение для вращающегося термика и проверить эти решения на экспериментальной модели парниковой электростанции.

Постановка задачи

Рассматривается следующая модель преобразования энергии лучистого нагрева в кинетическую энергию воздушных течений. В приземном коллекторе создаются условия для концентрации инфракрасной составляющей электромагнитного излучения и нагрева, находящегося в нем воздуха. Вертикальный перепад давления в цилиндрической трубе на оси цилиндрического коллектора формирует из восходящих конвективных струй осесимметричные сходящиеся к центру потоки. Горизонтальный перепад температур в коллекторе инициирует боковую конвекцию, благодаря которой происходит замещение нагретого воздуха, перемещающегося из коллектора в трубу. Входящему в коллектор наружному воздуху на боковой границе придается угловой момент. Вращающееся приземное течение в трубе концентрируется в закрученный смерчеподобный поток. Необходимо определить коэффициент преобразования энергии лучистого нагрева в энергию потока в трубе.

Уравнения, описывающие течения в модели, записываются в следующем виде:

$$V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{\partial \pi}{\partial z} + \lambda \vartheta + \frac{v'}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_z}{\partial r} \right),$$

$$V_r \frac{\partial V_t}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_t}{\partial z} + \frac{V_r V_z}{r} = v' \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (V_t r)}{\partial r} \right),$$

$$V_r \frac{\partial \vartheta}{\partial r} + V_z \frac{\partial \vartheta}{\partial z} + S V_z = \frac{v'}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right),$$

$$\frac{V_t^2}{r} = \frac{\partial \pi}{\partial z}, \quad \frac{\partial V_r r}{\partial r} + \frac{\partial V_z r}{\partial z} = 0.$$

$$\text{Здесь } g = \frac{T_0 - T_\infty}{T_\infty}; \lambda = g/T_\infty; S = \frac{dT}{dz}.$$

В работе [7] получено приближенное решение этой системы уравнений с граничными условиями вида:

$$V = V_m \text{ при } \begin{cases} 0 < r \leq r_m, \\ 0 < z < H \end{cases}, \quad V < V_\infty \text{ при } \begin{cases} 0 < r < \infty, \\ r \geq R \end{cases},$$

$$\pi_0 < \pi \leq \pi_\infty \text{ при } 0 \leq z < H,$$

$$T = T_0 \text{ при } \begin{cases} 0 < r \leq R, \\ 0 \leq z \leq h \end{cases}, \quad T = T_\infty \text{ при } \begin{cases} r > R, \\ 0 < z \leq h \end{cases},$$

$$\frac{dT}{dz} = \frac{T_0 - T_\infty}{H} \text{ при } \begin{cases} 0 < r \leq r_m, \\ 0 \leq z \leq H \end{cases}.$$

Воспользуемся схемой решения работы [7], добавив в граничные условия периферийное вращение и горизонтальный градиент температуры в коллекторе

$$\{ \Gamma = \Gamma_\infty \text{ при } \begin{cases} r = R, \\ 0 < z \leq H \end{cases}, \quad \frac{d\Gamma}{dr} = \frac{T_0 - T_\infty}{R} \text{ при } \begin{cases} 0 < r \leq R, \\ 0 \leq z \leq h \end{cases} \}.$$

Для перехода к системе обыкновенных дифференциальных уравнений вводим новую переменную $\eta = r^2 \sqrt{-\lambda S} / 4av'$ с числовым нормировочным коэффициентом a и безразмерной функцией $\Phi(\eta)$. После интегрирования уравнений, для модуля скорости и давления получаются следующие выражения:

$$V = \frac{\sqrt[4]{-\lambda S}}{2b\sqrt{av'}} \cdot \frac{\Gamma}{\sqrt{\eta}} \int_0^\eta \exp\left(-\int_0^\eta \frac{\Phi}{\eta} d\eta\right) d\eta,$$

$$\pi = -R \int_\eta^{\eta_\infty} \frac{V^2}{2\eta} \eta.$$

$$\text{Здесь } b = \int_{\eta}^{\infty} \exp\left(-\int_0^{\eta} \frac{\varphi}{\eta} d\eta\right) d\eta, \quad \eta_{\infty} = R^2 \sqrt{-\lambda S} / 4av'.$$

В работе [7] показано, что при $\eta < 12$ функция $\varphi(\eta)$ может быть выражена в виде ряда

$$\varphi(\eta) = 5,25 \left[1 - \left(1 - \frac{\eta}{21} \right)^4 \right],$$

После численного интегрирования параметра b при $a=1,144$ для максимальных значений составляющих скорости и радиуса находим

$$V_{lm} = 0,3\Gamma_{\infty} \sqrt[4]{\gamma\lambda/v'^2}, \quad V_{zm} = z \cdot \sqrt{\gamma\lambda}, \quad V_{rm} = 1,6 \cdot \sqrt{v'} \cdot \sqrt[4]{\gamma\lambda}, \quad r_m = \frac{5,35 \cdot v'^{1/2}}{(\gamma\lambda)^{1/4}}.$$

Выразим циркуляцию скорости Γ_{∞} на входе в коллектор через фоновые величины радиальной составляющей скорости $V_{r\infty}$, периферийного радиуса R и угла закрутки потока на периферии $\theta = \text{arctg } V_{t\infty}/V_{r\infty}$

$$\Gamma_{\infty} = V_{t\infty} R = V_{r\infty} \cdot R \cdot \text{tg}\theta = V_{rm} r_m \cdot \text{tg}\theta,$$

$$\text{где } V_{r\infty} = V_{rm} r_m / R.$$

Представим параметр неустойчивости γ в виде отношения $\gamma = T_0 - T_{\infty} / h$. Разность температур $\Delta T = T_0 - T_{\infty}$ воздуха в коллекторе и вне его в случае нагрева воздушной среды солнечной радиацией принимаем равной

$$\Delta T = \frac{Q(1-\alpha)n}{\rho C_p h} \tau$$

Предположим, что траектория движения воздуха в конвективном вращающемся потоке приземного слоя описывается логарифмической спиралью. Для пути ℓ , проходимого частицами воздуха от периферии до центра вихря, в предположении, что угол между касательной к круговым линиям тока и радиусом, систематически уменьшается по экспоненциальному закону от фонового θ до некоторого финального значения равного θ_0 запишем следующее выражение:

$$\ell = R \left[2\pi - (2\pi - 1) e^{-\text{tg}^2 \theta / \text{tg}^2 \theta_0} \right]$$

Тогда для составляющих скорости течения находим

$$V_{tm} = 0,3V_* \cdot \operatorname{tg}\theta \cdot \sqrt[5]{[2\pi - (2\pi - 1) \cdot e^{-X^2}]},$$

$$V_{rm} = 0,2V_* \cdot \sqrt[5]{[2\pi - (2\pi - 1) \cdot e^{-X^2}]},$$

$$V_{zm} = 0,015 \cdot V_*^2 \frac{H}{v'^2} \cdot \sqrt[5]{[2\pi - (2\pi - 1) \cdot e^{-X^2}]^2}.$$

$$\text{Здесь } X = \operatorname{tg}^2\theta / \operatorname{tg}^2\theta_0, \quad V_* = \left[\frac{Q(1-\alpha)n}{\rho CT_0} \cdot g v'^2 \cdot \frac{R}{hH} \right]^{\frac{1}{5}}.$$

Радиус, на котором скорость достигает максимума, равен

$$r_m = 4,3 \frac{v'^2}{V_*} \cdot [2\pi - (2\pi - 1) \cdot e^{-X^2}]^{-1/5}.$$

Формулу для расчета модуля скорости течения запишем так

$$V = 0,13V_* \sqrt[5]{\hat{L}} \cdot \left[1 + 2,5\operatorname{tg}^2\theta_0 + 0,06V_*^2 \cdot \frac{H^2}{v'^2} \sqrt[5]{\hat{L}_*^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$$\text{где } \hat{L} = 2\pi - (2\pi - 1) \cdot e^{-X^2}.$$

Коэффициент преобразования энергии лучистого нагрева среды в энергию конвективно-закрученного течения, вызванного парниковым эффектом, определяем как отношение мощности потока площадью S_m к мощности нагрева среды солнечной радиацией на площади нагреваемого слоя S_R :

$$\mu = \frac{0,5\rho V^3 S_m}{Q(1-\alpha)nS_R}.$$

Подставляя в это выражение, значение скорости (1), имеем

$$\mu = 0,001 \cdot \frac{r_m^2}{Rh} \cdot \frac{g v'^2}{CT \cdot H \cdot V_*^2} \cdot \sqrt[5]{\hat{L}_*^3} \left[1 + 2,5\operatorname{tg}^2\theta_0 + 0,06V_*^2 \cdot \frac{H^2}{v'^2} \sqrt[5]{\hat{L}_*^2} \right]^{\frac{3}{2}}. \quad (2)$$

Анализ полученного решения задачи приводит к следующему результату. Эффективностью преобразования лучистой энергии конвективными вращающимися течениями можно управлять путем подбора оптимального соотношения площади и высоты приземного нагретого слоя, диаметра и высоты вихря, а также

интенсивности инсоляции и угла θ закрутки потока. Наиболее чувствительным фактором, обеспечивающим усиление энергии лучистого излучения, является длина пути воздуха в коллекторе. Из (2) следует, что зависимость скорости течения, которое создается при лучистом нагреве приземного воздуха, от коэффициента турбулентной вязкости, имеет вид кривой с минимумом. Критическое число Рейнольдса $Re_{kr} = \frac{V_{kp} \cdot R}{\nu}$, при котором скорость достигает минимальных значений

зависит от геометрических характеристик энергетической установки, длины перемещения потока, интенсивности солнечного излучения и физических свойств среды:

$$Re_{kr} = \frac{0,051}{\nu} \cdot \left[\frac{Q(1-\alpha)}{\rho C_p T} \cdot \frac{gR^4 H}{h} \cdot \hat{L} \left(1 + \frac{2}{\hat{L}^{0,4}}\right) \sqrt{1 + 2,5 \text{tg}^2 \theta} \right]^{1/3}. \quad (3)$$

Геометрические размеры коллектора, и критические значения скорости течения в трубе, изменяются непропорционально. Например, к разнице значений критической скорости всего в три раза приводит различие радиусов коллектора и турбулентного трения на два порядка. Затраты на преодоление критического значения коэффициента турбулентной вязкости на малой площади коллектора оказываются несоизмеримо меньшими, чем в энергоустановках с большими коллекторами. Критерием интенсификации преобразования лучистой энергии с вертикальной и горизонтальной конвекцией с вращением является степень надкритичности состояния потока. Степень рассогласования гидродинамических и тепловых движений по-разному проявляется в докритическом и закритическом режимах преобразования лучистой энергии. Докритический режим течения характеризуется стабилизацией гидродинамических движений. Энергия, которая поступает в систему без экранировки, рассеивается в тепло. В закритическом режиме течения, развивается неустойчивость гидродинамических и тепловых движений. Вязкая диссипация энергии экранируется. Возможность роста кинетической энергии потока, определяется исключительно энергообменом между турбулентными движениями различного масштаба.

Эксперимент

Для усиления низконапорных, термовосходящих вихревых течений, инициированных солнечным нагревом приземного коллектора, разработана модель «солнечный камин с трубой» [8]. Она содержала солнечные коллекторы нижнего и верхнего яруса с тангенциальными экранами-завихрителями и трубу (рис.1). Верхние поверхности коллекторов пропускали солнечное излучение, а нижние — оптически непрозрачны. Верхний коллектор выполнял те же функции, что и топочная камера камина. Нижний коллектор служил поддувальным резервуаром, регулирующим подачу наружного воздуха в трубу. Воздушные массы, спирально двигающиеся в нижнем коллекторе, попадая в зону температурного скачка, под внешней границей верхнего коллектора приобретали сдвиг скорости. Сдвиговые возмущения, проникая внутрь трубы, формировали движения типа микросмерча, энергия которого достаточно эффективно преобразовывала энергию лучистого нагрева воздуха в коллекторе.

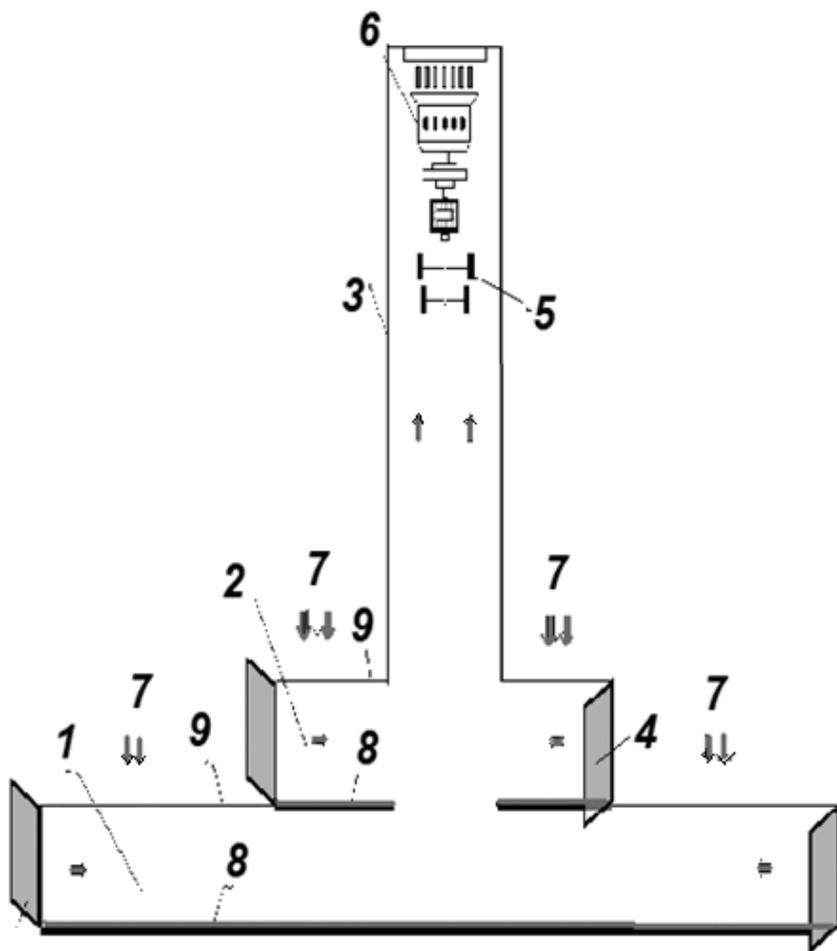


Рис.1. Схема экспериментальной модели солнечно-парниковой энергетической установки «солнечный камин с трубой». 1, 2 — коллекторы нижнего и верхнего яруса, 3 — труба, 4 — тангенциальные экраны, 5 — ветроколесо, 6 — турбина, 7 — источник лучистого нагрева, 8 — непрозрачное покрытие коллекторов, 9 — прозрачное для видимого излучения покрытие коллекторов.

Каркас секторов собирался из дюралевых уголков, которые в плане по периметру образовывали многоугольник. Нижняя поверхность парника представляла собой металлическую поверхность из стального листа. Верхняя поверхность изготавливалась из оргстекла. В центральной части верхнего коллектора к каркасу же-

ство прикреплялась обечайка, в которую устанавливалась труба из текстолита. В верхней части трубы помещалось координатное устройство, с помощью которого осуществлялось перемещение измерительных датчиков в горизонтальной плоскости. На периферии коллекторов закреплялись тонкие дюралевые полоски - тангенциальные экраны. Их положению по отношению к периметру коллекторов придавалась различная ориентация. Для измерений скорости вихревого потока в экспериментальной модели солнечно-вихревой электростанции использовался терморезисторный анемометр [9].

Экспериментальный образец установки «солнечный камин с трубой», состоял из шести секторов двухъярусно коллектора-парника, стыкующихся друг с другом (табл. 1).

Таблица 1.

Параметры экспериментальной энергоустановки

Наименование параметра	Значение параметра
Высота нижнего коллектора, м	0,03
Высота верхнего коллектора, м	0,03
Число экранов нижнего коллектора	24
Число экранов верхнего коллектора	12
Высота трубы, м	0,12
Диаметр трубы, м	0,1
Радиус нижнего коллектора, м	0,15
Радиус верхнего коллектора, м	1,5
Максимальная мощность лучистого нагрева, Вт	500

Обсуждение результатов

Изучалось влияние на интенсивность потока, генерируемого в трубе экспериментальной установки, разности температур воздушных масс в коллекторе и окружающей среде, и различной комбинации углов входа воздуха в коллекторы. Кроме того, варьировалась глубина воздушного слоя в коллекторах, радиус трубы и размер коллекторов. Установлено, что воздействие верхнеуровневого углового момента на интенсивность вращения носит избирательный характер. Вращение максимально усиливалось при углах входа потока в верхний коллектор равных 45° . Суммарный расход, входящего в вихрь потока при наличии надприземной закрученности, заметно увеличивался. На рис. 2 представлены результаты расчетов по формуле (2) и измерений коэффициента преобразования лучистой энергии.

Закрученный поток позволял существенно увеличить преобразование лучистой энергии по сравнению с прямооточным конвективным струйным течением. Из сравнения с теоретическим значением $\mu = 0,31\%$, полученным для термика, следует, что в установках «солнечная труба с камином» закрутка конвективной струи, горизонтальная разность температур позволяют практически заметно увеличивать долю лучистой энергии, преобразуемой в энергию вращающихся течений при вертикальной и горизонтальной конвекции.

С точки зрения энергоотдачи вихревое течение, формируемое горизонтальной и вертикальной конвекцией существенно эффективнее прямого конвективного потока. Анализ формул (2), (3) позволяет заключить, что эффективностью гидродинамического преобразования солнечной энергии можно управлять путем подбора оптимального соотношения между площадью и высотой коллектора, диаметром и высотой трубы, а также переходом к закритическому режиму течения. Наиболее доступный способ регулирования мощности потока в парниковых электростанциях связан с изменением высоты коллектора (рис.3).

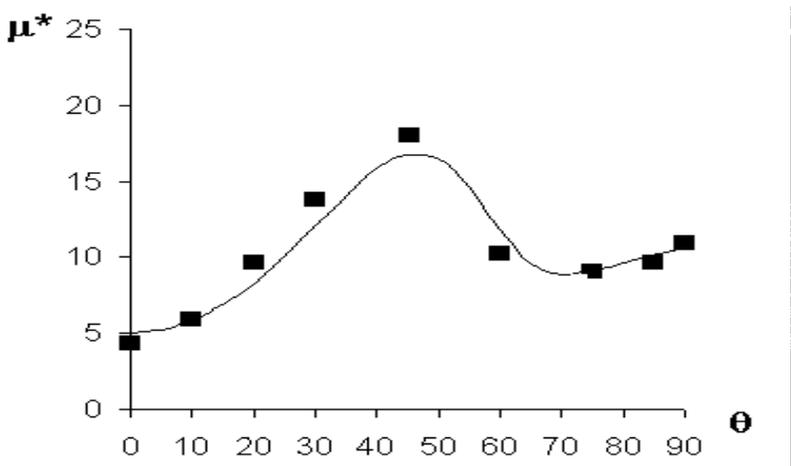


Рис. 2. Коэффициент μ^* преобразования энергии лучистого излучения в энергию конвективно-закрученного течения, нормированный на значение для конвективного вертикального незакрученного потока, при различных углах входа θ в коллектор и верхнеуровневой закрутке 45° . Сплошная линия — расчет по формуле (2), точки — эксперимент.

Уменьшение высоты коллектора не требует дополнительных затрат и специальных инженерных решений, которые нужны при увеличении геометрических размеров трубы. Поэтому условие оптимальности работы парниковых преобразователей солнечной энергии следует в первую очередь определять по предельно реализуемой высоте коллектора, обеспечивающей высокую температуру воздуха не в ущерб расходу. Помимо использования для этой цели внешней закрученности потока, входящего в коллектор, нельзя исключать из рассмотрения и другие способы удлинения пути перемещения воздушной массы. В том числе, принудительное прохождение воздуха через систему циркуляционных ячеек, организованных внутри коллектора. Создание ячейистой структуры течения может быть осуществлено, при конвективном потоке (ветер) и закрученном (вихрь), например, с помощью неоднородной пространственной локализации концентрированного солнечного излучения, проникающего в коллектор.

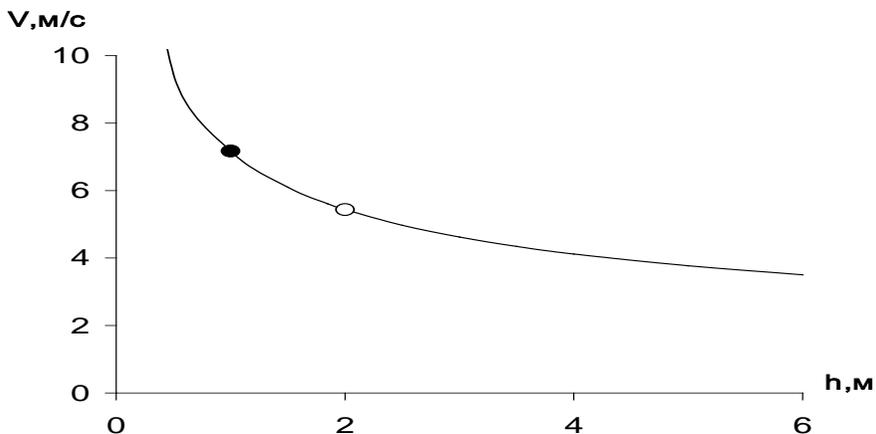


Рис. 3. Зависимость скорости воздуха в трубе испанской энергоустановке от высоты коллектора при организации вихревого преобразования солнечной энергии с горизонтальной и вертикальной конвекцией. Светлым кружком обозначена скорость, достигнутая при эксплуатации установки, черным кружком — расчетная по формуле (1) скорость при уменьшении высоты коллектора в два раза.

Выводы

Решение задачи о генерации искусственного ветра лучистым нагревом приземного слоя подтверждает перспективность учета завихренности вертикального и горизонтального конвективного течения. Установлена связь внешней турбулизации течений с эффективностью преобразования энергии парниковых конвективно закрученных потоков, формирующихся при концентрации инфракрасной составляющей солнечного излучения. Применение вихревых преобразователей солнечной энергии целесообразно в комбинированном сочетании с другими системами альтернативной энергетики для децентрализованного энергообеспечения.

Литература

1. Соловьев А.А., Солодудин А.Д. Конвективный вихрь-преобразователь солнечной энергии // *Вестні Акадэміі Наук БССР, сер. фіз. энэрг. нав.* 1989. №1. С. 25-29.
2. Голицын Г.С. Введение в динамику планетных атмосфер Л.: Гидрометеоиздат. 1973, С.104.
3. Соловьев А.А. Парниковые солнечно-ветровые электростанции // *Возобновляемые источники энергии*. М.: Геофак, МГУ, 2003. С. 67-78.
4. Schlaich J. The solar chimney. Stuttgart: Axel Menges, 1995. 154 с.
5. Parker B. World's first down under // *ReFocus*. 2003. №6. P. 44-45.
6. Paki M.M. and Sherif S.A. On a simple model for solar chimneys // *Int. Journ. Energy Research*. 1999. V 23, №.4. P. 345-349.

7. Игнаев В.И. Теоретическая модель молодого тропического циклона // Тр. Восточно-Сибирского технологического института. 1969. Вып.1. С. 1-12.
8. Соловьев А.А., Павловский К.П. Персональная вихревая энергетическая установка / Патент 2169859 РФ, 2001.6 с.
9. Соловьев А.А., Павловский К.П. Персональные солнечно- вихревые электростанции // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2003. Ч.1. С. 203-206.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОЗДУХОРЕГУЛИРОВАНИЯ В ИСПАРИТЕЛЬНЫХ БАШЕННЫХ ГРАДИРНЯХ

А.А.СОЛОВЬЕВ

Аннотация. Рассматривается вариант использования методов физического и компьютерного моделирования тепломассообмена и аэродинамики в башенных градирнях с естественной тягой и противоточным движением теплоносителей применительно к выявлению влияния процессов воздухоулучшения на повышение тепловой и экологической эффективности испарительного и контактного теплообмена.

Ключевые слова: физическое и математическое моделирование, градирни, тепловая, экологическая эффективность, воздухоулучшающие устройства.

Введение

В башенных градирнях, которые широко используются в качестве теплообменников современных крупномасштабных электростанций возникают трудности достижения эффективного охлаждающего эффекта при высоких температурах окружающей среды. Работа градирен в жарких климатических условиях сопровождается повышенным выносом паро-воздушной капельной смеси в атмосферу. К усовершенствованиям, предназначенным для повышения эффективности охлаждения оборотной воды в башенных градирнях с естественной тягой и решения экологических задач, относятся устройства регулирования интенсивности и направленности охлаждающих воздушных потоков [1]. Теоретическое обоснование технологии воздухоулучшения в гидроохлаждающих теплообменниках электростанций до сих пор основывается на алгебраической балансовой модели Меркеля [2], несмотря на многочисленные попытки усовершенствования расчетных методик [3, 4]. Создание модели тепломассообмена с адекватным учетом аэродинамических процессов в градирнях до сих пор относится к числу задач требующих своего решения. В настоящей работе обсуждаются некоторые предложения к ее рассмотрению.

Математическая модель башенной градирни с устройствами воздухоулучшения

Теоретическое описание процессов испарительного и контактного теплообменного охлаждения движущихся теплоносителей входит в класс нетривиальных задач двухфазного тепломассообмена и аэродинамики в многокомпонентных средах. Для решения таких задач в настоящее время активно используются методы

гибридного моделирования использующие наряду с теоретическими, экспериментальные модели. В литературе, посвященной исследованию охлаждения оборотной воды в мокрых башенных градирнях, представлены теоретические модели, в которых основной акцент делается на рассмотрение тепломассообменных процессов испарения в оросительных насадках при взаимодействии пленок и капель воды с паровоздушной средой [5]. Аэродинамические факторы, влияющие на степень охлаждения воды, учитываются опосредовано путем включения в модели алгебраических соотношений для расчета интегрального расхода воздушного теплоносителя и сопротивления его движению, что естественно, не отражает в полной мере влияние аэродинамических явлений на процессы тепломассообмена в градирнях.

В качестве исходного объекта моделирования выбран прототип башенной градирни с противоточным движением теплоносителей, содержащей оросительные насадки с пленочным распылением и устройства воздухоулучшения в виде поворотных щитов с вертикальной осью вращения [6]. Математическая модель градирни представляет собой краевую задачу для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих тепломассообмен между фазовыми состояниями вода-воздух-пар и аэрогидродинамическое течение теплоносителей.

Для описания тепломассообменных процессов при испарении использована предложенная в работе [7, 8, 9] система из дифференциальных уравнений баланса массы и энергии контактирующих фазовых состояний вода-воздух-пар.

$$\frac{dQ_w(x_3)}{dx_3} = -\gamma B \cdot [\rho_s(x_3) - \rho_v(x_3)], \quad (1)$$

$$\frac{dQ_v(x_3)}{dx_3} = \gamma B \cdot [\rho_s(x_3) - \rho_v(x_3)], \quad (2)$$

$$\frac{d}{dx_3} J_a(x_3) = \alpha b \cdot [T_w(x_3) - T_a(x_3)], \quad (3)$$

$$\frac{d}{dx_3} J_v(x_3) = -b \cdot \{ \alpha \cdot [T_w(x_3) - T_a(x_3)] - r \cdot \gamma \cdot [\rho_s(x_3) - \rho_v(x_3)] \}. \quad (4)$$

Здесь T – температура; ρ – плотность; J – удельная энтальпия (теплосодержание), Дж/кг (ккал/кг); Q – массовый расход (кг/с); b – высота оросителя, м. B – ширина оросителя, м; r – удельная теплота парообразования, кДж/кг; α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·°C); γ – коэффициент массоотдачи, кг/(м³·с). Индексы: a – (air) воздух; s – (saturated) насыщенный; v – (vapor) пар; w – (water) вода; система координат Ox_1, Ox_2, Ox_3 .

Уравнение (1) определяет изменение расхода воды вследствие испарения при движении вниз в пространстве между стекателями оросителей пропорциональное дефициту разности плотностей насыщенного пара и паров при температуре воды

на входе в градирню. Уравнение (2) характеризует расход пара и его вертикальный перенос. Уравнение (3) – поток энтальпии воздуха. Дифференциальным уравнением (4) определяется изменение с высотой оросителя теплосодержания пара, которое выражается через поток тепла при теплообмене и поток тепла при фазовом превращении вода-пар.

Для описания аэродинамических процессов и контактного теплообмена в модели градирни используется система дифференциальных уравнений движения (5), неразрывности(6), теплопроводности (7) и уравнение состояния (8).

$$\frac{\partial \vec{U}_a}{\partial t} + (\vec{U}_a \nabla) \vec{U}_a = -\frac{1}{\rho_a} \nabla p_a + \nu \Delta \vec{U}_a + g \vec{k} - 2 \left[\vec{\Omega}_a \times \vec{U}_a \right], \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \text{div}(\rho_a \vec{U}_a) = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} + (\vec{U}_a \nabla) T_a = \kappa \Delta T_a, \quad (7)$$

$$\rho_a = \rho_a(T_a) \quad (8)$$

Здесь \vec{U} – вектор скорости, м/с; T – температура, °С; p – давление, Па; ρ – плотность, кг/м³; g – ускорение силы тяжести, м/с²; t – время, с; ν и κ – соответственно, коэффициенты вязкости и теплопроводности, м²/с; $\vec{\Omega}$ – вектор угловой скорости вращения, с⁻¹.

Граничные условия для системы уравнений (1)-(4) записываются следующим образом. В нижнем сечении оросителя задаются температура воздуха и влагосодержание, давление парогазовой смеси, в верхнем сечении оросителя задаются расход и температура воды.

Граничные условия для системы уравнений (5)-(8) представляются следующим образом. В нижнем сечении башни на входе в ее подоросительное пространство задаются: температура наружного воздуха, влажность и давление, тепловой поток

$$C_a \rho_a \lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial x_3} = Q_a(x_2) \quad (C_a - \text{теплоемкость воздуха, } \lambda_a - \text{теплопроводность}), \quad \text{эн-}$$

тальпия воздуха, скорость входящих в башню течений, расход воздуха, закрутка потока $\Omega_a = \frac{U_a}{R} \sin \beta$, где β – угол входа потока в подоросительное пространство,

отсчитываемый от радиального направления, R – радиус опорного кольца башни. В верхнем сечении оросителя задаются: начальный расход воды, температура воды, энтальпия пара, для исходной температуры воды. Зависимость плотности воздуха от температуры при постоянном атмосферном давлении представлена уравнением

$$\rho_a(T_a) = \rho_a(\dot{O}_1) \frac{\dot{O}_1 (1 + 0,608f)}{\dot{O}_a},$$

где $T_0 = 20$ °С. Турбулентный характер теплообмена и массообмена при обтекании оросителей учитывался через соответствующие коэффициенты для плоской пластины :

$$\alpha = \frac{0,025 \cdot \lambda_a \cdot \text{Re}^{4/5}}{b - x_3}, \quad \gamma = \frac{0,025 \cdot D_a \cdot \text{Re}^{4/5}}{b - x_3},$$

где D_a - коэффициент диффузии. Для расчета числа Рейнольдса при обтекании воздушным течением плоской пластины оросителя использовалось соотношение $\text{Re} = \frac{(b - x_3) \cdot U_a}{\nu_a}$, которым U_a - модуль скорости воздушного потока.

В качестве исходных данных расчета использовались следующие геометрические характеристики: радиус башни R , расстояние между листами оросителей s , высота оросителей b и ширина каждого оросителя B ; высота входных окон в подоросительное пространство h , площадь орошения F , плотность орошения q , высота башни и расстояние a от оросителя до верхнего торца башни.

Таблица 1.
Технические характеристики натурной градирни и лабораторной модели.

Параметры	Натурная градирня	Лабораторная модель градирни
высота башни, м	91,0	0,9
диаметр опорного кольца башни, м	80,0	0,8
диаметр наименьшего кольца башни, м	40,0	0,4
диаметр верхнего кольца башни, м	43,4	0,44
площадь орошения, м ²	4 000	0,4
высота воздушных окон, м	5,5	0,05
ширина окон, м	12	0,12
номинальный расход воды, м ³ /ч	28 000	2,8
плотность орошения, м ³ /м ² ч	2÷8	2-4
номинальный расход воздуха, м ³ /ч	22 000 000	2200
ёмкость бассейна, м ³	10000 м ³	0,1

В результате вычислений определялись следующие величины: температура воды на выходе, расход воды на выходе из градирни, потеря воды за счет испарения, температура, и влажность воздуха на выходе из градирни. Реализация математической модели градирни была осуществлена в математическом пакете Matlab с представлением результатов в локальной базе данных и графическом интерфейсе.

Экспериментальный стенд с физической моделью градирни

Физическое моделирование процессов теплообмена и аэродинамики осуществлялось на экспериментальном стенде с маломасштабной градирней. Модель башенной испарительной градирни выполнена в соответствии с типичным натурным прототипом градирни (см. табл. 1). Экспериментальный стенд (рис. 1, 2) содержал три блока: блок модели градирни, блок измерительной аппаратуры и блок программного обеспечения. Блок модели градирни состоял из собственно модели градирни с воздухорегулирующими жалюзи, водораспределительного устройства с оросителем, водосборного бассейна, вентилятора-пылесоса. Измерительная система включала в себя аппаратуру, обеспечивающую получение данных, их сбор и передачу информации для последующей обработки. Эти функциональные операции осуществлялись измерительными датчиками температуры, скорости, влажности, накопителями данных измерений, визуализаторами текущей информации. Блок управления программно обеспечивал функционирование с заданными параметрами эксперимента термостата-бойлера с трубопроводами и насосами на подачу горячей воды к водораспределительному устройству градирни и отводу охлажденной воды из накопительного бака-бассейна в термостат.

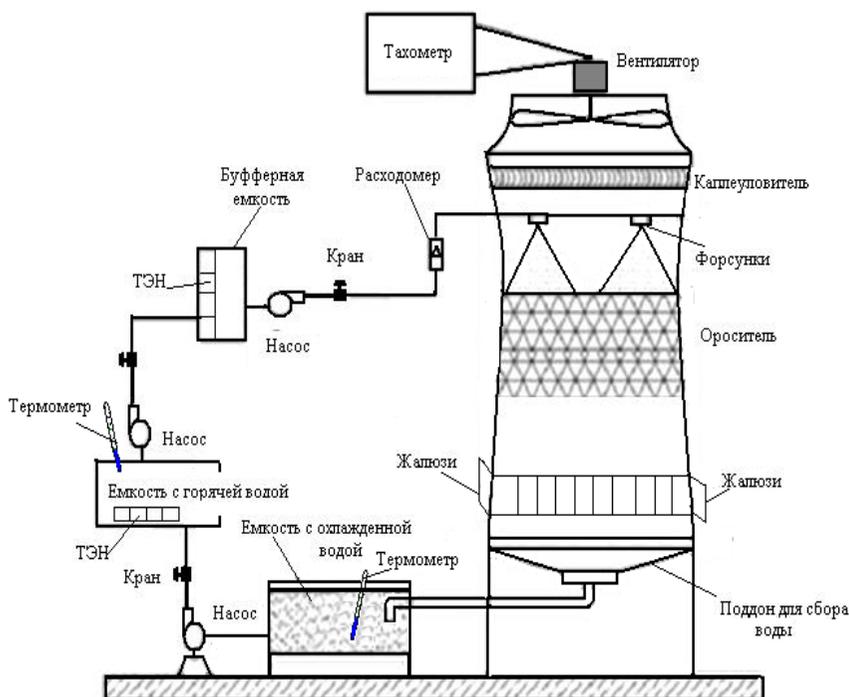


Рис. 1. Схема экспериментального стенда с физической моделью градирни



Рис.2. Общий вид физической модели градирни

В качестве исходного варианта воздухорегулирующего устройства в модели использовалось техническое решение, заявленное в патенте [6]. Конструкция воздухорегулирующего устройства содержала ветронаправляющие щиты – жалюзи с вертикальной осью вращения, устанавливаемые во воздухоходных проемах у основания башни. Угол поворота жалюзей дискретно регулировался в пределах 0-90°. Поток наружного холодного воздуха, проходящий через это устройство, изменяя свою интенсивность и направленность и встречаясь с вертикальными потоками горячей воды, передавал им приобретенный угловой момент, осуществляя контактное охлаждение в объеме подоросительного пространства.

Горячая вода, разбрызгиваемая на пластинчатые щитки оросителя модели градирни, стекала вниз, частично охлаждаясь при испарении и при обмене теплом с обтекающими элементы оросителя воздушными течениями. Неиспарившаяся вода после оросителя продолжала охлаждаться, взаимодействуя с потоками наружного воздуха, который подсасывался в башню после прохождения тангенциальных жалюзей.

В экспериментах с моделью определялась охлаждающая способность градирни при различных значениях разности температур входящей воды T_{1w} , наружного воздуха T_a , относительной влажности f_a , относительного расхода воздуха и воды $\lambda = Q_a/Q_w$, углов β установки воздухорегулирующих жалюзей.

Результаты и анализ

Сравнительная оценка качества работы охладителя с системой воздухорегулирования по данным численного и лабораторного моделирования выполнялась с использованием, введенного в работе [3] коэффициента совершенства или эффективности η , который характеризует глубину охлаждения по отношению к предельной охлаждающей способности и выражается через отношение перепада температур воды до T_{1w} и после T_{2w} охлаждения к разности начальной температуры и предельной температуры τ мокрого термометра

$$\eta = \frac{T_{1w} - T_{2w}}{T_{1w} - \tau}. \quad (9)$$

Проверка верификации численной модели для однородного потока жидкости была проведена путем сравнения результатов расчета с данными лабораторных измерений (рис.3). Анализ расчетных и экспериментальных данных позволил скорректировать подобрать эмпирические параметры.

Сравнения расчетных и измеренных значений проводилось путем определения температуры охлажденной воды T_{2w} от значений $T_{1w}=40,3-42^\circ\text{C}$ при различных температурах воздуха $T_a=22-25^\circ\text{C}$; влажности $f=25-60\%$, расхода воды $Q_w=2,8 \text{ м}^3/\text{час}$; расход воздуха $Q_a=900-3600 \text{ м}^3/\text{час}$. Для оценки по исходным данным расчетов и измерений вычислялись значения коэффициента эффективности. Отклонения расчетных и измеренных величин находилось в пределах $\pm 5\%$, что позволяет заключить, что математическая модель позволяет рассчитывать на адекватное описание процессов теплообмена и аэрогидродинамики градирни в при-

нятых граничных условиях. Была также исследована чувствительность модели к изменению параметров численного счета. При изменении числа узлов расчетной сетки на порядок до сотен единиц было установлено, что результаты расчетов слабо зависят от густоты расчетной сетки. Для практических вычислений оказывается достаточным небольшое число не превышающих десятки узлов сетки.

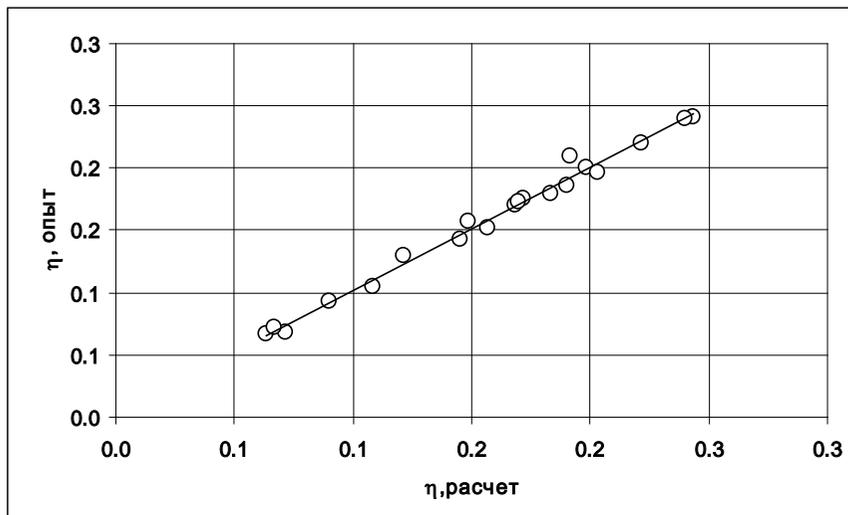


Рис. 3. Верификация численных расчетов (линия) и экспериментальных измерений (точки) эффективности охлаждающей способности в лабораторной модели градирни.

Обсуждая возможность воздействия процессов воздухоулучшения входящих в градирню охлаждающих потоков на тепловую эффективность приведем результаты численного модельного расчета теплового коэффициента полезного действия при различных углах χ установки поворотных устройств в воздухоходных окнах градирни. Вычисления были проведены для стандартных условий режима эксплуатации для расхода воды, подаваемой на градирню $Q_w=1 \text{ м}^3/\text{ч}$; температуры поступающей воды $T_{w1}=40^\circ\text{C}$; температуры наружного воздуха $T_a=25^\circ\text{C}$; относительной влажности воздуха $f=50\%$ и значений массового расхода воздуха $Q_a=840 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_a=268 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Обнаруживается весьма характерная зависимость тепловой эффективности от угла входа потока в градирню. Наибольшая глубина охлаждения градирни при фиксированном отношении расходов воздуха и воды $Q_a/Q_w=1,1$ приходится на значения угла входа потока воздуха 45° . Разница в к.п.д. между полностью открытой градирней и градирней с воздухоулучшающими устройствами, обеспечивающими угол входа потока в градирню 45 градусов составляет $3,9\%$. Для натуральных условий подобная эффективность должна приводить к росту выработки электрической мощности до значений порядка $1,2 \text{ МВт}$. С изменением соотношения

гидравлической и тепловой нагрузки эффективность охлаждающей способности испарительной башенной градирни изменяется. Влияние на эффективность и степень охлаждения воды в градирне наряду с направленностью входящих потоков, но и их интенсивности подтвердилось как в численных расчетах, так и в данных полученных при измерениях в лабораторных экспериментах.

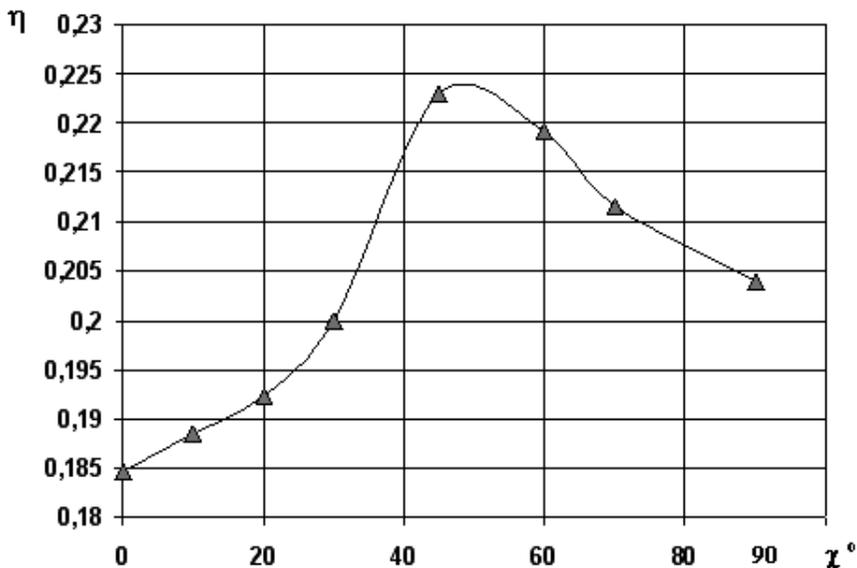


Рис. 4. График зависимости коэффициента тепловой эффективности при задании различных углов входа потока воздуха χ от 0° (положение закрыто) до 90° (открыто) и относительном расходе $Q_d/Q_w=1,1$. Точки – данные численного расчета.

На рис. 5 приведены характерные зависимости тепловой эффективности градирни от относительного расхода воздух-вода в сравнении с данными численного расчета (на графике – сплошные линии). Управлять величиной коэффициента тепловой эффективности градирни, как следует можно не только регулированием направленности входящих в подпоросительное пространство градирни воздушных потоков. Тепловой коэффициент полезного действия градирни подвержен изменению также и при помощи систем регулировки интенсивности воздушных потоков воздухорегулирующими устройствами устанавливаемых одновременно под фиксированным углом по всему периметру основания башни.

Из приведенных результатов следует отметить, что представление теплового КПД в координатах отношения воздух-вода свидетельствует об отличных от нуля значениях тепловой эффективности при отсутствии воздушных потоков. Линии пересекают ось ординат практически близких, но не нулевых значениях. Это озна-

чает, что в этих двух случаях, когда в градирне направляющими жалюзиами генерируется вихревой поток и когда течение в подросительном пространстве безвихревое, охлаждение воды обуславливается только испарением, которое одинаково для обоих режимов охлаждения.

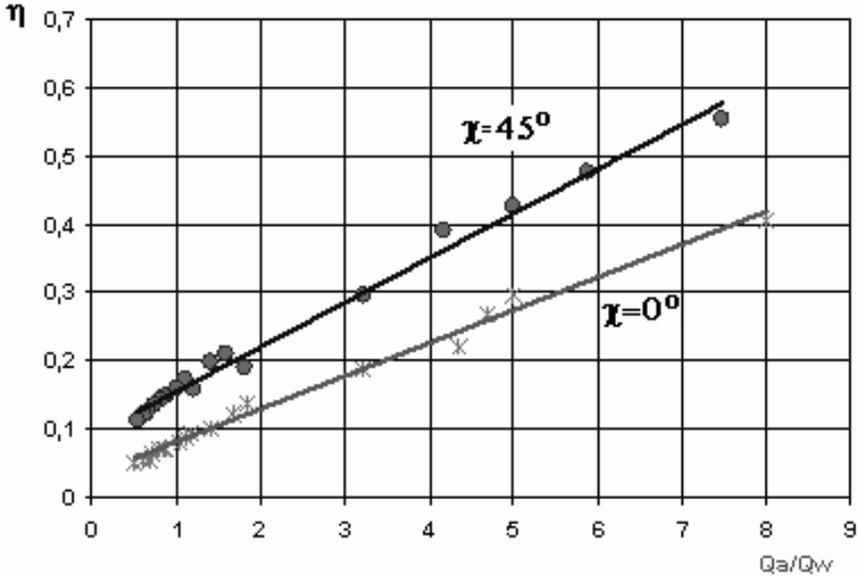


Рис. 5. Изменение теплового к.п.д. градирни в зависимости от соотношения интенсивностей аэродинамической и гидравлической нагрузки Q_a/Q_w в случае открытой градирни и градирни с закруткой потока по всему периметру воздухоподогревающими устройствами.

Анализ полей распределения моделируемых параметров градирни показывает, что поток атмосферного воздуха по пути своего движения кроме потока тепла, встречает разные элементы системы, у которых он тоже забирает тепловую энергию, теряя свою эффективность при работе с потоком тепла. Необходимо организовывать подход потоков воздуха непосредственно в местах прямого контакта с водными потоками. Это может быть достигнуто при заборе воздуха непосредственно из атмосферы (без его контакта с теплоносителем) и направлением его непосредственно в зону теплообмена с водой с тем расчетом, чтобы охлаждающий воздух, пройдя через эту зону, имел возможность выходить в атмосферу с минимизацией паразитарных контактов и аэродинамического сопротивления.

Выводы

Представлены результаты моделирования процессов аэродинамического и тепло массообменного взаимодействия воздушных и водных потоков в башенных испарительных градирнях. Установлено, что использование систем воздухоулавливания направленности и интенсивности потоков охлаждающих оборотную воду конденсаторов турбин электростанций может быть практически использовано для повышения тепловой эффективности роста выработки электрической энергии.

Литература

1. Мазуров В.Ф., Горбенко В.И., Фарфоровский В.Б., Кикиш О.В. Тамбур башенной градирни // АС СССР. 1968. № 380817.
2. Merkel F. Evaporative cooling // Journal of German Engineers. 1925. № 70. P. 123-128.
3. Берман Л.Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957.
4. Гельфанд Р.Е., Свердлин Б.Л., Тихонов А.В. Тепловые расчеты испарительных градирен и уравнение Меркеля // Электрические станции. 2012. №4. С.22-29.
5. Fisenko S.P., Petruchik A.I., Solodukhin A.D. Evaporative cooling of water in a natural draft cooling tower // Int. J. Heat Mass Transfer. 2002. №45. P.4683-4694.
6. Соловьев А.А., Нигматулин Р.И., Гусинская Н.В., Малых Ю.Б., Воздуховод башенной испарительной градирни с турбулизацией вихревого потока // Патент РФ. 2003. № 2196947.
7. Нигматулин Р.И., Гусинская Н.В. Тепловая эффективность испарительных градирен башенного типа // Теплоэнергетика. 2001. № 3. С.68-71.
8. Consuegro A.J., Kaiser A.S., Zamora B., Sánchez F. Numerical modeling of the drift and deposition of droplets emitted by mechanical cooling towers on buildings and its experimental validation // Building and Environment. 2014. №78. P. 53-67.
9. Нигматулин Р.И., Соловьев А.А. Основы гидромеханики. М.: Литтера. 2012. 400 с.

ОЦЕНКА СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СБРОСНОГО ПОТОКА ОТ ВОЛН
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИ ОПАСНЫХ
ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ

А.А. СОЛОВЬЕВ, Д.А. СОЛОВЬЕВ, Л.А. ШИЛОВА

Аннотация. Анализ исследований волн перемещения и их динамических воздействий на объекты водной инфраструктуры, свидетельствует о неполноте учета дисперсионной составляющей волновых движений в сбросных потоках. Существующие методы расчета параметров волн перемещения с зависимостью скорости распространения и волнового давления от длины волны, следует рассматриваться лишь в качестве нулевого приближенного учета роли дисперсионных процессов, сопровождающих распространение волн перемещения в речных потоках. Цель работы – повышение точности расчетов надежности, оборудования и вспомогательных механизмов гидротехнических сооружений и объектов водного хозяйства в условиях роста гидрологически опасных природных явлений в виде волн перемещения.

Используется аналитический метод расчета параметров волновых движений, построенный на определении условий совместности скачков и разрывов параметров состояния среды при переходе через фронтовые поверхности. Предложен вариант использования метода фронтовых характеристик для интегрирования уравнений неустановившихся течений в открытых потоках. Приведена схема решения дифференциальных уравнений неустановившихся движений и неразрывности течений в речных потоках с волнами перемещений при наличии сил сопротивлений.

В результате получены аналитические расчетные соотношения для скорости и силовых воздействий волн перемещения с дисперсионной зависимостью от длины волны. Выполнен анализ полученных решений с иллюстрацией динамических воздействий волновой дисперсии на объекты водной инфраструктуры. Предложенный способ уточненного расчета силового воздействия сбросного потока от волн перемещения на конструктивные элементы водохозяйственных и воднотранспортных объектов может найти применение при определении степени надежности гидросооружений и объектов водного транспорта. Полученные расчетные соотношения для определения кинематических и динамических характеристик дисперсии волн перемещения, целесообразно рекомендовать для дополнения существующих нормативных документов гидротехнического строительства.

Ключевые слова: наводнения, открытые потоки, нестационарные течения, условия совместности разрывов на фронте волны, дисперсия волн, волновое давление на тела.

Благодарности

Данная научно-исследовательская работа выполнена в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова, тема №АААА-А16-116032810088-8 (сбор и обработка данных, и разработка методики решения задачи) и ИО РАН, тема № 0149-2019-0002 (анализ полученных решений с иллюстрацией динамических воздействий).

Введение

В последнее время на территории России участились случаи повторяемости гидрологически опасных природных явлений, к которым, прежде всего, относятся наводнения (дождевые паводки и половодья) [1, 2]. Сезонная активизация этих процессов на реках отдельных регионов приводит к временному затоплению и подтоплению обширных территорий и зачастую наносят значительный ущерб населению и экономике. Наводнениям с катастрофическими последствиями подвержена территория страны в 150 тыс. кв. км, на которой расположено более 300 городов, десятки тысяч населенных пунктов. Среднегодовое (прямой и косвенный) ущерб от наводнений в настоящее время оценивается суммой свыше 40 млрд руб. в год [21]. Ежегодно в разных регионах России происходят наводнения, которые повторяются в отдельных регионах по несколько раз в год.

Большой масштаб данная проблема приобретает в Сибирском федеральном округе, где в конце июня 2019 г. в Иркутской области на реке Ия в городе Тулун произошло катастрофическое наводнение. Причина затопления населенных пунктов Иркутской области включает не только спровоцированный сильными дождями выход рек из берегов, но и аварии на не справившихся со своими функциями гидротехнических сооружений.

В связи с этим расчеты неустановившегося движения воды в открытых потоках, с определением кинематических и динамических характеристик волн перемещения (волн пусков, паводков, прерывных и других волновых движений аналогичных типов), относятся к числу актуальных запросов эксплуатации водного транспорта и строительства гидросооружений.

Наиболее распространенный тип волн перемещения, так называемые волны прорыва, оценки волновых нагрузок, которых особенно необходимы при определении воздействий на различные гидросооружения. Не меньшую практическую значимость имеют результаты расчета динамических нагрузок от волн излива, которые перемещаются с большой скоростью, приводят к значительному снижению уровня воды и риску обрушению береговых укреплений [3].

Теоретические задачи, связанные с решением уравнений неустановившегося движения водных потоков в открытых руслах (каналах) рассматривались как теоретически в работах [4–10], так и в лабораторных экспериментах и натурных наблюдениях [11–17]. Лабораторные эксперименты, а тем более натурные исследования нестационарных движений на воде, типа волн прорыва и излива с катастрофическими последствиями, в силу сложности и трудоемкости реализации, весьма немногочисленны и зачастую позволяют получить лишь качественные результаты. Методы решения и результаты волновых задач с частичным определением кинематических и динамических параметров волн нашли отражение в действующих нормативных документах [22]. Тем не менее, остались нерассмотренными в достаточном объеме вопросы, касающиеся учета роли дисперсионных процессов при аварийных ситуациях, происходящих в результате возникновения и распространения волн перемещения в речных потоках [18]. Представленные далее методы расчета параметров волн перемещения предусматривающие определение зависимостей скорости распространения и волнового давления от длины волны следует рассматриваться лишь в качестве первого приближения. Для получения более точных величин нагрузок необходимо выполнять расчеты по усложненным вы-

числительным методикам с реализацией на основе суперкомпьютеров высокой производительности [19].

Следует отметить, что вычисления параметров волн попусков и паводков являются одной из наиболее трудных проблем волновой гидравлики [20]. Одномерные, но с нелинейными членами уравнения неустановившегося движения воды Сен-Венана, в общем случае, решить аналитически не удастся. Отдельные же имеющиеся решения не имеют значения для практических расчетов волн попусков и паводков в реках, из-за пренебрежения влиянием сил сопротивления, играющих важную роль в связи с волновой дисперсией волн в реках и каналах.

Материалы и методы

Достижение успеха в решении практических вопросов, связанных с расчетами дисперсионных характеристик волн перемещения при неустановившихся движениях воды в реках, в немалой степени зависит не только от разработки теории, но и от того, как будут применяться существующие методы расчета. В настоящее время существует достаточное количество как строгих, так и упрощенных подходов к решению волновых задач с определением скоростей распространения волн перемещения. Что, тем не менее, не позволяет получать адекватные ответы о границах применимости, точности и надежности, получаемых в этих методиках расчетных соотношений.

Задачей полного расчета параметров волн перемещения при неустановившихся движениях в открытых потоках является определение двух характеристик, однозначно описывающих состояние одномерного потока (например, расхода Q и глубины h) в функции от координаты по течению L и времени t , т. е. получение зависимостей вида:

$$Q = Q(L, t); \quad h = h(L, t).$$

Зная изменение расхода и уровня глубины любых створ реки в произвольный момент времени можно найти и другие характеристики открытых потоков при нестационарных режимах течения. Для определения таких параметров волн перемещения, как скорость, и давление на тела и поверхности, размещенные в воде достаточно выполнить частичный расчет неустановившегося движения воды. Вполне удовлетворительного результата от такого рода частичного расчета с определением зависимостей скоростей и волновых давлений от длины волны (частоты) спектрального состава волн перемещения, удастся добиться с применением метода характеристик. В этом методе вместо прямого интегрирования производится анализ параметров разрыва совместимых движений, разделенных фронтными поверхностями в виде скачков неразрывности величин и их производных, входящих в уравнения переноса массы и импульса. Рассмотрим далее принципиальные положения и алгоритмические соотношения этого метода.

Идея метода анализа параметров состояния среды, разделенной фронтом волн для определения параметров волновых движений, принадлежит Адамару [23]. Рассмотрим расчетные соотношения метода в условии того, что пространство заполнено средой, обладающей единственным свойством – осуществлять перемещение частиц ее заполняющих. В заданной среде можно представить движение такого рода, когда некоторая перемещающаяся поверхность $\varphi(x_1, x_2, x_3, t) = 0$ делит ее на две области. В каждой из этих областей существует непрерывная вместе со

своими производными функция, характеризующая известным образом состояние движения этой среды. Однако при переходе через эту поверхность последняя функция вместе со своими производными до какого-либо порядка терпит разрыв непрерывности. Состояние движения среды можно характеризовать переменным вектором или переменным скаляром — это для поставленной задачи не имеет существенного значения. Адамар ограничился установлением условий совместности только для случая, когда при переходе через поверхность, разделяющую пространство на две области, терпят разрыв непрерывности, производные от функции какого-либо одного порядка, например, второго. Если вектор скорости течения среды \vec{V} и его первые производные по координатам и времени непрерывны при переходе через поверхность $\varphi(x_1, x_2, x_3, t) = 0$, а вторые производные терпят разрыв, то в результате, должны выполняться следующие пространственные условия ($i, j = 1, 2, 3$):
$$\delta \frac{\partial^2 \vec{V}}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\bar{\Lambda}_{2v}}{H^2} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \frac{\partial \varphi}{\partial x_j}$$
 и временные условия
$$\delta \frac{\partial^2 \vec{V}}{\partial t^2} = \frac{\bar{\Lambda}_{2v}}{H^2} \cdot \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2.$$

Здесь символ δ обозначает операцию перехода через поверхность разрыва, H - первый дифференциальный параметр от функции

$\varphi \cdot H = \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \nabla \varphi$, где $\bar{\Lambda}_{2v}$ есть произвольный вектор (параметр Ламе).

В дальнейшем соотношения совместимости движений, были распространены на тот случай, когда при переходе через поверхность разрывов меняются скачком сама функция и все ее производные до какого-либо определенного порядка. В этом случае, если какой-либо скаляр или вектор, например, скорость движения среды, обладают таким свойством, то мы будем иметь следующие тождественные и кинематические условия:

$$\delta \vec{V} = \bar{\Lambda}_{0v}, \quad (1)$$

$$\delta \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = \frac{\bar{\Lambda}_{1v}}{H} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\Lambda}_{0v}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\delta \frac{\partial^2 \vec{V}}{\partial t^2} = \frac{\bar{\Lambda}_{2v}}{H^2} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + \frac{\partial}{\partial t} \frac{\bar{\Lambda}_{1v}}{H} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial^2 \bar{\Lambda}_{0v}}{\partial t^2} \quad (3)$$

$$\delta \frac{\partial \vec{V}}{\partial x_i} = \frac{\bar{\Lambda}_{1v}}{H} \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\Lambda}_{0v}}{\partial x_i} \quad (4)$$

$$\delta \frac{\partial^2 \vec{V}}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\bar{\Lambda}_{2v}}{H^2} \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\bar{\Lambda}_{1v}}{H} \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} + \frac{\partial^2 \bar{\Lambda}_{0v}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (5)$$

Для функций, терпящих разрыв непрерывности до $(n+1)$ порядка производных, тождественные условия можно найти по формуле:

$$\delta \frac{\partial^n \vec{V}}{\partial x_i^\alpha \partial x_j^\beta \partial x_k^\gamma} = \frac{\bar{\Lambda}_{nv}}{H^n} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)^\alpha \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right)^\beta (\varphi)^\gamma + \frac{\partial}{\partial x_i} \delta \frac{\partial^{n-1} \vec{V}}{\partial x_i^{\alpha-1} \partial x_j^\beta \partial x_k^\gamma}.$$

Чаще всего имеют дело с разрывами непрерывности не выше второго порядка. Произвольные векторные функции $\bar{\Lambda}_0, \bar{\Lambda}_1, \bar{\Lambda}_2$ называются параметрами разрывов непрерывности нулевого, первого и второго порядка. Эту терминологию мы сохраним и для скалярных функций.

Помимо тождественных условий, в дальнейшем нам придется пользоваться еще двумя понятиями. Будем называть в неподвижной среде скоростью перемещения фронта разрывов C отношение бесконечно-малого перемещения нормали поверхности dn к протекшему времени, т. е. $C = \frac{dn}{dt}$.

Эта скорость аналитически с помощью кинематических условий может быть представлена как: $C = \frac{dn}{dt} = -\frac{1}{H} \frac{\partial \varphi}{\partial t}$.

Если среда движется, то скорость перемещения фронта разрывов, согласно принципу Галилея, изменится; в этом случае будут иметь место соотношения следующего вида: $\Xi = -\frac{1}{H} \frac{d\varphi}{dt} = -\left\{ \frac{1}{H} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + (\bar{V}, \bar{V} \varphi) \cdot \frac{1}{H} \right\}$.

Скорость Ξ называют скоростью распространения фронта разрывов; через V_n обозначена проекция скорости движения среды на нормаль к фронту.

Использование метода совместимости характеристик процессов на фронтовых поверхностях позволяет вместо интегрирования дифференциальных отношений, определяющих состояние физического объекта, производить их преобразование к алгебраическим разностям. При этом в качестве начальных и краевых условий для характеристики причин зарождения изучаемых состояний использовать соотношения между параметрами разрыва (параметрами Ламе). В итоге с помощью метода операторных разностей минуя интегрирование, мы получаем из дифференциальных уравнений алгебраические уравнения, а вместо начальных и граничных условий – алгебраические соотношения для параметров Ламе. Из решения системы алгебраических уравнений могут быть получены зависимости для искомым параметров.

Схема решения задач с использованием метода операторных разностей сводится к следующему. Обозначим искомые функции, как $\Phi^{(j)}$. Предположим, что относительно первых κ функций, т.е. для $\nu=1,2,3\dots\kappa$ система дифференциальных уравнений будет системой второго порядка, а относительно последующих функций для $\nu=\kappa+1\dots\kappa+\ell$ системой первого порядка. Тогда дифференциальные уравнения, которые описывают изучаемое явление, могут быть представлены в виде:

$$\sum_{\nu=1}^{\kappa} \sum_{i,j=1}^4 a_{x_i x_j}^{\mu\nu} \Phi_{x_i x_j}^{(\nu)} + \sum_{\nu=\kappa+1}^{\kappa+\ell} \sum_{i=1}^4 a_{x_i}^{\mu\nu} \Phi_{x_i}^{(\nu)} + F^{(\nu)} = 0 \quad (6)$$

Величины $a_{x_i x_j}^{\mu\nu}, a_{x_i}^{\mu\nu}, F^{(\nu)}$ могут зависеть от всех координат (x_1, x_2, x_3, x_4) , где $x_4 = t$ и от самих функций $\Phi^{(j)}$ и их первых производных $\Phi_{x_i}^{(k+1)}, \Phi_{x_i}^{(k+2)} \dots \Phi_{x_i}^{(k+\ell)}$.

Составим $(\kappa + \ell)^2$ равенств

$$\left. \begin{aligned} \Theta_{\mu\nu} &= \sum_{i,j=1}^4 a_{x_i x_j}^{\mu\nu} \varphi_{x_i} \varphi_{x_j} & \nu &= 1, 2, \dots, \kappa \\ \Theta_{\mu\nu} &= \sum_{i,j=1}^4 a_{x_i}^{\mu\nu} \varphi_{x_i} & \nu &= \kappa + 1, \dots, \kappa + \ell \end{aligned} \right\} \mu = 1, 2, \dots, \kappa + \ell \quad (7).$$

Приравнявая определитель матрицы

$$\det \|\Theta_{\mu\nu}\| = 0 \quad (8)$$

можно найти скорость распространения поверхности $\varphi(x_1, x_2, x_3, x_4) = 0$, и определить функцию $\varphi(x_1, x_2, x_3, x_4)$,

После применения к системе уравнений (6) операторных формул (1)-(5) получим систему алгебраических уравнений.

$$\sum_{\nu=1}^{\kappa} \sum_{i,j=1}^4 a_{x_i x_j}^{\mu\nu} \delta\Phi_{x_i x_j}^{(\nu)} + \sum_{\nu=\kappa+1}^{\kappa+\ell} \sum_{i=1}^4 a_{x_i}^{\mu\nu} \delta\Phi_{x_i}^{(\nu)} = 0 \quad (9)$$

Откуда в записи через параметры Ламе получаем

$$\sum_{\nu=1}^{\kappa} \Lambda_{2\nu} \Theta_{\mu\nu} + \sum_{\nu=\kappa+1}^{\kappa+\ell} \Lambda_{1\nu} \Theta_{\mu\nu} = 0 \quad (10),$$

где $\mu = 1, 2, \dots, \kappa + \ell$.

Из системы однородных линейных уравнений относительно $\Lambda_{1\nu}, \Lambda_{2\nu}$ с помощью уравнения (10) для определителя при неравенстве нулю одного из миноров можно выразить все Λ_{ν} через один параметр Ламе и установить связь между характеристиками процесса в виде искомым зависимостей.

Результаты

Задачей расчета волновых движений в неустановившихся открытых потоках является определение характеристик, описывающих состояние волн в рамках одномерного течения – скорости волны c , высоты волны h , давления волны p в функции от координаты распространения L , длины волны λ и времени t , т. е. получение зависимостей вида: $c(L, \lambda, t)$, $h(L)$, $p(L, \lambda)$. В качестве предпосылок к расчетам характеристик волн перемещения будем исходить из системы одномерных нелинейных уравнений Сен – Венана для неустановившихся открытых течений. В систему уравнений входит уравнение неразрывности (11) (баланс массы жидкости, проходящей на расстояние L через поперечное живое сечение площадью S со скоростью потока V):

$$\frac{\partial S}{\partial t} + S \frac{\partial V}{\partial L} + V \frac{\partial S}{\partial L} = 0. \quad (11)$$

Уравнение движения (2) (баланс количества движения, при котором изменение количества движения при локальном и переносном ускорении течения компенсируется силами напора и диссипативными силами сопротивления):

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial L} = -\frac{g}{B} \frac{\partial S}{\partial L} + \nu \frac{\partial^2 V}{\partial L^2} \quad (12)$$

Здесь B – характерный поперечный размер речного русла или канала, g – ускорение свободного падения, ν – кинематический коэффициент вязкости.

Следует отметить, что такой вид уравнений переноса массы и импульса в неустановившихся открытых течениях определяется спецификой физических процессов, приводящих к волнам перемещения в речных потоках. Это одномерность движений, обусловленная преимущественностью направленного переноса вдоль русла реки или канала. Это незначительность кривизны поперечных профилей скорости, которая заменяется средними скоростями по сечению, корректируемыми поправочными коэффициентами. Это волны, на порядок превышающие подъем уровня воды в открытых потоках. Высоты подъема воды по наблюдениям на порядок превышают глубины речных потоков. Подобные волны идентифицируют как волны перемещения. Они возникают при регулировании расхода в гидроэлектростанциях, разрушениях плотин, гидравлических прыжках, в период паводка, от вхождения приливной волны в устье рек. Важной составляющей динамики волн перемещения является зависимость их характеристик от длины волны, проявляющейся при воздействии на движение сил сопротивления, связанных с внутренним вязким и турбулентным трением водной среды. Все существующие оценки динамических воздействий волн перемещения в открытых потоках на гидросооружений и различные преграды, размещенные в речных акваториях, в том числе методики расчета волновых нагрузок в нормативной документации, получены в решениях задачи с уравнениями неразрывности (11) и движения (12) в отсутствие сопротивления. Объективно для получения точных решений полных уравнений неустановившихся течений с учетом вязких диссипативных членов требуется использование менее трудоемких методик расчета и хорошей вычислительной техники. Обращает на себя внимание, что в задаче расчета параметров волн перемещения вне поля зрения остался не востребованным метод фронтовых характеристик, изложенный в предыдущем разделе. Разрывы и скачки характеристик движения, входящих в уравнения процесса и краевые условия, выражаются через самосогласование или совместность состояний, разделенных фронтовой поверхностью через систему параметров разрыва. Нахождение через определитель матрицы, составленной из параметров разрыва, искомых значений параметров позволяет получать требуемые в задаче зависимости характеристик волн перемещения.

Рассмотрим возможность такого подхода к определению параметров дисперсии волн перемещения из системы уравнений (11), (12). Предположим, что при переходе через фронтовую поверхность неустановившихся движений производные всех величин этих уравнений первого и второго порядка по времени и координате терпят слабые скачки разрыва. Используя алгоритмические соотношения метода фронтовых характеристик (см. формулы (6-10)), получим:

$$-\Lambda_v c + \Lambda_v V_n = -\frac{g}{B} \Lambda_s + v \Lambda_{2v}, \quad (13)$$

$$-\Lambda_s c + \Lambda_s V_n = -\Lambda_v S_n. \quad (14)$$

Здесь Λ_v, Λ_{2v} - параметры скачка слабого разрыва соответственно первой и второй производной скорости течения V от времени и координаты; $\Lambda_s - \Lambda_v, \Lambda_{2v}$ параметр скачка производной от площади живого сечения по координате V_n - переносная скорость потока, S_n - площадь живого сечения потока в плоскости поперечного сечения речного русла

Для нахождения искомой зависимости необходимо из двух уравнений (13), (14) исключить три неопределенных параметров разрыва. Для обеспечения определенности уравнений используем условие возникновения волны перемещения, в которой имеет место следующая зависимость скорости от частоты

Будем считать, что волна перемещения, формирующаяся в неустановившемся открытом потоке, характеризуется следующей зависимостью скорости частиц от координаты L и времени t и частоты ω :

$$V = V_0 e^{i\omega \left(t \pm \frac{L}{c} \right)}. \quad (15)$$

Для такой зависимости скачки производных по времени, выраженные в алгоритмических соотношениях метода характеристик, приводят к следующим выражениям: $\delta \frac{\partial V}{\partial t} = -\Lambda_v c = i\omega \delta V$, $\delta \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = -\Lambda_{2v} c^2 = -\omega^2 \delta V$.

Через отношение двух выражений получаем связь параметров скачка производных скорости первого и второго порядка

$$\frac{\Lambda_{2v}}{\Lambda_v} = -\frac{i\omega}{c}. \quad (16)$$

Принимая скорость волны в виде $c = c_1 + ic_2$ уравнение (16) преобразуется к

$$\text{виду: } V = V_0 e^{-\frac{\omega c_2}{c_1 + c_2^2} L} e^{i\omega \left(t \pm \frac{c_1 L}{c_1 + c_2^2} \right)}.$$

Это уравнение волны, распространяющейся в положительном или отрицательном направлении со скоростью $C = \frac{c_1^2 + c_2^2}{c_1}$.

Исключая из системы уравнений (13), (14), (16) параметры разрыва, находим для положительной волны $(c - V_n)^2 - \frac{iv\omega}{c}(c - V_n) = \frac{gS}{B}$.

Отделяем в этом уравнении мнимую часть комплексной скорости от действительной и получаем $C = V_n \pm \sqrt{\frac{gS}{B} + \frac{v \cdot \omega \cdot V_n}{C}}$.

Учитывая связь волнового числа $k = 2\pi/\lambda$ и отношения частоты волны к скорости $k = \omega/C$ для скорости волны перемещения имеем следующее дисперсионное соотношение

$$C = V_n \pm \sqrt{\frac{gS}{B} + \frac{2\pi v \cdot V_n}{\lambda}}. \quad (17)$$

Это дисперсионное соотношение отличается от хорошо известной формулы Лагранжа, полученной без учета сопротивления, вторым слагаемым под корнем. В отличие от соотношения Лагранжа, «вязкая» дисперсия может быть заметной для коротких волн при наличии интенсивного турбулентного трения. В связи с этим разбегание волнового пакета при $\nu k V_n > gh$ может оказаться настолько значительным, что не исключена возможность экранировки волн с соответствующими волновыми числами.

Проявление «вязкой» дисперсии должно определенным образом сказаться и на оценках динамических воздействий волн перемещения на различные преграды на пути их распространения. Силовую нагрузку F волн на одиночную плоскую вертикальную преграду площади f можно выразить через зависимость динамического напора через скоростной напор потерянной скорости $(C - V_n)^2/2g$ в сле-

дующем виде:
$$F = \frac{\rho f}{2} \left(\frac{gS}{B} + \frac{2\pi v V_n}{\lambda} \right).$$

Здесь f (м²) – площадь преграды на пути волны; S (м²) – площадь живого сечения реки, B (м) – ширина реки по дну; V_n (м/с) – скорость течения реки; λ (м) – длина волны; ρ (кг/м³) – плотность воды; ν (м²/с) – коэффициент сопротивления.

F_0 (н) – силовое воздействие волн в отсутствие дисперсии:
$$F_0 = \frac{\rho f}{2} \left(\frac{gS}{B} \right).$$

Связь длины волны λ и высоты волны Δh воды по формуле Б.А. Бахметьева [24], полученной интегрированием уравнений Сен-Венана выражается следую-

щим соотношением:
$$\lambda = \frac{\Delta h \alpha Q^2}{J g S^3}.$$

В этой формуле Δh (м) – высота волны в двух створах реки; J – гидравлический уклон дна реки, Q (м³/с) – расход воды; α – коэффициент Кориолиса, S (м²) – площадь живого сечения реки.

С использование полученных соотношений были выполнены модельные расчеты с оценкой вклада дисперсионных составляющих в скорость распространения волн перемещения и силовые воздействия на сооружения размещенные в водных речных акваториях. Расчеты скорости по формуле (17) показали (рис.1), что дисперсия скорости наибольшую величину обнаруживает для коротковолновых составляющих спектра волны перемещения. Причем волна наибольшей амплитуды соответствует коротким волнам в спектре. В значениях скорости распространения фронта волны C в финальный период развития волны, когда движение для конкретного створа можно считать квазистационарным, не обнаруживается дисперси-

онная зависимость от длины волны. При этом изменение амплитуды волны практически замедляется и скорость C практически совпадает с расчетными значениями по классической формуле Лагранжа

$$C = C_o = V_n \pm \sqrt{\frac{gS}{B}} = V_n \pm \sqrt{gh} \quad (18)$$

Сравнение с данными для скорости распространения волны прорыва плотины на Усть-Маньчском водохранилище свидетельствует о подтверждении влияния волновой дисперсии, хотя величина спада скорости с длиной волны отмечается более интенсивная.

. Силовое воздействие волны перемещения с волновой дисперсией в наибольшей степени также проявляется для коротких длин волн в начальный момент времени. Как видно из данных расчетов, приведенных на рис.2 вклад волновой дисперсии в динамическую нагрузку на сооружения и преграды, размещенные на воде, может на порядок превышать значения, принимаемые при определении воздействий волн перемещения в классических расчетах, не учитывающих влияние дисперсионного фактора.

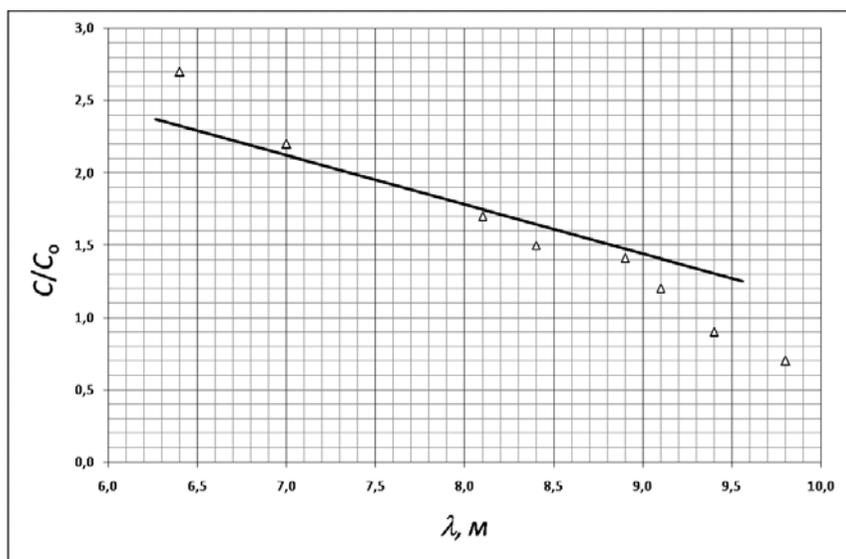


Рис. 1. Расчет отношения скоростей в волне перемещения с волновой дисперсией C и в ее отсутствии C_o для волн с длиной волны различной амплитуды при средней переносной скорости течения реки $V_n=2,86$ м/с, амплитудой волн в пределах $(9,6 > h > 6,2)$ м, коэффициентом сопротивления $10 \text{ м}^2/\text{с}$, начальным расходом течения реки $Q=1800 \text{ м}^3/\text{с}$ в русле шириной $B=64$ м. Треугольными маркерами представлены значения полученные на основе данных работы для волны прорыва на УстьМаньчском водохранилище [19].

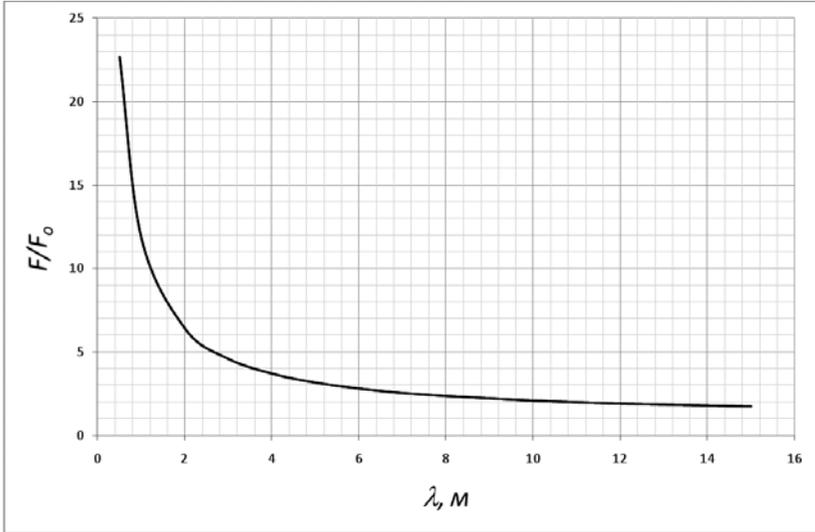


Рис.2. Расчет динамического воздействия на плоскую преграду на пути волны перемещения с дисперсионной зависимостью скорости от длины волны. Скорость течения реки $V_n=2,9\text{ м/с}$, высота волны $8,4\text{ м}$, коэффициент сопротивления $10\text{ м}^2/\text{с}$, начальный расход $Q=1800\text{ м}^3/\text{с}$.

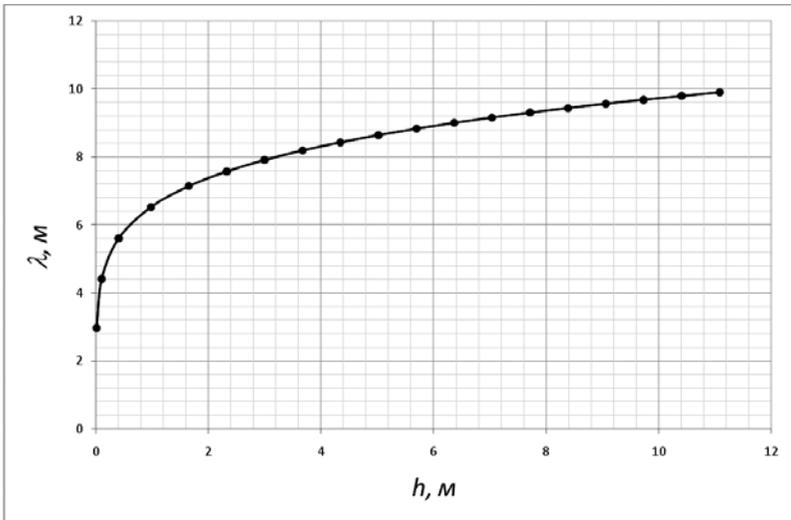


Рис.3. Расчетная зависимость длины волны λ с высотой волны перемещения h с исходным начальным расходом воды $Q=1800\text{ м}^3/\text{с}$. Обозначения: круглые маркеры – расчет по уравнениям Сен-Венана неустановившихся движений воды в открытых потоках, сплошная линия – тренд по формуле $\lambda = 6.5623h^{0.1715}$

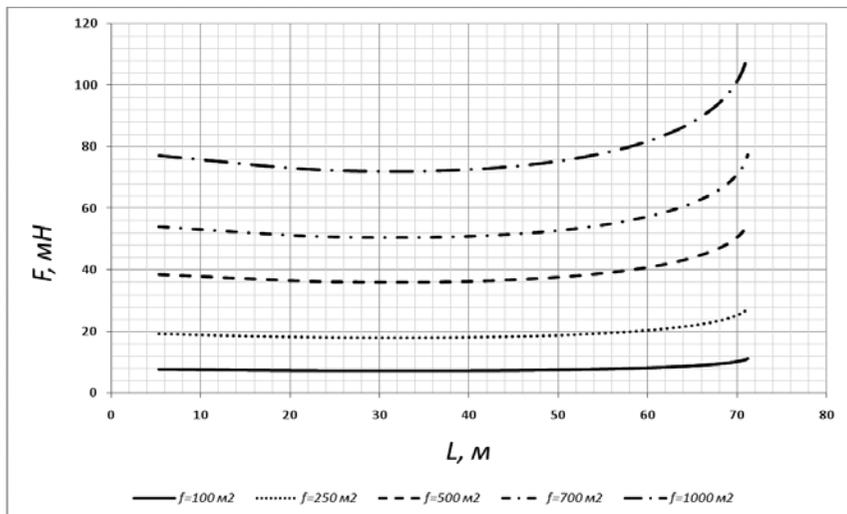


Рис.4 Динамические нагрузки волны перемещения с дисперсией F на плоские вертикальные водные преграды различных размеров изменяющиеся с расстоянием L вдоль речного потока.

В процессе расчета дисперсионных соотношений для скорости и силовых нагрузок от волн перемещения использовалась зависимость высоты волны перемещения от длины волны, полученная по расчетному соотношению (12) при интегрировании уравнений Сен-Венана методом Бахметьева [23]. Эта зависимость (рис. 3) подтверждает наблюдаемую в натуральных наблюдениях и лабораторных экспериментах тенденцию роста длины волны и ее амплитудой [12].

Иллюстрация практической значимости необходимости учета при проектировании и эксплуатации размещенных на воде сооружений различных масштабов, интенсивности волновых нагрузок, связанных с дисперсией волн перемещения подтверждается результатами расчетов представленных на рис.4.

Выводы

На основании представленных результатов анализа волн перемещения, есть основание для констатации, что в первом приближении предложена уточненная методика расчета кинематических и динамических параметров волн перемещения с учетом явления волновой дисперсии. Установлено, что при решении одномерных нелинейных уравнений неустановившегося движения в открытых потоках с учетом сил сопротивления скорость волн и волновое давление могут быть адекватно определены, основываясь не на эмпирических фактах, а с использованием аналитических соотношений. Полученные расчетные формулы после набора результатов сравнительных испытаний с массивом данных, полученных в дополнительных лабораторных экспериментах и натуральных наблюдениях целесообразно рекомендовать для использования в качестве дополнений к нормативным документам гидротехнического строительства.

Литература

1. Разумов В.В., Разумова Н.В., Пчелкин В.И. Масштабы и опасность наводнений в сибирском регионе России // Наука. Инновации. Технологии. 2015. № 4. С. 103–144.
2. Гулев С.К., Катцов В.М., Соломина О.Н. Глобальное потепление продолжается // Вестник РАН. 2008. Т. 78, № 1. С. 20–27.
3. Kron W., Eichner J., Kundzewicz Z.W. Reduction of flood risk in Europe – Reflections from a reinsurance perspective // J. Hydrol. Elsevier, 2019. Т. 576. С. 197–209. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2019.06.050.
4. Христианович С.А. Избранные работы: В 2 кн. Кн.2: Речная гидравлика. Теория фильтрации. Аэродинамика и газовая динамика. Горное дело. Теория пластичности. Энергетика. Москва: Изд-во МФТИ, 2000. 270 с.
5. Chalov R. Channel processes (The science of channel processes). Moscow: Infra-M Academic Publishing House, 2016. 569 с.
6. Wang B. и др. Analytical solution of dam-break flood wave propagation in a dry sloped channel with an irregular-shaped cross-section // J. Hydro-environment Res. 2017. Т. 14. С. 93–104.
7. Celis M.A.C., Wanderley J.B.V., Neves M.A.S. Numerical simulation of dam breaking and the influence of sloshing on the transfer of water between compartments // Ocean Eng. 2017. Т. 146. С. 125–139.
8. Seyedashraf O., Rezaei A., Akhtari A.A. Dam break flow solution using artificial neural network // Ocean Eng. 2017. Т. 142. С. 125–132.
9. Ungarish M. Dam-break release of a gravity current in a stratified ambient // Eur. J. Mech. - B/Fluids. 2005. Т. 24, № 5. С. 642–658.
10. Liao C.B., Wu M.S., Liang S.J. Numerical simulation of a dam break for an actual river terrain environment // Hydrol. Process. 2007.
11. Букреев В.И., Дегтярев В.В., Чеботников А.В. Методика экспериментального исследования силового воздействия волн на препятствия // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 7. С. 70–75.
12. Чеботников А.В. Экспериментальное изучение волн перемещения, образующихся при частичном разрушении плотины. Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, 2008. 143 с.
13. Carrivick J.L., Jones R., Keevil G. Experimental insights on geomorphological processes within dam break outburst floods // J. Hydrol. 2011. Т. 408, № 1–2. С. 153–163.
14. Дегтярев В.В., Шаталина В.Н., Букреев В.И., Костомаха В.А., Романов Е.М. Экспериментальное исследование гидродинамических аспектов развития чрезвычайных аварийных ситуаций на судоходных шлюзах // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2002. № 5. С. 70–75.
15. Carrivick J.L. Dam break - Outburst flood propagation and transient hydraulics: A geosciences perspective // J. Hydrol. 2010.
16. Goutiere L., Soares-Frazaõ S., Zech Y. Dam-break flow on mobile bed in abruptly widening channel: Experimental data // J. Hydraul. Res. 2011.
17. Xu F.G., Yang X.G., Zhou J.W., Hao M.H. Experimental research on the dam-break mechanisms of the jidanwan landslide dam triggered by the wenchuan earthquake in China // Sci. World J. 2013.

-
18. Solovyev A., Solovyev D., Shilova L. Solar-vortex power plants: Principles of effective work and technical requirements on the preparation of initial data for design // MATEC Web Conf. / под ред. Andreev V. и др. 2018. Т. 196. С. 04075.
 19. Воеводин А.Ф., Никифоровская В.С., Виноградова Т.А. Математические модели для прогнозирования процесса распространения волн катастрофических паводков в системах открытых русел и водотоков // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2009. № 3. С. 139–144.
 20. Katopodes N.D., Katopodes N.D. Active Flood Control // Free. Flow. Butterworth-Heinemann, 2019. С. 776–809.
 21. О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: http://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_vodnykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/ (дата обращения: 15.08.2019).
 22. Гидротехнические сооружения основные положения проектирования СНиП 33-01-2003. Москва: Госстрой России, 2004. С. 1–30.
 23. Нигматулин Рс.И., Соловьев Д.А. Основы гидромеханики. Москва: «Литтерра», 2012. 400 с.
 24. Solovyev A., Solovyev D., Shilova L. Improvement of the reliability and durability parameters of hydrotechnical structures under conditions of hydrodynamic influence of flows on structural elements // MATEC Web Conf. / ed. Volkov A., Pustovgar A., Adamtsevich A. 2018. Vol. 251. P. 02001.

ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ВОДЫ

А.А. СОЛОВЬЕВ

С наступлением двадцать первого века пришло осознание остроты в необходимости решения двух глобальных проблем развития общества – обеспечения человечества устойчивым и качественным потреблением, как энергией, так и пресной водой. Несмотря на относительно высокую величину мировых ресурсов пресной воды (2 млн км³) и относительно умеренное водопотребление (3000 км³/год), аналитические оценки ряда авторов указывают на вполне вероятную возможность наступления дефицита пресной воды в не слишком отдаленной временной перспективе [1-4]. Прогнозы основаны на вполне объективных фактических данных. Они свидетельствуют о нарастающей во времени тенденции превышения скорости водопотребления над скоростью восстановления природных запасов пресной воды, а также непостоянстве во времени скорости отбора вод для потребления при неизменности скорости восстановления природных ресурсов и росте объемов антропогенного загрязнения природных источников пресной воды. Возрастающая тенденция в различиях скоростей потребления пресной воды и ее естественного восстановления приводит к пессимистическим оценкам практической невозобновляемости отдельных видов природных водных ресурсов [5].

Подобные утверждения не относятся к пресной воде в атмосфере. Запасы пресной воды в виде водяных паров атмосферы, по сравнению с другими источниками пресной воды, обладают наибольшей активностью водообмена. Скорость природного восстановления водных ресурсов, содержащихся в атмосфере, составляет 8-10 суток и, следовательно, обновление атмосферной воды в течение года происходит в среднем 40 раз [6]. Высокая скорость восстановления пресной воды в атмосфере и ее значительное количество (14 тыс. км³), на порядок превышающее объемы воды в речных стоках, делает актуальной задачу создания промышленных систем извлечения атмосферной влаги для целей водопотребления [7].

В Московском университете начиная с 1996 г., проводятся научно-исследовательские работы по системному анализу ресурсов пресной воды, прогнозу глобального и регионального водопотребления с учетом атмосферных водных запасов, теоретическому и экспериментальному изучению процессов приземной конденсации атмосферной влаги и разработке эффективных способов промышленного извлечения пресной воды, содержащейся в атмосфере. Некоторые результаты этих исследований представлены в настоящей публикации.

Возрастание темпов и масштабов изменений в обеспеченности пресной водой, как во всем мире, так и в отдельных географических регионах обусловлено сложной взаимосвязью множественных факторов политического, экономического, социального, климатического характера. Но все они, в конечном счете, связаны с основной причиной увеличения потребления воды, которая обусловлена определенной зависимостью водопотребления от численности населения.

Анализ и прогнозу использования водных ресурсов посвящено немало исследований [8, 9]. Расчеты, как правило, имеют численный характер и основываются на статистических подходах. В основу математических моделей закладываются различные сценарии развития промышленного и сельскохозяйственного производства, гипотезы о динамике и темпах интенсивности антропогенных загрязне-

ний, постулаты о развитии водосберегающих технологий и возможных масштабах урбанизации. Нередко приходится отмечать, что подобные прогнозы, из-за неполного учета взаимного влияния различных модельных параметров приводят к расхождению с реальной ситуацией уже при первых моментах наступления прогнозируемого события.

В развитии идеи о преимущественной зависимости темпов потребления водных ресурсов от антропогенного фактора, в наших прогностических исследованиях было предложено вместо численных моделей, использовать аналитические уравнения. Эти уравнения основаны на временных балансных соотношениях между скоростью потребления-расхода и численностью населения [10, 11]. Они представляют собой функциональные зависимости, определяющие изменение скорости потребления пресной водой w' населением численности N со временем t :

$$w' = R \cdot t \cdot N \quad (1)$$

Параметр R определяется предельным уровнем ресурсов пресной воды и характеризует быстроту изменения скорости подушного потребления пресной воды.

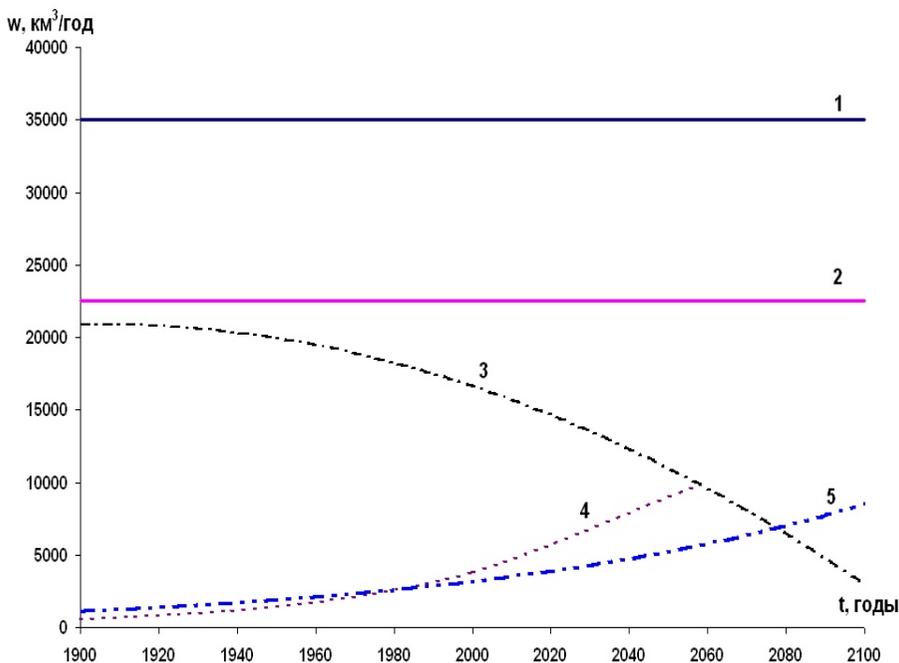


Рис. 1. Нижний предел мировых запасов пресной воды (1); нижняя граница доступных для использования водных объемов (2); снижение объема водных ресурсов вследствие загрязнения (3); сценарий G.Rodda [12] водопотребления на основе экстраполяции с 1997 года (4); расчеты автора по уравнению (1) (кривая 5).

При расчетах (рис.1) по формуле (1) использовались статистические данные по фактической численности до 2007 г. и экстраполяционные значения по гиперболической модели со скоростью квадратичного роста [13, 14]. Параметр R по данным численности и водопотребления на протяжении всего 20 столетия имеет постоянную величину равную $R = (13,5 \pm 0,5)$ мл/год² чел. Это же значение ускорения процесса нарастания потребления воды было принято в качестве неизменного в прогнозе до 2100 г.

Постоянство величины ускорения водопотребления свидетельствует об универсальности ежегодного подушного увеличения скорости антропогенного расходования запасов пресной воды. Непостоянство и рост скорости потребления водных ресурсов, как следует из представленных результатов, допускается, по видимому, балансными соотношениями прихода – расхода мировых запасов пресной воды, определяющими ее круговорот в природе. Тем не менее, из представленных на рис.1 данных можно заключить, что кривая потерь воды и снижение уровня их доступности для человечества все же пересекается с кривой роста водопотребления. По сценарию Rodda [12] этот момент достигается в 2050 году, по аналитическим расчетам с уравнением (1) наступление предела доступности водных ресурсов можно ожидать к 2080 году.

Таблица 1.

Способы опреснения	Средний расход электроэнергии, кВт-час/т воды	Средний расход пара кг пара/кг воды
Осмоз морской воды	6	не использ.
Осмоз солоноватой воды	1	не использ.
Многоступенчатые дистилляторы	1,25	0,55
Системы многократного вскипания	3,3	0,17
Системы механической декомпрессии	10,3	0,04

В числе основных принципов, которые были провозглашены международным сообществом в качестве основы для действий, предотвращающих развитие неблагоприятных тенденций, приводящих к глобальному дефициту пресной воды, в первую очередь, следует выделить расширение фронта работ по созданию новых инновационных технологий производства пресной воды. За последние десятилетия усилия, основанные на применении интегрированных подходов к развитию, управлению и использованию водных ресурсов, концентрировались главным образом на эксплуатации известных методов индустриального производства пресной воды. К традиционным технологиям производства пресной воды относится дистилляция из морской воды путем ее нагревания с получением пара, который конденсируют. Это также электродиализ, при котором через мор-

скую воду пропускается электрический ток для удаления находящихся в ней солей. И, наконец, обратный осмос, когда только пресная вода проходит под давлением через полупроницаемую мембрану, задерживающую соли. Основная проблема, сдерживающая широкое применение различных способов опреснения, связана с существенными затратами электроэнергии и пара на единицу произведенной продукции (табл. 1).

Цена 1 м³ пресной воды на крупных установках дистилляционного метода составляет в зависимости от мощности установки – 0,5-2 \$/ м³, для электродиализа и обратного осмоса 0,3-0,2 \$/м³ при солёности 2-4 г/л [15]. Себестоимость производимой воды на наиболее экономичных дистилляционных опреснителях, применяемых для работы на морской воде, в среднем равна примерно \$1 за м³. В числе недостатков опреснительных методов называют: территориальную привязанность к источникам солёной воды; высокую (до 60%) составляющую затрат на электроэнергию в себестоимости производимой воды; значительную затратность стоимости оборудования и строительства; длительные сроки окупаемости; удалённость производства пресной воды от источников потребления.

В последние годы отмечается повышенное внимание к обсуждению возможностей способа производства пресной воды основанного на конденсации влаги, содержащейся в атмосферном воздухе [16]. Интерес к исследованиям и разработкам эффективных атмосферных конденсаторов особенно возрос после того как в 1992 г. были обнаружены огромные атмосферные реки, которые являются предпочтительными путями движения водяного пара в тропосфере при расходах потока около 165 млн. кг воды в секунду и транспортируют около 70% пресной воды [17].



Рис. 2. Воздушный колодец Зибольда

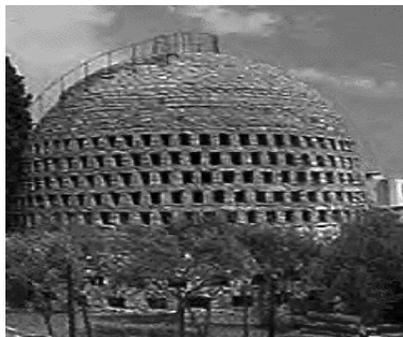


Рис.3. Воздушный родник Кнапена

Использование воды в атмосфере в качестве источника пресной воды является древней технологией, которая фактически была заново перестроена в современную эпоху. В 1905 г. русский инженер Фридрих Зибольд построил в Феодосии 13 крупных аккумуляторов в виде холмов из щебня, площадью около 2000 м² и высотой порядка 5 метров [18]. Конденсор воды Ф.И. Зибольда производил 0,4 л/м³ в сутки [19]. Щебневые холмы Зибольда заполнялись камнями с размерами 10-40 см и образовывали усеченный конус с впадиной диаметром 8 м в центре (рис.2). Такая форма, по мнению Зибольда, обеспечивала достаточное радиационное охлаждение для того, чтобы роса конденсировалась в массе камней.



Рис.4. Плоский конденсатор росы (Вигнола, Корсика, Франция)



Рис.5. Установка «РОСА». (Обнинск, Московская обл.)

W, л/габион

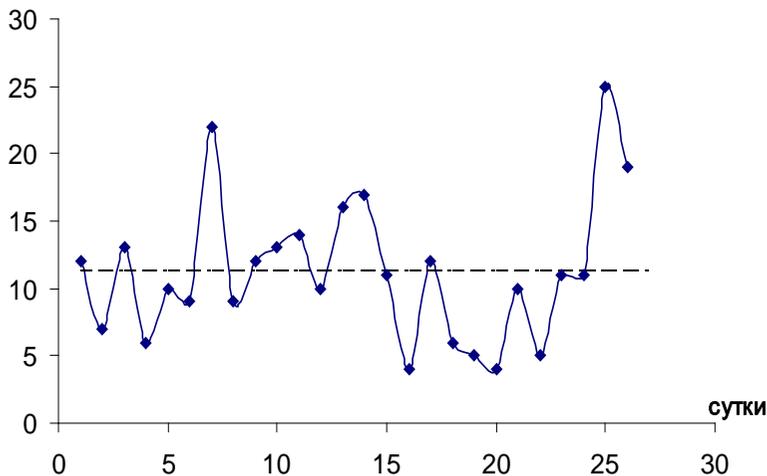


Рис. 6. Выход воды с одного габиона установки «РОСА».

В 1931 г. бельгийский изобретатель М. Кнапен построил аналогичную систему, которую назвал воздушный родник, на высоком холме в Транс-ан-Прованс во Франции [20]. Атмосферный конденсор пресной воды Кнапена представлял собой башню высотой около 14 метров высотой (рис.3). Производительность его установки составляла 0,24 л/м³ в сутки.

В [21] сообщалось о разработках плоских наклонных конденсаторов атмосферной влаги, с различными материалами покрытий (рис. 4). В наиболее успешных натуральных экспериментах с конденсатором из фольги площадью 30 м² с наклоном 30° за период с июля по декабрь выполненных в лаборатории Корсикан-

ского университета было получено в среднем $0,25 \text{ л/м}^2$, извлеченных из атмосферной влаги.

Лабораторией возобновляемых источников энергии географического факультета Московского университета совместно с НПО «Тайфун» создана экспериментальная установка–конденсор атмосферной влаги «РОСА» (рис.5) с естественным протоком воздуха без энергопотребления. Установка «РОСА» представляла собой систему заполненных известняковым щебнем модулей габионов, которые устанавливались на бетонном фундаменте внутри двух металлических поддонов, предназначенных для сбора и стока конденсированной воды. Габионы обвязывались стальной сеткой из коррозионно-стойкой стали.



Рис. 7. Модель капиллярного конденсора



Рис 8. Капиллярная колонка конденсора

В одном из поддонов располагалось 78 габионов с известняковым щебнем типа 1, во втором – 78 габионов с известковым щебнем типа 2. Диаметр камней находился в пределах от 0,05 до 0,10 м. Материал щебня: 50% модулей с известняковым щебнем типа 1 (коэффициент поглощения воды 0,6% от массы); 50% модулей с известняковым щебнем типа 2 (коэффициент поглощения воды 2% от массы). Размер установки: 4,5 x 8,75 x 2,8 м. Общая площадь канала восходящего конвек-

тивного потока воздуха составляла $0,3 \text{ м}^2$. Система была оборудована большим объемом измерительной аппаратуры для контроля эксплуатационных показателей, чтобы полностью понять отклик системы на различные условия окружающей среды. На территории метеорологического полигона НПО «Тайфун» расположены две локальные метеорологические станции, расположенные на мачтах высотой 25 м и 300 м, которые использовались для круглосуточного контроля локальных метеословий в окрестностях установки.

В результате испытаний экспериментального образца установки «РОСА» было получено, в среднем, $1,3 \text{ м}^3$ пресной воды, что на $0,2 \text{ м}^3$ или на 13,3 % меньше от расчетной производительности. Временной ход изменений количественного выхода воды при конденсации с одного габиона показан на рис. 6. Полученные в результате испытаний результаты подтвердили правильность теоретического обоснования способа, методики расчетов, принципиальных технических решений, в тоже время, позволили определить направления дальнейшей работы. В том числе: повышение эффективности системы формирования охлаждающих потоков воздуха; оптимизация конденсирующего материала с целью быстрого насыщения системы влагой, длительного поддержания системы в рабочем состоянии; уменьшение весогабаритных параметров; снижение себестоимости; уменьшение веса; устранение коррозионных материалов, обеспечение транспортабельности и унифицированности конструктивных элементов.

В лаборатории возобновляемых источников энергии проводились экспериментальные работы по изучению возможностей компоновки установок «РОСА» капиллярными габионами (рис. 7, 8). Принцип действия таких габионов – капиллярная конденсация на созданной развитой поверхности конденсирующего материала за счет специально организованных конвективных потоков влажного атмосферного воздуха при естественных метеорологических условиях. Эксперименты в камере с регулируемой влажностью показали, что производительность систем «РОСА» с капиллярными габионами может достигать значений порядка $0,8 \text{ л/м}^2$ в сутки.

Литература

1. Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С. Потребление воды: экологический, экономический, социальный и политический аспекты. – М., 2006.
2. Shiklomanov I.A. World Water Resources at the Beginning of the XXIst Century. – Cambridge University Press, 2003.
3. Алексеев В.В., Берёзкин М.Ю. Пресная вода из атмосферного воздуха // Природа. – 1998. № 6. – С. 90-96.
4. Алексеев В.В. Берёзкин М.Ю., Иванов В.Н. Глобальная проблема нехватки пресной воды и эффективные пути ее решения. – М.: МГУ, 2005. 92 с.
5. Alcamo J., Doell P., Henrichs T., Kaspar F., Lehner B., Roesch T., Siebert S. Global estimates of water withdrawals and availability under current and future "business of usual" conditions // Hydrological Sciences J. 2003. 48(3). P. 339-348.
6. Клиге Р.К., Данилов Н.И., Конищев В.Н. История гидросферы. – М.: Научный мир, 1998. 369 с.

7. Авакян А.В. Опреснение воды в природе и народном хозяйстве. – М.: Наука, 1987.
8. Романова Э.П., Куракова Л.И., Ермаков Ю.Г. Природные ресурсы мира. – М.: Изд-во МГУ, 1993.
9. Лосев К.С. Вода. – Л.: Гидрометеиздат, 1989.
10. Соловьев А.А. Динамические аналогии в нетрадиционной энергетике. – М.: МГУ, 1999.
11. Соловьев А.А. Динамика потребления энергии на основе уравнений энергетического состояния // Изв. Вузов, сер. энергетика. – 2000. №3.С. 76-83.
12. Rodda G. On the problems of assessing the World water resources. In: Geosci. and water resource environment data model. – Berlin - Heidelberg. 1997. P. 14-32.
13. Gilles Pison The population of the world // Population and societies. – 2007. №436.
14. Капица С.П. Общая теория роста человечества: сколько людей жило, живет и будет жить на Земле. – М.: Наука, 1999.
15. Колдин М.В. Опреснительная технология: энергетика и экология// Химия и технология воды. – 1986. Т.8, №6.
16. Beysens D., Milimouk I.The Case for Alternative Fresh Water Sources // Secheresse. - 2000, V. №4.
17. Newell R E., Newell N E., Zhu Y.S, Courtney Tropospheric rivers? A pilot study // Geophysical Research Letters. 1992. V. 19, №. 24. P. 2401-2404.
18. Зибольд Ф.И. Роль подземной росы в водоснабжении города Феодосии // Труды опытных лесничеств. 1905. Вып. 3. С. 387-412.
19. F. Zibold Scientific studies of dew ponds. // Nature.1909, № 81. P.458-59.
20. Knapen M.A.Dispositif intérieur du puits aérien Knapen // Extrait des mémoires de la société des ingénieurs civils de France. 1929.
21. Nikolayev V., Beysens D., Gioda A., Milimouk I., Katiushin E., Morel J.P. Water Recovery from Dew // Journal of Hydrology. 1996, №182. P. 19-25 .

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ А.А. СОЛОВЬЕВА

1971

К вопросу изучения состояния неоднородных сред акустическими методами // Инженерно-физический журнал «Наука и техника» (Минск), т. 10, № 6, с. 1111-1115.

1972

О влиянии неоднородности акустического поля на измерение поглощения ультразвука в жидкостях // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. Изд-во Моск. ун-та (М.), т. 4, с. 382-386. (Соавтор – Грибкова С.И.)

О вязкости дисперсных систем // Инженерно-физический журнал «Наука и техника» (Минск), т. 23, № 6, с. 1037-1042.

Acoustical methods to study the state of inhomogeneous media // Heat Transfer - Soviet Research, т. 4, № 6, с. 133-136

1973

Investigation of the state of inhomogeneous media by acoustical methods // Journal of Engineering Physics, т. 20, № 6, с. 800-803.

1974

Новый взгляд на проблемы физической акустики. – М.: Изд-во МГУ. – 120 с. (Соавтор – Предводителю А.С.).

A multipurpose collector system for a scanning electron microscope // Instruments and Experimental Techniques. Vol. 17. P. 1490. (Соавторы – Dyukov V.G., Rau E.I., Spivak G.V.)

1975

Кинематика волнового фронта и гидродинамическое описание акустической дисперсии в неоднородных средах // Инженерно-физический журнал «Наука и техника» (Минск), т. 29, № 6, с. 1114-1115 (Соавтор – Кравчун С.Н.)

Фокусирующие свойства пламени // Инженерно-физический журнал «Наука и техника» (Минск), т. 28, № 2, с. 315-318 (Соавтор – Мартыненко О.Г.)

1979

Экспериментальные исследования вихревых трубок / в сб. Процессы тепло и массообмена в элементах термооптических устройств, ИТМО АН БССР Минск, с. 79-109 (Соавторы – Мартыненко О.Г., Бубнов В.А.)

1980

Измерения лазерным анемометром и зондом в лабораторных моделях торнадо // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана Наука (М.), т. 16, № 6, с. 656-660 (Соавтор – Баранов П.А.)

Аэродинамические уравнения свободного вихря / в сб. Новое в солнечно-земных связях, Наука Москва, с. 47-50 (Соавтор – Хусаинова Б.Н.)

1981

Методология аэродинамических исследований Н.П. Кастерина // История и методология естественных наук, сер Физика, № 26, с. 169-192

Моделирование турбулентных смерчей / в сб. Физика и техника аэродинамических методов управления и диагностики лазерного излучения. – Минск: Наука и техника, с. 150-171 (Соавторы – Габдуллин И.З., Бубнов В.А.)

Structure of flows in vortices // Journal of Engineering Physics, т. 39, № 4, с. 1056-1062

1982

Влияние температуры поверхности на развитие конвективного вихря // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана Наука (М.), т. 18, № 3, с. 331-333 (Соавтор – Бодронос А.В.)

Дискуссия о выборе закона взаимодействия элементарных токов // История и методология естественных наук, сер Физика, № 27, с. 72-79

О соответственных состояниях конвективных вихрей / в сб. Эволюционные задачи энергопереноса в неоднородных средах. – Минск: Института тепло и массообмена АН БССР им. А.В.Львова, с. 20-22

1983

Исследования лабораторной модели развивающегося конвективного вихря // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия Изд-во Моск. ун-та (М.), т. 24, № 2, с. 81-83 (Соавторы – Бобошина С.В.)

Оценка вихревого отношения и константы Кармана для вихрей // Инженерно-физический журнал Наука и техника (Минск), т. 44, № 3, с. 396-401 (Соавторы – Бобр В.А., Габдуллин И.З., Калилец В.А., Солодухин А.Д.)

Турбулентный обмен в модели вихря // Известия АН БССР, № 3, с. 54-56 (Соавторы – Габдуллин И.З., Солодухин А.Д.)

К оценкам турбулентных напряжений в моделях атмосферных вихрей / в сб. Гидродинамика и теплообмен в неоднородных средах, Институт тепло-и массообмена им. А.В.Львова Минск, с. 154-163 (Соавторы – Морозов И.А., Солодухин А.Д.)

1984

Особенности развития крупномасштабных возмущений вихревых образований // Инженерно-физический журнал Наука и техника (Минск), т. 47, № 3, с. 398-402 (Соавторы – Павлов Н.И., Калилец В.И., Солодухин А.Д.)

1985

Александр Саввич Предводителев. – М.: Изд-во МГУ. – 158 с. (Соавтор – Базаров И.П.)

Макромасштаб турбулентных пульсаций в конвективном вихре // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия Изд-во Моск. ун-та (М.), т. 25, № 4, с. 63-66 (Соавтор – Бобошина С.В.)

Некоторые методологические особенности моделирования атмосферных вихрей // История и методология естественных наук, сер Физика, № 31, с. 50-60

Особенности структуры геофизических вихрей // Известия АН Молд. ССР, сер. физ.-техн. наук, № 1, с. 36-39 (Соавторы – Доника Ф.Г., Захарова М.В., Смыслов В.В.)

Турбулентные напряжения в модели природного вихря // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, т. 25, № 5, с. 128-132 (Соавтор – Морозов И.А.)

Баланс энергии в турбулентных вихрях / в сб. Гидрогазодинамика технических систем. – Киев: Наукова думка, с. 116-121 (Соавторы – Бубнов В.А., Габдуллин И.З.)

1986

Визуализация структур в лабораторной модели атмосферного вихря // Известия АН БССР, сер. физ. энерг. наук, № 2, с. 31-34 (Соавторы – Мартыненко О.Г., Солодухин А.Д., Федорей В.Г.)

Experimental investigation of convective heat transfer with flow of water in a tube bundle with spacers // Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika) Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), т. 33, № 4, с. 212-214 (Соавторы – Кисина В.И., Процеров Д.Л., Тарасова Н.В.)

Distinctive features of the development of large-scale disturbances in vortex flows // Journal of Engineering Physics, т. 47, № 3, с. 1035-1038 (Соавторы – Бобр В.А., Евдокимов Л.И., Калилец В.И., Павлов Н.И., Солодухин А.Д.)

1987

Оценки степени интенсивности атмосферных вихрей // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, т. 28, № 5, с. 115-120

Регулярная стохастическая динамика частиц при генерации вихря во вращающихся потоках со сдвигом // Инженерно-физический журнал «Наука и техника» (Минск), т. 53, № 1, с. 37-42 (Соавтор – Гусякова Е.В.)

Состояние и перспективы развития исследований по физическому моделированию тропических циклонов / в сб. Тропическая метеорология. – Л.: Гидрометеиздат, с. 76-87 (Соавторы – Анисимова Е.П., Иванов В.Н.)

Формирование вихревых структур на границе сдвиговых потоков с различным направлением вращения / в сб. Тропическая метеорология. – Л.: Ленинград, Гидрометеиздат, с. 110-116 (Соавторы – Иванов В.Н., Лаппо С.С., Гусякова Е.В.)

1988

Неевклидовы пространства и явления переноса // История и Методология Естественных Наук, т. 34, с. 81-85

Синергетические явления в тропических циклонах и торнадо // История и методология естественных наук, сер Физика, № 34, с. 52-62

Stochastic dynamics of particles during vortex generation in a rotating stream with shear // Journal of Engineering Physics, т. 53, № 1, с. 767-771 (Соавтор – Гусяков Е.И.)

1989

Аналоговое моделирование элементов тропического циклогенеза // Труды Дальневосточного научно-исследовательского гидрометеорологического института, № 143, с. 36-43

Горизонтальный сдвиг скорости в модели вынужденного вихря и в тропических циклонах // Труды Дальневосточного научно-исследовательского гидрометеорологического института, № 143, с. 43-48 (Соавторы – Солодухин А.Д., Тарасов Д.Е.)

Конвективный вихрь-преобразователь солнечной энергии // Известия АН БССР, сер. физ. энерг. наук, № 1, с. 25-28 (Соавтор – Солодухин А.Д.)

Некоторые результаты лабораторных экспериментов применительно к задачам тропической метеорологии // Труды Дальневосточного научно-исследовательского гидрометеорологического института, № 143, с. 14-20 (Соавтор – Мартыненко О.Г.)

О лабораторном моделировании тропических циклонов // Труды Дальневосточного научно-исследовательского гидрометеорологического института, № 143, с. 3-14 (Соавтор – Иванов В.Н.)

Функциональные зависимости между параметрами подобия // Труды Дальневосточного научно-исследовательского гидрометеорологического института, № 143, с. 49-57.

Экспериментальное исследование поведения свободного вихря в поле массовых сил и при асимметрии тангенциального втока // Труды Дальневосточного научно-исследовательского гидрометеорологического института, № 143, с. 29-35 (Соавторы – Калилец В.И., Лишавский С.С., Солодухин А.Д.)

Энергетические переходы в теплом ядре конвективного вихря // Труды Дальневосточного научно-исследовательского гидрометеорологического института, № 143, с. 57-61 (Соавтор – Колесник Ю.Г.)

1990

Convective instability of a free-convection vortex // Journal of Engineering Physics, т. 58, № 3, с. 301-303 (Соавторы – Мартыненко О.Г., Солодушин А.Д.)

Resonant excitation of spiral vortex structures // Journal of Engineering Physics, т. 58, № 6, с. 718-721 (Соавторы – Бачинский В.С., Тарасов Д.Е.)

1991

Физическое моделирование как вспомогательное средство при изучении тропических циклонов / в сб. Пятый Международный симпозиум по тропической метеорологии: Тез.докл. (Обнинск, 26 мая - 2 июня 1991 г.), с. 40-41

Физическое моделирование усиления и ослабления спиральных волн в вихрях / в сб. Пятый Международный симпозиум по тропической метеорологии: Тез.докл. (Обнинск, 26 мая - 2 июня 1991 г.), с. 57-57 (Соавтор – Тарасов Д.Е.)

1992

А.Г. Столетов и Московский университет // История и методология естественных наук, сер Физика, № 37, с. 265-269.

Экспериментальные исследования процессов обмена CO₂ при различных условиях ветро-волнового перемешивания // Труды ВГИ, с. 10-16 (Соавторы – Зайцев С.И., Лямин М.Я.)

Развитие представлений о молекулярных и молярных движениях в жидкостях и газах / в сб. История и Методология Естественных Наук, серия Физика. – М.: Изд-во МГУ, т. 37, с. 98-104

1993

Спирулина – биологически активная добавка // Птицеводство, № 6, с. 5-6 (Соавторы – Лямин М.Я., Околелова Т.М., Чернова Н.И.)

1996

Биогелиоэнергетика морского шельфа / в сб. Ресурсы мирового океана. – Севастополь: Изд-во Морского гидрофизического института с. 155-161 (Соавторы – Ковешников Л.А., Лямин М.Я.)

Перспективы альгологических технологий для европейского Севера / в сб. М.В. Ломоносов и национальное наследие России Материалы докладов межд. научной конференции, посвященной 285-летию со дня рождения М.В.Ломоносова. – Архангельск: Архангельский центр РГО, т. 2, с. 50-52 (Соавторы – Лямин М.Я., Чернова Н.И., Киселева С.В., Зайцев С.И.)

Спирулина – важнейший компонент пищевой энергетики и интегрированных систем будущего / в сб. М.В. Ломоносов и национальное наследие России Материалы докладов межд.научной конференции, посвященной 285-летию со дня рождения М.В.Ломоносова. – Архангельск: Архангельский центр РГО, т. 2, с. 48-50 (Соавторы – Лямин М.Я., Чернова Н.И., Киселева С.В., Зайцев С.И.)

1997

Водорослевая энергетика. – М.: МГУ. – ISBN 5-03-002893-5, 67 с. (Соавторы – Лямин М.Я., Ковешников Л.А., Зайцев С.И., Киселева С.В., Чернова Н.И.)

Пищевая возобновляемая энергетика в сельскохозяйственном производстве // Механизация и электрификация сельского хозяйства, № 6, с. 25-28 (Соавторы – Лямин М.Я., Киселева С.В., Зайцев С.И., Чернова Н.И.)

Водорослевые хозяйства и стратегия регионального выживания / в сб. География и региональная политика. Ч. 2. Материалы международной научной конференции, Смоленск: Изд-во СГУ. Смоленск – Санкт-Петербург – Москва, т. 2, с. 102-105 (Соавторы – Лямин М.Я., Чернова Н.И., Зайцев С.И., Киселева С.В.)

Микроводоросль – биоаккумулятор солнечной энергии в пищевую / в сб. Проблемы и перспективы использования солнечной энергии. – М.: Изд-во ВИМИ, с. 36-37 (Соавторы – Лямин М.Я., Чернова Н.И., Зайцев С.И., Киселева С.В.)

1998

Photobiotechnology of large-scale cultivate microalgae *Spirulina platensis* / в сб. IY Int.Conference fnd Discussion Scientific Club "New information technologies in medicine and ecology". IT+ME,98, Ukraine, Crimea, YALTA-GURZUFF, т. 2, с. 425-426 (Соавторы – Zaitcev S.I., Kiseleva S.V., Koveshnikov L.A., Lyamin M.J., Chernova N.I.)

1999

Динамические аналогии в нетрадиционной энергетике. – М.: Корина. – ISBN 5-070-013556-4, 56 с.

Водородная гелиоэнергетика / в сб. Возобновляемая энергетика, Москва, с. 37-114 (Соавторы – Зайцев С.И., Лямин М.Я., Киселева С.В., Чернова Н.И., Михайловская Н.Н.)

Гидроаэромеханика в возобновляемой энергетике / в сб. Возобновляемая энергетика, Москва, с. 22-36

Иерархия структурных процессов в среде выращивания спирулины / в сб. Возобновляемая энергетика, Москва, с. 121-125 (Соавторы – Воробьева Н.В., Ковешников Л.А., Лямин М.Я.)

Неевклидовы многообразия и уравнения энергетического состояния / в сб. Физическая экология (физические проблемы экологии), Изд-во физического факультета МГУ Москва, т. 5, с. 203-211 (Соавторы – Зайцев С.И., Киселева С.В.)

Солнечная энергетика на стыке наук / в сб. Возобновляемые источники энергии (1-я Всероссийская научная молодежная школа). – М.: Изд-во МГУ, с. 42-45

2000

Алексев Александрович Померанцев. Серия "Выдающиеся ученые физического факультета МГУ". – М.: Изд-во Физического факультета МГУ. – 76 с.

Папайя как нетрадиционный источник энергии. – М.: Лайф-Принт. – ISBN 5-889-29019-3, 20 с.

Динамика потребления энергии на основе уравнений энергетического состояния // Известия Вузов, сер. энергетика, № 3, с. 76-83

Процессы переноса в вихревых преобразователях энергии / в сб. Труды Минского Международного Форума по тепломассообмену; Тепломассообмен в энергетических устройствах, Институт тепломассообмена АН БССР им А.В.Лыкова Минск, т. 10, с. 413-417

Dynamics of consumption of energy, based on equation of energetic state // Proceedings of the higher educational institutions of the CIS Series Energy, № 3, с. 76-84

2001

Анализ нетрадиционных представлений о механизмах катастрофически опасных вихрях с применением метода физического моделирования / в сб. Стихия 2001. – Севастополь: Изд-во Морского гидрофизического института НАН Украины с. 69-77 (Соавтор – Ковешников Л.А.)

Возобновляемая энергетика в трудах Л.А. Ковешникова / в сб. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон. – Севастополь: Изд-во Морского гидрофизического института НАН Украины, т. 3, с. 106-111

Резонансные явления и ослабления волн во вращающейся жидкости в зонах взаимодействия тропических циклонов с океаном / в сб. Международные научные чтения "Приморские зори - 2001", серия Экология, безопасность жизнедеятельности, охрана труда и устойчивое развитие, Тихоокеанская академия наук экологии и безопасности жизнедеятельности. Владивосток, т. 2, с. 41-44 (Соавторы – Павлов Н.И., Бажин А.С.)

2002

Персональные солнечно-вихревые электростанции / в сб. Энергосбережение- теория и практика. М.: Изд-во Московского энергетического института, с. 203-206 (Соавторы – Захарова М.В., Павловский К.П.)

Проблемы ветроэнергетики / в сб. Возобновляемые источники энергии, Географический факультет МГУ, с. 259-282

Ресурсосберегающие преобразователи энергии / в сб. Физическая экология (физические проблемы экологии), физический факультет МГУ, т. 6, с. 46-52 (Соавторы – Кошеников Л.А., Павловский К.П.)

Энергосбережение при оптимизации процесса охлаждения оборотной воды в градирнях атомных электростанций / в сб. Энергосбережение – теория и практика. – М.: Изд-во Московского энергетического института, с. 170-177 (Соавтор – Нигматулин Р.И.)

2003

Воздуховод башенной испарительной градирни с турбулизацией // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ) Федеральный институт промышленной собственности (Москва), № 2, с. 17-22 (Соавторы – Р.И., Гусинская Н.В., Малых Ю.Б.)

2004

Лабораторный практикум по механике жидкости. М.: Альтаир, 80 с. (Соавторы – Баранов П.А., Новожилова Т.В.)

Преобразование ИК-излучения в энергию конвективно-вихревого течения // Физическая мысль России [б.и.]. М. № 1, с. 68-72 (Соавтор – Павловский К.П.)

Сейсмозащитная опора для наземных магистральных трубопроводов // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). – М., № 35, с. 18-21 (Соавторы – Мансуров О.И., Нигматулин Р. И., Малых Ю.Б.)

Александр Саввич Предводителей / в сб. Советский физик. Избр. материалы (1998-2004 гг.). М.: физический факультет имени М.В. Ломоносова, с. 370-372

Алексей Александрович Померанцев / в сб. Советский физик. Избр. материалы (1998-2004 гг.). М.: физический факультет имени М.В. Ломоносова, с. 266-271

Взаимодействие вязкого потока с линейным вихрем / в сб. Динамические проблемы механики сплошных сред. М.: Изд-во Московского авиационного института, с. 244-251 (Соавторы – Нигматулин Р.И.)

Энергетические плантации / в сб. География, общество, окружающая среда. Т. III. Природные ресурсы, их использование и охрана. – М.: изд. дом "Городец", с. 578-607 (Соавторы – Алексеев В.В., Лямин М.Я.)

2005

Физическая гидромеханика. – М.: ГЭОТАР-Медиа. – 512 с. (Соавтор – Нигматулин Р.И.)

Виброударозащитные опоры для надземных магистральных трубопроводов, прокладываемых в сейсмоопасных районах // Безопасность жизнедеятельности, № 6, с. 52-56 (Соавторы – Мансуров И.Я., Мансуров О.И.)

Настольная виброударозащитная площадка // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). – М., № 35, с. 44-47 (Соавтор – Мансуров О.И.)

Солнечный интенсифицированный тепличный комплекс // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). – М., № 32, с. 33-43 (Соавторы – Чабанов А.И., Соболев В.М., Городов М.И., Ерохов Н.М., Филипенко Е.С.)

Способ преобразования солнечной энергии // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ) Федеральный институт промышленной собственности (Москва), № 33, с. 12-23 (Соавторы – Чабанов А.И., Соболев В.М., Севастьянов В.П.)

Способ термопреобразования солнечной энергии // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). – М., № 36, с. 1-7 (Соавторы – Чабанов А.И., Соболев В.М., Севастьянов В.П.)

Тросовое амортизирующее устройство // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ) Федеральный институт промышленной собственности (Москва), № 31, с. 20-24 (Соавторы – Мансуров О.И., Мансуров И.Я.)

Резонанс и экранировка спиральных волновых возмущений / в сб. «Физические проблемы экологии». – М.: МАКС Пресс, т. 13, с. 185-194 (Соавторы – Зайцев С.И., Соловьев А.А., Павловский К.П.)

2006

Возобновляемые источники энергии: лекции ведущих специалистов / Под ред. А.А.Соловьева. – М.: Книжный дом Университет. – ISBN 5-88711-277-8, 218 с. (Соавторы – Зайцев С.И., Киселева С.В., Нефедова Л.В., Чернова Н.И., Коробкова Т.П., Стребков Д.С., Безруких П.П., Копылов А.Е., Попель О.С., Калюжный С.В., Булычев Б.М., Синюгин О.А.)

Фундаментальные аспекты возобновляемой энергетики / в сб. Возобновляемая и малая энергетика – 2006: материалы III Межд. конф. – М.: Комитет ВИЭ РосСНИО, с. 28-35 (Соавторы – Зайцев С.И., Киселева С.В., Нефедова Л.В., и др.)

Фундаментальные проблемы исследований в области возобновляемой энергетики / в сб. Возобновляемые источники энергии: Лекции ведущих специалистов, Вып 4. – М.: Геогр. ф-т МГУ, с. 10-17 (Соавторы – Зайцев С.И., Киселева С.В., Нефедова Л.В., Чернова Н.И., и др.)

2007

Солнечно-ветровая энергетика / в сб. Энергосберегающие технологии. Волгоград: Нива, т. 1, с. 254-258 (Соавторы – Павловский К.П.)

2008

Возобновляемые источники энергии: Лекции ведущих специалистов. Учебное пособие. – М.: ЧеРо. – ISBN 978-5-88-711-322-7, 178 с. (Соавторы – Безруких П.П., Стребков Д.С., Копылов А.Е., Попель О.С., Чернова Н.И., Коробкова Т.П., Горлов В.Н., Тухов И.И., Томаров Г.В., Николаев В.Г., Клямкин С.Н., Тарасов Б.П., Киселева С.В.)

Исследования возобновляемых источников воды // Энергетическая политика, № 3, с. 39-45

Исследования по возобновляемой энергетике / в сб. Энергосберегающие технологии, Нива Волгоград, с. 34-38

О калибровочной инвариантности процессов переноса тепла и импульса / в сб. Физические проблемы экологии (Экологическая физика). М.: МАКС Пресс, т. 15, с. 352-356

Проблемы потребления водных ресурсов и конденсаторы атмосферной росы / в сб. Физические проблемы экологии, серия Экологическая физика. М.: МАКС Пресс, т. 15, с. 357-363 (Соавторы – Зайцев С.И., Павловский К.П.)

2009

Сборник задач по гидромеханике. М.: Альтаир. – 182 с.

Аналитические методы прогноза энергопотребления // Экономическая политика. – М., № 5, с. 17-23

Аэродинамическая установка // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). – М., № 5, с. 24-29 (Соавтор – Чекарев К.В.)

Инновации в возобновляемой энергетике // Вестник РАЕН Рос. акад. естеств. наук (М.), т. 2, с. 223-230

Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 52808-2007 «Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Термины и определения» // "Международная биоэнергетика" The Bioenergy international, т. 1, № 10, с. 13-15 (Соавторы – Андрееенко Т.И., Рустамов Н.А.)

Система национальных стандартов Российской Федерации и энергетика возобновляемых источников энергии / в сб. докладов Межд. конференции, 26-27 мая 2009г., «Коммерческое использование нетрадиционных ресурсов метана и отходов сельскохозяйственного и лесного производства, Москва, с. 38-39 (Соавторы – Андрееенко Т.И., Рустамов Н.А.)

2010

Возобновляемые источники энергии: Курс лекций. Учебное пособие. М.: МИРОС. – ISBN 978-5-91897-006-5, 204 с. (Соавторы – Стребков Д.С., Варфоломеев С.Д., Шевалеевский О.И., Попель О.С., Тюхов И.И., Симакин В.В., Раупов А., Фатеев В.Н., Томаров Г.В., Коробкова Т.П., Чернова Н.И., Николаев В.Г., Савченков С.Н.)

О стандартизации в сфере использования возобновляемых источников энергии // Компетентность, № 4-5(75-76), с. 26-27 (Соавторы – Рустамов Н.А., Андрееенко Т.И.)

Об экологической защите среды обитания человека // Техносферная безопасность, надежность, качество, энерго и ресурсосбережение, т. 38, с. 277-283 (Соавтор – Мусаев В.К.)

Возобновляемые источники энергии: идеи, исследования, технологии / в сб. Возобновляемые источники энергии. – М.: Изд-во МГУ, т. 7, с. 5-24

Возобновляемые источники энергии: идеи, научные исследования и инновационные технологии / в сб. Возобновляемые источники энергии.- М.: Изд-во МГУ, т. 7, с. 5-23

Традиционная и возобновляемая энергетика мира: география инноваций / в сб. Третий инновационный форум «ВИЭ-2010» Сборник материалов (тезисы и доклады). С.-Пб: СПбГПУ, с. 26-28 (Соавторы – Берёзкин М.Ю., Синюгин О.А.)

Фундаментальные исследования возобновляемых источников энергии в Московском университете / в сб. Энергетика в глобальном мире. Красноярск: Версо, СФУ, с. 158-163

2011

Аэродинамическая установка // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). – М., № 9, с. 131-135 (Соавтор – Чекарев К.В.)

Всероссийские научные молодежные школы "Возобновляемые источники энергии в МГУ им. М.В. Ломоносова // Энергия, экономика, техника, экология. – М.: Наука, № 11, с. 59-62 (Соавтор – Рустамов Н.А.)

Использование энергетического потенциала гидросферы земли // Энергия, экономика, техника, экология. – М.: Наука, № 3, с. 44-50 (Соавтор – Соловьев Д.А.)

Новый биогазовый стандарт BIOENERGY // Международная биоэнергетика, № 11, с. 20-21 (Соавторы – Андрееенко Т.И., Рустамов Н.А.)

Энергообеспечение России – проблемы и возможности решения // Молодой ученый. – Казань: Изд-во «Молодой учёный», № 8-1, с. 107-112 (Соавтор – Дегтярев К.С.)

Аэродинамическая установка // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ)

Федеральный институт промышленной собственности (Москва), т. 5, с. 77-84 (Соавторы – Зайцев С.И., Чекарев К.В.)

Зеленое топливо: наука и практика / в сб. Образование в области изменения климата и альтернативной энергетики. – М.: Российский Зеленый крест, с. 337-342

К методике дорожного картирования возобновляемой энергетики / в сб. Энергосберегающие технологии. Проблемы их эффективного использования. Том 1. Возобновляемая энергетика, ФГОУ ВПО Волгоградская ГСХА, Волгоград, т. 1, с. 226-230

Лабораторная модель антициклона / в сб. Физические проблемы экологии, серия Экологическая физика, Физический факультет МГУ. М., т. 17, с. 413-420 (Соавтор – Павловский К.П.)

Научные молодежные школы «Возобновляемые источники энергии» / в сб. Физические проблемы экологии, серия Экологическая физика, Физический факультет МГУ. М., т. 17, с. 410-412

Overheat instability in an ascending moist air flow as a mechanism of hurricane formation // Atmospheric and Oceanic Physics (physics.a0-ph) arXiv: 1106.5478v1, т. 1, с. 1-15 (Соавтор – Нечаев А.М.)

2012

Основы гидромеханики. – М.: Литтера. – ISBN 979-5-4235-0063-4, 400 с. (Соавтор – Нигматулин Рс. И.)

Возобновляемая энергетика в Московском университете: фундаментальный вектор исследований / в сб. Сборник трудов IX Международной конференции «Возобновляемая и малая энергетика 2012», посвященной X-летию образования Комитета ВИЭ РосСНИО. Под редакцией П.П. Безруких. – М.: РосСНИО, с. 104-114

Возобновляемая энергетика в мире и России: конвергенция наук и технологий / в сб. Возобновляемые источники энергии. Лекции. – М.: Университетская книга, с. 7-21

М.В. Ломоносов и антропогенная энергетика / в сб. Физические проблемы экологии, серия Экологическая физика. М.: МАКС Пресс, т. 18, с. 9-14

Некоторые экологические приоритеты экономики / в сб. Инновационные технологии в развитии строительства, машин и механизмов для строительства, Смоленский филиал МИИТ Смоленск, с. 118-121 (Соавтор – Мусаев В.К.)

О разработке российских стандартов по биоэнергетике / в сб. Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. Сборник Трудов 8-й Международной научно-технической конференции, серия Возобновляемые источники энергии. М.: ГНУ ВИЭСХ, т. 4, с. 261-267 (Соавторы – Андреев Т.И., Рустамов Н.А.)

Физические проблемы экологии и стандартизации в энергетике вторичных биоресурсов России / в сб. Физические проблемы экологии, серия Экологическая физика. М.: МАКС Пресс, т. 18, с. 20-23 (Соавтор – Андреев Т.И., Рустамов Н.А.)

2013

Возобновляемые энергоресурсы атмосферы, гидросферы, биосферы: лабораторный практикум. – М.: Университетская книга. – ISBN 978-5-91304-338-2, 156 с. (Соавторы – Андреев Т.И., Берёзкин М.Ю., Зайцев С.И., Киселева С.В., Коробкова Т.П., Нефедова Л.В., Рафикова Ю.Ю., Соловьев А.А., Чернова Н.И.)

Ветренная ветряная энергетика // Наука и жизнь, № 7, с. 42-47 (Соавтор – Дегтярев К.С.)

География инноваций в сфере традиционной и возобновляемой энергетик мира // Вестник Московского университета. Серия 5: География, № 1, с. 28-32 (Соавторы – Берёзкин М.Ю., Синюгин О.А.)

Интенсификация теплообмена в градирнях // Сантехника, отопление, кондиционирование. – М., № 12, с. 40-43

Изучение термобарических течений / в сб. Возобновляемые энергоресурсы атмосферы, гидросферы, биосферы: лабораторный практикум. М.: Университетская книга, с. 101-109

Моделирование циклонических вихрей / в сб. Возобновляемые энергоресурсы атмосферы, гидросферы, биосферы: лабораторный практикум. М.: Университетская книга, с. 54-61

Экранировка испарения при конденсации / в сб. Фундаментальные и прикладные науки сегодня. М.: Научно-издательский центр "Академический", т. 1, с. 186-189 (Соавтор – Чекарев К.В.)

Экранирующий эффект конденсации / в сб. Физические проблемы экологии, серия Экологическая физика. – М.: МАКС Пресс, т. 2013, с. 451-458 (Соавтор – Чекарев К.В.)

Энергетика солнечного вихря / в сб. Возобновляемые энергоресурсы атмосферы, гидросферы, биосферы: лабораторный практикум под ред. А.А.Соловьева. – М.: Университетская книга, с. 62-80.

Энергия гидравлического прыжка / в сб. Возобновляемые энергоресурсы атмосферы, гидросферы, биосферы: лабораторный практикум. – М.: Университетская книга, с. 81-89.

2014

Аэродинамическая градирия // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). – М., № 15 (Соавтор – Чекарев К.В.)

Аэродинамическая установка с тепловым насосом // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). – М., № 16 (Соавтор – Чекарев К.В.)

Башенная испарительная градирия с внешним теплообменом // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). – М., № 25, с. 1-7 (Соавтор – Чекарев К.В.)

Биоэнергия без фантастики // Наука и жизнь, № 6, с. 50-56 (Соавтор – Дегтярев К.С.)

География в возобновляемой энергетике / в сб. Сб. Трудов XI Международной ежегодной конференции «Возобновляемая и малая энергетика 2014». М.: РосСНИО, с. 217-226

Моделирование процессов воздухоулучшения испарительных башенных градиринов / в сб. Процессы в геосредах. – М.: ИПМех РАН, ИПМех РАН, т. 1, с. 124-130

Оценка потенциала развития малой автономной энергетике на возобновляемых источниках в Республике Калмыкия / в сб. Сборник трудов молодых ученых, аспирантов и студентов Региональной студенческой научно – практической конференции «Природно-ресурсный потенциал Прикаспия и сопредельных территорий: проблемы его рационального использования». Элиста: Изд-во Калм.ун-та, с. 34-52 (Соавтор – Дегтярев К.С.)

Use of Resolving Equation to Define the Lower Critical Reynolds Number // European Researcher, т. 83, № 9-2, с. 1648-1650 (Соавтор – Чекарев К.В.)

Vortice convettivo di energia solare // Italian science review, т. 6, № 15, с. 91-94.

2015

Возобновляемые источники энергии: Курс лекций. Выпуск 8. / Под редакцией Соловьева А.А. и Киселевой С.В. – М.: Университетская книга. – ISBN 978-5-91304-389-4, 296 с. (Соавторы – Варфоломеев С.Д., Безруких П.П., Попель О.С., Тарасенко А.Б., Антипов Е.В., Томаров Г.В., Слипичук М.В., Голубева Е.И., Киселева С.В., Николаев В.Г., Бляшко Я.И., Ермоленко Г.В., Егоров И.Ю., Чернова Н.И.)

Актуальные проблемы в исследовании переноса тепла и влаги в приводном слое атмосферы // Процессы в геосредах. – М.: ООО "Кватернион", № 4, с. 55-63 (Соавтор – Соловьев Д.А.)

Анализ рисков освоения возобновляемых источников энергии в России // Проблемы анализа риска, т. 12, № 6, с. 56-63 (Соавторы – Нефедова Л.В.)

Вода зажигает свет // Наука и жизнь, № 2, с. 56-65 (Соавтор – Дегтярев К.С.)

Градирия с воздухорегулирующими устройствами // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). – М., № 4, с. 127-135 (Соавторы – Аксютин О.Е., Нигматулин Рс.И., Чекарев К.В., Малых Ю.Б.)

Система уравнений Рейнольдса с квазиламельярностью средних и пульсационных движений // Вестник современной науки, № 7, с. 17-22 (Соавтор – Дегтярев К.С.)

Сланцевые горизонты // Наука и жизнь, № 9, с. 62-68 (Соавтор – Дегтярев К.С.)

Способ охлаждения циркуляционной воды в пруде-охладителе // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). – М., № 5, с. 480-485 (Соавторы – Нигматулин Рс.И., Чекарев К.В., Малых С.Б.)

Мировые долгосрочные тенденции возобновляемой энергетики / в сб. XII Международная ежегодная научно-практическая конференция "Возобновляемая и малая энергетика - 2015", Сборник трудов. – М.: Комитет ВИЭ РосСНИО, с. 106-116 (Соавтор – Дегтярев К.С.)

Предпосылки развития энергетики на основе возобновляемых источников энергии в Республике Калмыкия в контексте геоэкологических проблем / в сб. Доклады VII Международной научной конференции "Геоэкологические проблемы современности". Владимир, 9-10 октября 2015 г, с. 47-51. (Соавторы – Дегтярев К.С., Андреев Т.И., Залиханов А.М.)

Процесс урбанизации и экологические следы городов / в сб. Доклады VII Международной научной конференции "Геоэкологические проблемы современности". Владимир, 9-10 октября 2015 г, с. 51-53 (Соавторы – Залиханов А.М., Дегтярев К.С.)

Современная возобновляемая энергетика / в сб. Возобновляемые источники энергии: Курс лекций. Выпуск 8. / Под общей редакцией А.А.Соловьева, С.В.Киселевой. – М.: Университетская книга, т. 8, с. 10-24

Gauge invarianza dell'equazione d'onda di trasferimento di calore / в сб. Italian Science Review, т. 2, с. 45-47 (Соавтор – Chekarev K.V.)

2016

Аэродинамическая градирия с внешним теплообменом // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). – М., № 11 (Соавторы – Чекарев К.В., Малых Ю.Б.)

Возможности использования ресурсов ВИЭ для развития сельского хозяйства Кабардино-Балкарии // Инновации в сельском хозяйстве, № 5(20), с. 29-34 (Соавторы – Залиханов А.М., Дегтярев К.С., Соловьев А.А., Берёзкин М.Ю.)

К вопросу об экономике возобновляемых источников энергии // Энергия, экономика, техника, экология. – М.: Наука, № 10, с. 10-20 (Соавторы – Соловьев Д.А., Залиханов А.М., Дегтярев К.С.)

Новые возможности автономного энергоснабжения на основе ВИЭ в сельских районах России // Академия энергетики, № 4 (72), с. 40-45 (Соавторы – Соловьев Д.А., Дегтярев К.С.)

План ГОЭЛРО и возобновляемые источники энергии // Энергетическая политика, № 3, с. 55-64 (Соавторы – Соловьев Д.А., Залиханов А.М., Дегтярев К.С.)

Ресурсы конденсационной воды в естественных условиях // Процессы в геосредах. – М., т. 5, № 1, с. 12-17 (Соавторы – Берёзкин М.Ю., Залиханов А.М., Дегтярев К.С., Чекарев К.В.)

Солнечная электрическая станция с оптоволоконной системой наведения // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). – М., № 26, с. 729-738 (Соавторы – Чекарев К.В., Молодых Ю.Б.)

Становление современной возобновляемой энергетики и ее роль в развитии строительной индустрии // Вестник МГСУ, № 6, с. 5-6

Тенденции и риски использования возобновляемых источников энергии в сельских районах стран Африки // Инновации в сельском хозяйстве, № 5(20), с. 99-106 (Соавтор – Нефедова Л.В.)

Факторы риска при сооружении энергообъектов на возобновляемых источниках энергии в России // Вестник МГСУ, № 12, с. 79-90 (Соавторы – Соловьев Д.А., Нефедова Л.В., Шилова Л.А.)

Анализ рисков при использовании возобновляемых источников энергии в Республике Крым / в сб. XIII межд. конф. «Возобновляемая и малая энергетика-2016». Жуковский: Изд. отдел ЦАГИ, т. 13, с. 303-315 (Соавтор – Нефедова Л.В.)

Возобновляемые источники энергии геосфер: ресурсы, модели, технологии / в сб. Физическое и математическое моделирование процессов геосферах. М.: ООО "ПРИНТ ПРО", с. 154-156

Гидравлический прыжок в русле со сваями как способ борьбы с селевыми потоками / в сб. Маккавеевские чтения - 2016, Географический факультет. М.: МГУ, с. 62-69. (Соавторы – Ларионов Г.А., Гендугов В.М., Краснов С.Ф., Горобец А.В., Кобыльченко Л.В., Бушуева О.Г.)

Simulating power efficiency of heat transfer agent cooling recirculation systems at power plants // Procedia Engineering, т. 165, с. 1275-1280 (Соавторы – Пустовгар А., Адамцевич А.О., Соловьев Д.А., Шилова Л.А.)

Artificial Sources Renewable Energy. – М. Auezov South Kazakhstan State University Press Shymkent, ISBN 978-9965-03-418-3, 80 с. (Соавторы – Myrkhalykov Z.U., Sataev M.I.)

2017

Атомная и возобновляемая энергетика как факторы снижения экологических рисков и роста эколого-экономической эффективности энергетики // Энергетическая политика, № 2, с. 60-71 (Соавтор – Дегтярев К.С.)

Выбор областей минимального штормового воздействия при экстремальных погодных явлениях // Процессы в геосферах. М.: ООО "Кватернион", № 4, с. 45-52 (Соавтор – Соловьев Д.А.)

К вопросу о механизме образования тропического циклона // Процессы в геосферах. М.: ООО "Кватернион", т. 12, № 3, с. 594-602 (Соавторы – Соловьев Д.А., Нечаев А.М.)

Особенности регионального распределенного энергообеспечения возобновляемыми источниками энергии Калмыкии // Агротехника и энергообеспечение, т. 14, № 1, с. 50-61 (Соавторы – Дегтярев К.С., Залиханов А.М.)

Оценка потенциала и предпосылок развития возобновляемой малой автономной энергетики на сельских территориях Калмыкии // Вестник аграрной науки Дона, № 2(38), с. 23-31 (Соавторы – Дегтярев К.С., Залиханов А.М.)

Повышение эффективности использования низкопотенциального тепла при производстве энергии // Вестник Северо-Кавказского федерального университета (Ставрополь), № 3(19), с. 178-188 (Соавторы – Соловьев Д.А., Чекарев К.В.)

Сифонные водозаборные сооружения в водоемах-охладителях электростанций // Современная наука и инновации (Ставрополь), № 1(17), с. 163-172 (Соавторы – Залиханов А.М., Соловьев Д.А., Шилова Л.А.)

Сифонный способ охлаждения оборотной воды // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). – М., № 19, с. 599-604 (Соавторы – Соловьев Д.А., Чекарев К.В., Малых Ю.Б.)

Установка для преобразования низкопотенциального геотермально тепла в электричество // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). – М., № 14, с. 1-8. (Соавторы – Соловьев Д.А., Чекарев К.В., Малых Ю.Б.)

Установка для получения пресной воды из атмосферного воздуха // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуаль-

ной собственности (РОСПАТЕНТ) Федеральный институт промышленной собственности (Москва), № 4, с. 1-10 (Соавторы – Чекарев К.В., Малых Ю.Б.)

Возобновляемая энергетика на современном этапе развития / в сб. Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах. – М.: Институт Проблем Механики РАН, с. 196-197

Динамика развития вязкого вихря во вращающихся течениях со сдвигом скорости / в сб. Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах. – М.: Институт Проблем Механики РАН, с. 194-196 (Соавтор – Соловьев Д.А.)

Методические вопросы определения критерия турбулизации речных потоков / в сб. Экологический императив развития транспортной науки в XXI веке. М.: Альтаир, с. 109-111.

Новые стимулы развития возобновляемой энергетики в России: пост-киотский период / в сб. Первый международный экологический форум «Здоровая окружающая среда – основа безопасности регионов». Рязань: ФГБОУ ВО РГАТУ, т. 2, с. 21-25 (Соавторы – Берёзкин М.Ю., Залиханов А.М., Синюгин О.А.)

Power engineering: nuclear power plants and renewable energy sources // Journal of applied engineering sciences, т. 15, № 3, с. 354-365 (Соавторы – Адамцевич А.О., Дегтярев К.С., Соловьев Д.А., Шилова Л.А.)

The barotropic instability of the oceanic jet currents // Atmospheric and oceanic sciences (Science Publishing Group New York, U.S.A.), т. 2, № 3, с. 80-84 (Соавторы – Соловьев Д.А.)

The relationship of physico-chemical properties and biological objects of artesian water with gas nanobubbles (Ar, O₂) // American Journal of Applied Sciences Science Publications (United States), т. 3, № 11, с. 16-31 (Соавторы – Канунникова О.М., Трубачев А.В., Кожевников В.И., Аксенова В.В.)

2018

Возобновляемые источники энергии: вводный курс лекций. – М.: «КДУ», «Добро-свет». – ISBN 978-5-7913-1094-1 (Соавтор – Залиханов А.М.)

Лабораторный практикум по механике жидкостей. – М.: Альтаир. – ISBN 5-9231-00475-X, 156 с. (Соавторы – Исаков А.В.)

Атмосферная энергетическая установка // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ), № 13, с. 652-669 (Соавторы – Соловьев Д.А., Чекарев К.В.)

Атмосферная энергетическая гелиоустановка // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ), № 16, с. 893-903 (Соавторы – Соловьев Д.А., Чекарев К.В.)

Гидродинамика сопряжения водосливных потоков с речным дном // Процессы в геосредах, т. 1, № 15, с. 894-898 (Соавтор – Соловьев Д.А.)

Испарительная градирня с разнесенными областями теплообмена и аэродинамики // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ), № 32, с. 1-10 (Соавторы – Соловьев Д.А., Чекарев К.В., Малых Ю.Б.)

Научно-исследовательские разработки возобновляемых источников энергии // Сантехника, отопление, кондиционирование, № 7, с. 86-91.

Новые вызовы и риски на пути развития распределенной энергогенерации в Арктическом регионе России // Энергетическая политика, № 4, с. 99-108 (Соавтор – Нефедова Л.В.)

Проблемы развития возобновляемой энергетики в Калмыкии // Энергия, экономика, техника, экология Наука (М.), № 2, с. 24-29 (Соавтор – Дегтярев К.С.)

Радиус сопряжения поверхности водослива практического профиля с водобоем // Вестник МГСУ, т. 13, № 7 (118), с. 885-891 (Соавторы – Соловьев Д.А., Шилова Л.А.)

Влияние гидростатического давления на скорость размыва образцов почвы / в сб. Маккавеевские чтения – 2017. Сборник материалов, Географический факультет. М.:

МГУ, с. 76-83 (Соавторы – Ларионов Г.А., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф., Горобец А.В., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Кобыльченко Л.В.)

Динамика развития полигональной структуры глаза урагана / в сб. Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Четвертая международная школа молодых ученых; 24-26 октября 2018 г., Москва, с. 220-221

Исследование контурной динамики глаза вихря на лабораторной модели дифференциально вращающейся жидкости / в сб. Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Международная конференция, посвященная столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова. Москва. 16-18 мая 2018 г. Сборник докладов. М.: Физматкнига, с. 51-52 (Соавтор – Соловьев Д.А.).

Перестройка контура завихренности в вихревых источниках энергии / в сб. Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Четвертая международная школа молодых ученых; 24-26 октября 2018 г., Москва, с. 221-222 (Соавтор – Соловьев Д.А.).

Эффективность и риски освоения возобновляемых источников энергии в российской Арктике / в сб. Сборник трудов XIX научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, проходившей 22-23 ноября 2018г, ИБРАЭ РАН г. Москва, с. 183-186 (Соавторы – Шилова Л.А., Соловьев Д.А., Нефедова Л.В.).

Эффективность современных финансовых методов управления рисками в возобновляемой энергетике / в сб. Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность // Под ред. к.ф.-м.н Д.О. Дуникова, д.т.н. О.С. Попеля, ОИВТ РАН Москва, с. 141-146 (Соавтор – Нефедова Л.В.).

Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes: Evaluation of the Temporal Dynamics of Oceanic Eddies with Initial Peripheral Rate Shift. – Springer Switzerland, ISBN 978-3-319-77788-7, 380 с. (Соавтор – Соловьев Д.А.)

Improvement of the reliability and durability parameters of hydrotechnical structures / в сб. Proceedings of the VI International Scientific Conference “Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education” (IPICSE–2018), Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) Moscow, с. 70-71. (Соавторы – Соловьев Д.А., Шилова Л.А.)

Improvement of the reliability and durability parameters of hydrotechnical structures under conditions of hydrodynamic influence of flows on structural elements // MATEC Web of Conferences, т. 251, с. 02001-1-02001-11 (Соавторы – Соловьев Д.А., Шилова Л.А.)

Low-Grade Heat in Production of Electricity // The Paper of Independent Autors, т. 43, с. 173-182 (Соавторы – Соловьев Д.А., Чекарев К.В.)

Solar-vortex power plants: Principles of effective work and technical requirements on the preparation of initial data for design // MATEC Web of Conferences, т. 196, с. 04075-1-04075-6 (Соавторы – Соловьев Д.А., Шилова Л.А.)

2019

География и рациональное использование возобновляемых источников энергии / под редакцией А.А.Соловьева. – М.: "Энергия". – ISBN 978-598908-481-4, 288 с. (Соавторы – Алексеев В.В., Андреев Т.И., Березкин М.Ю., Дегтярев К.С., Залиханов А.М., Киселева С.В., Калинина О.Ю., Нефедова Л.В., Нечаев А.М., Рафикова Ю.Ю., Сапожников Ф.В., Синюгин О.А., Соловьев Д.А., Чекарев К.В., Чернова Н.И., Шакун В.П.)

Установка для моделирования гидродинамических процессов // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ), № 2, с. 1-7 (Соавторы – Соловьев Д.А., Чекарев К.В.)

Биогазовая аэродинамическая установка // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ) Федеральной институт промышленной собственности (Москва), № 16, с. 488-495 (Соавторы – Соловьев Д.А., Чекарев К.В.)

К методике дорожного картирования возобновляемой энергетики // Окружающая среда и энергетика, № 1, с. 1-10.

Механизм извержения гейзера как способ извлечения и использования подземного тепла // Процессы в геосредах. – М.: ООО "Кватернион", т. 19, № 1, с. 58-64 (Соавторы – Соловьев Д.А., Нечасев А.М.)

Оценка силового воздействия сбросного потока от волн перемещения в условиях гидрологически опасных природных явлений // Вестник МГСУ, т. 14, № 10, с. 1309-1320 (Соавторы – Соловьев Д.А., Шилова Л.А.)

Правовые проблемы «Степени локализации» генерирующих объектов ВИЭ // Окружающая среда и энерговедение, № 2, с. 83-87 (Соавторы – Соловьев Д.А., Попова Е.Н.)

Анализ рисков развития распределенной энергетики на возобновляемых источниках энергии в Арктическом регионе / в сб. «Экологически безопасные технологии и оборудование». Межд. науч.-техн. симп. «Вторые международные Косыгинские чтения», ФГБОУ ВО «РГУ им. А. Н. Косыгина», Москва, т. 1, с. 292-296. (Соавтор – Нефедова Л.В.).

В.В.Алексеев – как основатель научной школы возобновляемых источников энергии / в сб. География и рациональное использование возобновляемых источников энергии. – М.: ИД "Энергия", с. 65-70.

География и использование возобновляемых источников энергии / в сб. Возобновляемая и малая энергетика. Автономные системы энергоснабжения стационарных и подвижных объектов. М.: НИУ МЭИ, с. 17-18.

Интенсификация низкопотенциального тепла в электростанциях низкоширотного размещения / в сб. География и рациональное использование возобновляемых источников энергии. М.: ИД "Энергия", с. 274-284 (Соавтор – Соловьев Д.А.).

Методологические подходы к оценкам рисков использования возобновляемых источников энергии / в сб. «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий». Материалы V Международной научно-практической конференции. Ч. 2. Майкоп: «ИП Кучеренко В.О.», с. 65-73 (Соавтор – Нефедова Л.В.).

Моделирование формирования и эволюции следа тропического циклона в океане / в сб. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. – М.: Физматгиз, с. 116-118 (Соавтор – Соловьев Д.А.).

Оценка динамических воздействий волн перемещения с учетом явления волновой дисперсии / в сб. Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах. – М.: ИПМех РАН, т. 5, с. 170-172.

План ГОЭЛРО и возобновляемые источники энергии / в сб. География и рациональное использование возобновляемых источников энергии. – М.: ИД "Энергия", с. 126-138. (Соавторы – Дегтярев К.С., Залиханов А.М.)

Этапы становления исследований возобновляемых источников энергии в Московском университете / в сб. География и рациональное использование возобновляемых источников энергии. – М.: ИД "Энергия", с. 54-64

Renewable Energy and Power Supply Challenges for Rural Regions (Ed. Kharchenko V., Vasant P.). – IGI Global (Hershey, PA, United States), ISBN 1-5225-9179-6, 432 с. (Соавторы – Chernov D., Daus Y., Deryugina G., Dyachenko V., Karpov N., Kiseleva S., Kharchenko V., Klychev S., Morgunova M.O., Muhamedijeva J., Mukhamediyev I., Mustakayev R., Nefedova L.V., Popova O., Solovyev D.A., et al.)

Calculation of Dangerous Jumping Flows' Energy Beyond the Dams of Hydropower Station // Materials Science and Engineering C, т. 661, с. 1-4 (Соавторы – Соловьев Д.А., Шилова Л.А.).

Elements of Technological Foresight in Renewable Energy for Russian Industrial Policy // Industrial Technology and Engineering, № 3, с. 36-42 (Соавторы – Берёзкин М.Ю. Синюгин О.А.).

Environmental and Social Aspects of Consumption of Water Resources and the Use of Atmospheric Moisture Condensers // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, т. 983, с. 395-402 (Соавторы – Соловьев Д.А., Шилова Л.А.)

Investigating the contour dynamics of the vortex eye on the laboratory model of a differentially rotating fluid // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science IOP Publishing* ([Bristol, UK], England), т. 231, с. 1-9 (Соавтор – Соловьев Д.А.).

On the Mechanism of Atmospheric Vortex Formation and How to Weaken a Tornado // *European Journal of Applied Physics*, т. 1, № 1, с. 1-4 (Соавтор – Нечаев А.М.)

The Ensuring of Survivability of Wave Energy Stations Constructive Elements in Extreme Weather Conditions // *MATEC Web of Conferences*, т. 97, с. 04075-1-04075-10 (Соавторы – Соловьев Д.А., Шилова Л.А.)

The modelling of power plant's evaporative cooling tower operation taking into account hydrometeorological conditions // *E3S Web of Conferences EDP Sciences* (France), т. 116, с. 00081 (Соавторы – Адамцевич А.О., Соловьев Д.А., Шилова Л.А.)

Renewable Energy Sources Development in Rural Areas of African Countries / в сб. *Renewable Energy and Power Supply Challenges for Rural Regions*, серия IGI Global in Engineering, IGI Global (Hershey, PA, United States), с. 154-168. (Соавторы – Нефедова Л.В., Попова О.)

2020

Возобновляемая энергетика геосфер: новые идеи и перспективные методы исследований // *Окружающая среда и энерговедение. Закрытое акционерное общество "Глобализация и устойчивое развитие. Институт энергетической стратегии"* (Москва), № 2, с. 6-9.

Финансовые методы управления рисками при использовании ВИЭ // *Энергетическая политика*, № 5 (147), с. 62-75 (Соавтор – Нефедова Л.В.)

Электромагнетизм и механика: неголономные аналогии // *Окружающая среда и энерговедение. Закрытое акционерное общество "Глобализация и устойчивое развитие. Институт энергетической стратегии"* (Москва), № 1, с. 60-71.

Анализ и оценки рисков в гелиоэнергетике / в сб. *«Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2020»*, Севастополь: СевГУ, с. 412-417 (Соавторы – Нефедова Л.В., Рафикова Ю.Ю.)

Использование возобновляемых источников энергии, как фактор устойчивого развития и регулирования экологических проблем в странах Африки / в сб. *Актуальные проблемы экологии и природопользования: сборник научных трудов XXI Международной научно-практической конференции.* – М.: РУДН, т. 2, с. 182-186. (Соавторы – Нефедова Л.В., Рафикова Ю.Ю.)

Mathematical modelling of operation modes of water intake structures cooling reservoirs // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Krakow, т. 869, с. 042031-042031 (Соавторы – Соловьев Д.А., Шилова Л.А.)

Renewable energy as a factor of sustainable development and regulation of ecological problems // *E3S Web of Conferences EDP Sciences* (France), т. 169, № 05009 (Соавторы – Нефедова Л.В., Рафикова Ю.Ю., Соловьев Д.А.)

СТАТЬИ СОТРУДНИКОВ ЛАБОРАТОРИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ В СФЕРЕ ЭКОНОМИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И ОЦЕНКИ РИСКОВ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

А.А. СОЛОВЬЕВ, Л.В. НЕФЕДОВА, Ю.Ю. РАФИКОВА,

Д.А. СОЛОВЬЕВ, В.М. ЗАЙЧЕНКО

Аннотация. В работе представлено целевое видение новой энергетики России, на основе анализа перспективных направлений ее развития в сфере экономики энерготехнологий и оценки энергетических рисков использования ВИЭ. Приведены финансово-коммерческие показатели для строящихся или реконструируемых электростанций различных типов, показывающие, что появившаяся экономическая основа для повсеместного использования ВИЭ позволяет строить новую энергетику с меньшими удельными инвестициями в 1 кВт установленной мощности и с получением более дешевой электрической энергии. Для оценки перспектив полноценного включения объектов на ВИЭ в энергокомплекс нашей страны и расширения их использования, дана характеристика рисков, возникающих в возобновляемой энергетике и методов управления ими. На примере анализа результатов расчетов и данных производства электроэнергии на введенных в строй в Республике Алтай солнечных электростанциях показана эффективность предложенной методики для оценки природно-ресурсных рисков в возобновляемой энергетике.

Ключевые слова: энергетика России, возобновляемые источники энергии, окружающая среда, энергетика будущего, риск менеджмент

Введение

На фоне обострившихся в последнее время глобальных кризисных процессов, связанных рецессией мировой экономики на фоне пандемии, все более очевидной становится неизбежность качественной перестройки энергетики, которая трансформируется из отраслевой структуры в социально ориентированную энергоинформационную систему обеспечения жизнедеятельности нового общества [1].

Целевое видение новой энергетики требует комплексной научной проработки будущего с последующим формированием новой Энергетической стратегии России и «дорожной карты» перехода к новой энергетической цивилизации [2]. Новая энергетика будет строиться на комплексной проработке перспективных направлений развития в сфере экономики энергетических технологий и оценки энергетических рисков [3].

В настоящее время в Российской Федерации потребности в электрической и тепловой энергии обеспечиваются, в основном, за счет трех источников генерации: тепловые электростанции (ТЭС) и установки, работающие на ископаемом топливе; гидроэлектростанции (ГЭС); атомные электростанции (АЭС).

Традиционная тепловая энергетика, доля которой в общем энергобалансе РФ самая большая – около 70%, является одновременно и самым большим техногенным источником вредных выбросов в атмосферу, почву, водные источники, выбросов парниковых газов, основным из которых является углекислый газ. Наибольшие запасы органического топлива и за рубежом, и в России – это каменный и бурый угли. Но угольные тепловые электростанции характеризуются наибольшими вредными выбросами. КПД большей части существующих крупных паротурбинных ТЭС составляет 38-40%, у новых ТЭС с применением парогазовых технологий КПД достигает 55-60%. То есть 40–60% энергии сжигаемого на ТЭС топлива выбрасывается в окружающую среду.

По данным утвержденной Энергетической стратегии РФ до 2035 г.[4], к концу рассматриваемого периода объём ТЭС в энергобалансе России планируется на уровне 67,6%, т.е. практически таким же, что и в настоящее время (рис.1). При этом валовый объём вредных выбросов от ТЭС прогнозируется на уровне 2,6 млн т/год, а парниковых газов – 580 млн т/год.

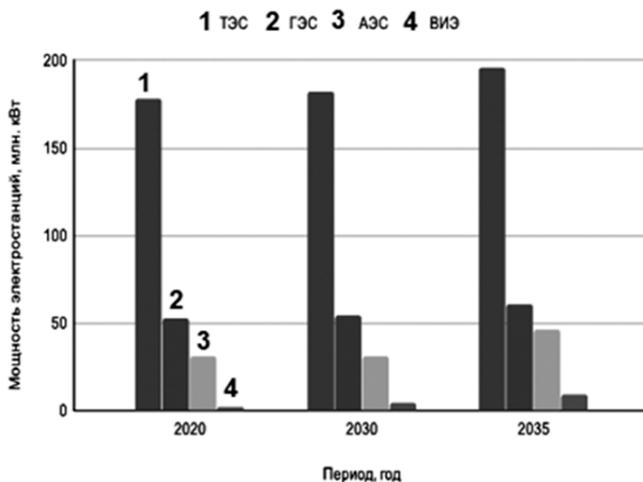


Рис.1. Планируемая установленная мощность. Источник:[4].

Содержащиеся в выбросах ТЭС оксиды серы и азота приводят к появлению кислотных дождей, оказывают пагубное влияние на здоровье человека и животных, а также на растения. Серьезные проблемы связаны также с золой и шлаками ТЭС. Сброс подогретых вод из систем охлаждения ТЭС в поверхностные водные источники обуславливает их тепловое загрязнение, ведущее к снижению насыщенности воды кислородом.

Сооружение крупных ГЭС, доля которых в общем энергобалансе страны составляет ~20%, также сопряжено с отрицательным воздействием на окружающую среду. Водоохранилища, необходимые для регулирования производительности ГЭС, занимают значительные территории, изымаемые из сельхозоборота. Со

строительством водохранилищ связано нарушение гидрогеологического режима рек, изменение свойств экосистем и видового состава гидробионтов.

Отметим, что крупные ГЭС не относят к объектам, функционирующим на базе ВИЭ. К таким объектам, согласно существующей классификации, относят малые ГЭС мощностью до 25 МВт и микроГЭС.

АЭС – электростанции, вызывающие наибольшие экологические проблемы и протесты населения, как в России, так и за рубежом. Особенно после крупных аварий на АЭС «ThreeMileIsland» в США в 1976 г., на Чернобыльской АЭС в СССР в 1986 г., на АЭС «Фукусима» в Японии в 2011 г. Если количество ядерных реакторов в мире будет увеличиваться, частота радиационных аварий будет возрастать. Необходимо принимать во внимание и большие тепловые выбросы АЭС, поскольку КПД ядерных реакторов меньше, чем парогенераторов ТЭС.

Строительство АЭС обходится в 2,0–2,5 раза дороже угольных паротурбинных ТЭС и в 3,0–3,5 раза дороже современных ТЭС с парогазовыми технологиями. В докладе Международного энергетического агентства IEA «Обновленная оценка капитальных затрат станций, производящих электроэнергию», еще в 2010 г. удельные инвестиции в новые атомные электростанции были оценены в размере 5339 дол/кВт [5]. Необходимость учёта в расчётах себестоимости энергии АЭС затрат на вывод станций из эксплуатации, которые сопоставимы с затратами на их строительство, приводит к тому, что фактическая себестоимость производства электроэнергии на АЭС оказывается выше, чем на ТЭС, ГЭС и электростанциях на базе ВИЭ.

Во многих странах отказываются от использования АЭС. Италия еще в 1987–1990 гг. после Чернобыльской аварии закрыла все имевшиеся АЭС и полностью отказалась от ядерной энергетики [6]. В 2010 г. Швеция ликвидировала свой последний ядерный реактор. Бельгия, Германия, Испания, Нидерланды, Тайвань, Швейцария, проводят мероприятия по планомерному закрытию АЭС. Литва и Казахстан временно прекратили использование ядерной энергетики. Австрия, Куба, Ливия, КНДР, Польша после аварии на АЭС «Фукусима-1» в Японии не стали завершать начатое строительство своих первых АЭС. Также отказались от программ развития атомной энергетики Австралия, Азербайджан, Греция, Грузия, Дания, Ирландия, Латвия, Норвегия, Португалия и ряд других стран [7].

Доля атомной энергетики в мировом производстве электроэнергии снизилась с 17,6% в 1996 г. до 10,7% в 2015 г. Агентство Bloomberg New Energy Finance прогнозирует общее падение доли АЭС в мире до 4% к 2040 г.

В то же время сегодня отмечается значительный рост энергетических мощностей с использованием ВИЭ, что в последние 5–7 лет связано с резким падением цен на используемое на этих станциях оборудование. Особенно разительно падение цен на кремниевые элементы (панели) являющиеся основой большинства сооружаемых современных солнечных электростанций (СЭС).

Высокие цены на фотоэлектрические модули (ФЭМ) вплоть до 2010–2012 гг. сдерживали использование СЭС. В настоящее время при стоимости ФЭМ 400–600 дол/кВт они являются самыми дешевыми источниками генерации электрической энергии. И, по мнению многих экспертов, сейчас уже становится экономически невыгодным строительство АЭС и ТЭС, по крайней мере, в странах ЕС, Китае, Индии, а также в южных регионах России [8].

В последние годы получение энергии на базе ВИЭ утвердилось в мире не только в качестве самого быстрорастущего и быстро окупаемого, но и в качестве основного сектора энергетики. В 2013 г. было введено в эксплуатацию более 150 ГВт новых солнечных и ветровых мощностей в мире – впервые больше, чем объектов традиционной энергетики [17]. В 2018 г. осуществлен ввод в эксплуатацию СЭС суммарной мощностью более 120 ГВт, ВЭС – суммарной мощностью 60 МВт [8]. Привычными стали цены порядка 0,03 дол/(кВт·ч) на электрическую энергию на установках с ВИЭ, создаваемых без господдержки. Отметим в качестве примера, что в Саудовской Аравии цена электроэнергии ВЭС составила 0,0234 дол/(кВт·ч), на мексиканских СЭС зафиксирована цена 0,0197 дол/(кВт·ч): сегодня установки, использующие ВИЭ, уверенно выходят на самоокупаемость.

Экономика перспективных энергетических технологий

Появившаяся экономическая основа для повсеместного использования ВИЭ позволяет строить новую энергетику с меньшими удельными инвестициями в 1 кВт установленной мощности и с получением более дешевой электрической энергии. В табл.1 приведены результаты сравнительных расчётов основных параметров традиционных и нетрадиционных электрических станций для условий России. Сравнение выполнено для АЭС, ТЭС, работающей на угле, ТЭС на природном газе, ГЭС, а также сетевых ВЭС и СЭС без аккумулирования.

За основу для сравнения принята условная АЭС установленной мощностью 1000 МВт, работающая в базовом режиме при среднем коэффициенте использования установленной мощности (КИУМ) 70%. Это соответствует годовому времени использования установленной мощности 6132 часа. Все остальные генерирующие мощности имеют среднестатистические КИУМ меньше, чем АЭС, как показано в табл.1. Расчётный отпуск электроэнергии условной АЭС составляет 5825,4 ТВт·ч/год. Для адекватного сравнения принимается такой же расчётный отпуск электроэнергии и для всех остальных сравниваемых типов электростанций. Чтобы выполнить это условие при значительной разнице в КИУМ для разных технологий генерации, оказалось необходимым принять следующие значения установленных электрических мощностей: для ТЭС на угле – 1097,2 МВт, для ТЭС на природном газе – 1647,1 МВт, для ГЭС – 1758,8 МВт, для ВЭС – 2000,0 МВт, для СЭС – 2800,0 МВт.

Но, несмотря на то, что требуемые мощности ВЭС и СЭС значительно больше, чем для всех прочих электростанций, сооружение ВЭС и СЭС требует, тем не менее, при сложившейся рыночной конъюнктуре, самых малых инвестиций. При этом важно, что и себестоимость отпускаемой электроэнергии на ВЭС и СЭС также имеет самые низкие значения.

В табл. 1 приведены полные сроки окупаемости инвестиций при условии, что тариф на отпуск электроэнергии на оптовый рынок энергии и мощности принимается равным 70 дол/(МВт·ч) с минимальным превышением наибольшей себестоимости из ряда рассматриваемых генерирующих источников.

Сравнительная оценка основных показателей электростанций [7].

Наименование параметров	Единица измерения	Значение параметров					
		АЭС	ТЭС		ВИЭ		
			на угле	на газе	ГЭС	ВЭС	СЭС
Коэффициент использования установленной мощности, КИУМ	%	70,0	63,8	42,5	39,8	35,0	25,0
Приведенная установленная мощность, N	МВт	1000,0	1097,2	1647,1	1758,8	2000,0	2800,0
Число часов использования установленной мощности, T	ч/год	6132,0	5588,9	3723,0	3486,5	3066,0	2190,0
Выработка электроэнергии: $W_{эл} = N * T / 1000$	ТВт-ч/год	6132,0	6132,0	6132,0	6132,0	6132,0	6132,0
Затраты на собственные нужды и потери электроэнергии - 5%: $W_{ch} = 0,05 * W_{эл}$	ТВт-ч/год	306,6	306,6	306,6	306,6	306,6	306,6
Отпуск электроэнергии потребителям: $W_{отп} = 0,95 W_{эл}$	ТВт-ч/год	5825,4	5825,4	5825,4	5825,4	5825,4	5825,4
Период проектирования и строительства, T _{стр}	лет	6,0	3,0	3,0	5,0	2,0	1,5
Общая сумма требуемых инвестиций: $K = N * \text{куд}$	млн US\$	5000,0	3291,5	3705,9	5276,4	2800,0	2520,0
Расчетный срок службы электростанции, T _{сл}	лет	40	40	40	40	30	30
Затраты на топливо - ЗТ:	млн US\$/год	40,5	137,4	147,2	-	-	*
Сумма амортизационных отчислений: $A = a * K$ (a = 0,03)	млн US\$/год	150,0	98,7	111,2	158,3	112,0	100,8
Общая сумма эксплуатационных издержек - Из	млн US\$/год	351,3	344,4	382,5	322,0	199,2	179,4
Себестоимость отпускаемой электроэнергии: $CC = 1000 \text{ Из} / W_{отп}$	US\$/МВт-ч	60,30	59,12	65,66	55,28	34,20	30,80
<i>Показатели финансово-коммерческой эффективности инвестиций при прямой продаже электроэнергии на ОРЭМ</i>							

Наименование параметров	Единица измерения	Значение параметров					
		АЭС	ТЭС		ВИЭ		
			на угле	на газе	ГЭС	ВЭС	СЭС
Планируемый эквивалентный одноставочный средневзвешенный тариф на отпуск электроэнергии на оптовый рынок энергии имошности (ОРЭМ), Тэл	US\$/МВт·ч	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
Объем реализации электроэнергии: $R = Tэл * Mотп$	млн US\$/год	407,778	407,778	407,778	407,778	407,778	407,778
Валовая прибыль: $ВП = R - Иэ$	млн US\$/год	56,48	63,38	25,28	85,78	208,58	228,35
Чистая прибыль - после уплаты налоговых платежей, ЧП	млн US\$/год	-53,52	-9,03	-56,25	-30,30	117,58	138,33
Дискретный срок окупаемости инвестиций: $CO=K/(ЧП+A)$	лет	51,8	36,7	67,5	41,2	12,2	10,5
Полный срок окупаемости инвестиций: $PCO = CO + Tстр$	лет	57,8	39,7	70,5	46,2	14,2	12,0
Чистый доход за расчетный период: $N V = ЧП * Tэл$	млн US\$/	-2140,9	-361,4	-2250,1	-1212,1	3527,5	4149,9
Чистый дисконтированный доход, NPV	млн US\$/	-178,4	-30,1	-187,5	-101,0	391,9	461,1
Индекс доходности: $PI = (K + NPV) / K$	-	0,96	0,99	0,95	0,98	1,14	1,18
Рентабельность инвестиций: $P=100/PCO$	%	1,73	2,52	1,42	2,16	7,04	8,31
<i>Показатели финансово-коммерческой эффективности инвестиций при использовании государственных субсидий</i>							
Планируемый эквивалентный одноставочный средневзвешенный тариф на отпуск электроэнергии с учетом государственных субсидий, Тэл'	US\$/МВт·ч	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00
Объем реализации электроэнергии: $R' = Tэл' * УУотп$	млн US\$/год	699,048	699,048	699,048	699,048	699,048	699,048
Валовая прибыль: $ВП'= R' - Иэ$	млн US\$/год	347,75	354,65	316,55	377,05	499,85	519,62
Чистая прибыль - после уплаты налоговых пла-	млн US\$/год	190,20	225,79	188,01	208,77	350,60	371,35

Наименование параметров	Единица измерения	Значение параметров					
		АЭС	ТЭС		ВИЭ		
			на угле	на газе	ГЭС	ВЭС	СЭС
тежей, ЧП'							
Дискретный срок окупаемости инвестиций: $CO'=K/(ЧП'+A)$	лет	14,7	10,1	12,4	14,4	6,1	5,3
Полный срок окупаемости инвестиций: $PCO' = CO' + Tстр$	лет	20,7	13,1	15,4	19,4	8,1	6,8
Чистый доход за расчетный период: $NV = ЧП' * Tсл$	млн US\$/	7607,9	9031,5	7520,6	8351,0	10518,0	11140,4
Чистый дисконтированный доход, NPV	млн US\$/	634,0	752,6	626,7	695,9	1168,7	1237,8
Индекс доходности: $PI' = (K + NPV') / K$	-	1,13	1,23	1,17	1,13	1,42	1,49
Рентабельность инвестиций: $P' = 100/PCO'$	%	4,83	7,61	6,50	5,16	12,42	14,63

При этих условиях только ВЭС и СЭС будут иметь приемлемые сроки окупаемости, не превышающие половину срока службы станции. Все остальные технологии генерации электроэнергии не обеспечивают окупаемость в течение всего срока жизни этих объектов, составляющего, как правило, 40 лет. При этом для всех энергообъектов, кроме ВЭС и СЭС, чистый доход за весь период эксплуатации является отрицательной величиной. При таких значениях экономических критериев интерес к инвестированию капитала в подобные проекты отсутствует.

Приемлемые финансово-коммерческие показатели для строящихся или реконструируемых электростанций на практике обеспечиваются за счет государственных субсидий. Бюджетное датирование на предоставляемую энергосистеме мощность осуществляется с использованием договоров о предоставлении мощности (ДПМ). На практике это означает доплаты из бюджета на производимую мощность для того, чтобы снизить до приемлемых значений тарифы на электроэнергию для потребителей. В табл. 1 представлен пример реализации ДПМ. При этом чтобы сравнение было корректным, в расчетах были приняты равные условия для всех типов электростанций: во всех случаях принято одно и то же повышенное значение эквивалентного одноставочного тарифа на отпуск электроэнергии, равное 120 дол/(МВт·ч). В этих условиях полные сроки окупаемости инвестиций становятся удовлетворительными для всех рассматриваемых вариантов.

При этом наилучшая и весьма удовлетворительная окупаемость будет иметь место при инвестировании средств в строительство ВЭС и СЭС. Эти же виды электростанций обеспечивают и наибольший чистый доход на вложенный капитал, наибольший индекс доходности, наивысшую рентабельность инвестиций. К настоящему времени многие энергетические компании пришли к выводу, что нет смысла, по экономическим соображениям, вести строительство АЭС, ТЭС и крупных ГЭС, а предпочтение следует отдавать технологиям на базе ВИЭ.

Знаменательно, что такая всемирно известная компания как SIEMENS уже сокращает производство своих высокоэффективных газовых турбин из-за значительного снижения спроса на них.

Управление рисками в возобновляемой энергетике России.

Говоря о перспективах полноправного включения объектов на ВИЭ в энергокомплекс нашей страны и расширения их использования, необходимо рассмотреть вопрос о рисках, возникающих в возобновляемой энергетике и методах управления ими. При анализе основных видов рисков следует различать риски и по этапам работы объектов возобновляемой энергетике: проектирование, строительство и эксплуатация. На фазе проектирования наибольшую опасность представляют риски, связанные с ошибками в оценке потенциала ресурсов в районе создания объекта, ошибки в выборе участка размещения и ошибки в выборе оборудования. Особенно это имеет большое значение в ветроэнергетике, где получаемая мощность изменяется пропорционально кубическому значению скорости ветра, а оптимальный выбор оборудования в зависимости от ветроэнергетических характеристик определяет значение коэффициента использования установленной мощности и то, какая доля ветроэнергетического потока будет эффективно преобразована в электроэнергию. Именно поэтому необходимым условием для получения инвестиций на проект, для страхования строительных работ и дальнейшей эксплуатации ВЭС является проведение длительного мониторинга (не менее года) за ветровым режимом на различной высоте по жестко определенной методике, обеспечивающей полный объем статистических данных о ветроэнергетических характеристиках. Гелиоэнергетика не требует проведения предпроектного мониторинга и позволяет проводить проектирование СЭС на основе международных баз данных, составленных по данным ДДЗ и многолетних рядов актинометрических измерений [9].

На современном этапе в России до 2024 г. основным действующим механизмом поддержки развития возобновляемой энергетике является заключение (по результатам конкурсных отборов проектов) долгосрочных договоров предоставления мощности при поставках электроэнергии генерирующими объектами на базе ВИЭ на оптовый рынок электрической энергии (ДПМ ВИЭ) и обязательная первоочередная покупка электрической энергии, произведенной квалифицированными генерирующими объектами на основе ВИЭ. Договоры предоставления мощности гарантируют инвесторам возврат вложенных средств в строительство и эксплуатацию объекта, а также получение дохода на инвестированный капитал. Данный механизм поддержки обеспечивает инвесторам по договорам ДПМ, действующим в течение 15 лет, доходность от 12% годовых (в дополнение к возврату капитальных и операционных затрат). Поддерживая многолетнюю программу субсидий, государство выступает дополнительным гарантом для инвесторов. Такой механизм поддержки значительно снижает финансовые риски инвестирования в крупные проекты по конкурсному отбору. В начале 2021г. Правительство России было принято решение о продлении поддержки возобновляемой энергетике до 2035 г., механизмы и объемы дальнейшей поддержки находятся на стадии обсуждения.

Дополнительные риски и расходы возникают в процессе работы энергообъектов на ВИЭ. Анализ опыта зарубежных проектов на ВИЭ показал, что при решении задач риск-менеджмента можно выделить нефинансовые и финансовые механизмы управления рисками [10]. Управление рисками нефинансовыми методами

проводится девелопером путем их снижения при проектировании и эксплуатации (высокий профессиональный уровень проектов, технически надежное оборудование, разработка нормативных документов, обучение персонала для снижения рисков человеческого фактора, использование качественного сырья в биоэнергетике и т.д.), к финансовым методам относится страхование. К рискам, принимаемым страховыми компаниями, относятся обычно риски, разработанные для традиционных отраслей промышленности. Сюда относятся: технологические риски (выход из строя оборудования), организационные (задержки в поставках), стихийные бедствия, человеческий фактор, а также часть юридических и финансовых рисков [11]. Наиболее распространенным является страхование рисков технологического и организационного характера, возникающих в процессе доставки оборудования и эксплуатации: задержки в поставках, риски поломок при доставке оборудования, риски неисправностей и возгорания турбин при эксплуатации. С развитием технологий меняется и оборудование. Так, длина лопасти современных ветроэнергостановок может достигать более 100 м. Транспортировка и монтаж такого оборудования в труднодоступных местах в полях и горах на неподготовленные площадки расширяют перечень рисков, которые необходимо учитывать. Мировая практика показывает необходимость учета при страховании рисков, связанных с кражами солнечных панелей и актами вандализма. Для России большую опасность представляют и природные пожары. Лесные пожары распространяются и на открытых, покрытых травами пространствах, где могут быть расположены энергообъекты на ВИЭ. При проектировании новых объектов необходим учет многолетней статистики по природным пожарам.

Таблица 2.

Результаты выработки электроэнергии на СЭС в Республике Алтай в 2018 г. [13, 14].

СЭС	Установленная мощность, МВт	Дата ввода СЭС в эксплуатацию	Произведено эл.-эн. IV кв. тыс. кВт-ч	Кум IV кв. %	Произведено эл.-эн. 2018 тыс. кВт-ч	Кум год %
Кош-Агачская 1	5	24.02.2015	1 114	10,09%	7 421	16,94%
Кош-Агачская 2	5	23.03.2016	1 174	10,63%	7 467	17,04%
Майминская 1 и 2	20	24.11.2017	2 167	4,90%	20 316	11,60%
Усть-Канская СЭС	5	22.11.2016	688	6,23%	6 329	14,45%
Онгудайская СЭС	5	24.11.2017	716	6,48%	5 350	12,21%

На обширной территории России с высоким разнообразием природно-климатических условий особенно большое значение имеют ресурсные риски, поскольку используемые гелио-ветро-, гидроэнергетические ресурсы подвержены климатической изменчивости и значительным колебаниям во времени [12]. Характеристики изменчивости во времени зависят от географического положения энергообъекта в определенной климатической зоне. Данная изменчивость обуславливает и значительные колебания объемов выработки электростанций, повышающие риски стабильной подачи ЭЭ в сеть и приводящие к рискам удорожания проектов при необходимости установки накопителей энергии. Например, анализ производства элек-

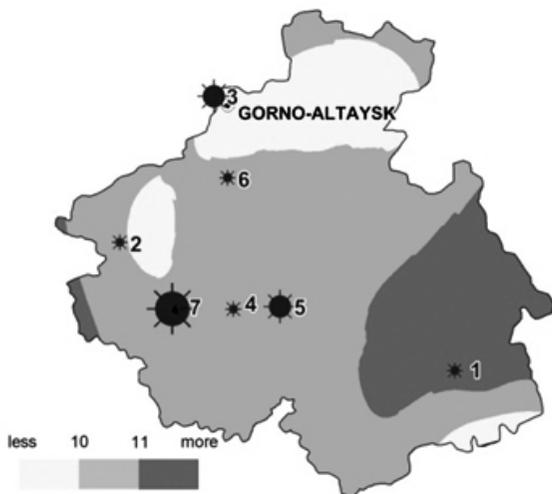
троэнергии на введенных в строй в Республике Алтай солнечных электростанциях путем расчета среднего коэффициента использования установленной мощности (Киум) за определенный период показал большие различия как во времени, так и в зависимости от расположения СЭС (табл.2). Среднегодовые значения Киум варьируют от 17,04% на Кош-Агачской СЭС-2 до 11,6% на Майминской СЭС, для осенне-зимнего периода (IV квартал) это показатель еще ниже – 10,63% и 4,90% соответственно.

Современные страховые компании уже начинают проводить учет природно-ресурсных рисков в возобновляемой энергетике. Это выполняется как традиционными способами страхования, так и посредством использования погодных деривативов и фьючерсных контрактов [11]. Так группа Allianz, мировой лидер по страхованию ВИЭ, запустила в России в конце 2018г. полный пакет страхования для ветровых и солнечных электростанций, включающий уникальное для российского рынка природное индексное страхование «недополученной выручки от недостатка солнца или ветра».

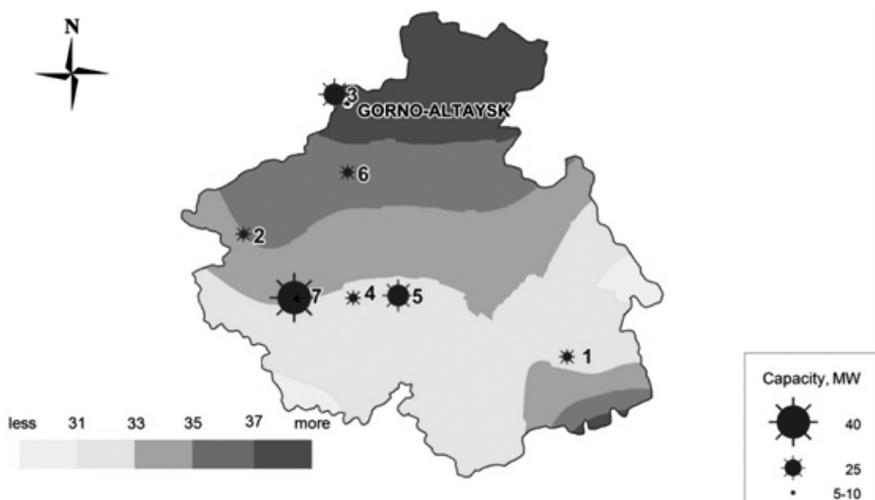
В НИЛ ВИЭ географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова разработана методика оценки уровня рисков выработки электроэнергии на СЭС с использованием расчетов коэффициентов вариации поступления солнечной радиации и дальнейшей обработкой результатов с использованием ГИС технологий [15]. Авторами проведены оценки пространственно-временной изменчивости поступления прямой солнечной радиации (S_g) для ряда регионов России. Основой для проведения данных оценок послужили расчеты коэффициента вариации прямой солнечной радиации (S_v) на горизонтальную поверхность по данным базы NASA SSE за десятилетний период (2009-2018гг.) [16].

Оценивалась изменчивость среднемесячных и суточных значений. Значения коэффициента вариации месячных или среднемесячных суточных сумм радиации характеризуют межгодовую изменчивость, S_v суточных сумм - межсуточную. На основании полученных многолетних данных с использование ГИС-технологий были созданы карто-схемы распределения среднемесячных значений $S_{vмес}$ за 10-летний период (2009-2018гг.), а также данных о внутримесячной изменчивости путем расчетов $S_{vсут}$ за тот же период по месяцам для ряда регионов России с различными природно-климатическими условиями. На рис.1 представлены карты распределения коэффициента вариации прямой солнечной радиации среднемесячных значений и суточных значений по территории Республики Алтай, одной из горных территорий России, расположенной в южной части Сибири с большими различиями в рельефе и природно-климатических условиях. Анализ совмещенных карт позволил выделить зону с наименьшими рисками использования геиоресурсов в республике Алтай – Чойский и Турочакский районы севернее широты $51^{\circ}30'$ и лежащие на 50 км к востоку от с.п. Усть-Кан. Территории близ с.Кош-Агач и южнее характеризуются очень высокой суточной изменчивостью, что может быть обусловлено высокогорным положением (более 2000 м над у.м.) данного района.

Сопоставление полученных данных Киум СЭС и картосхем, составленных с применением ГИС технологий показало более лучшее соответствие для картосхем, составленных по расчетам суточной внутригодовой изменчивости поступления солнечной радиации, чем для среднемесячных характеристик. Очевидно, именно оценки суточной изменчивость более перспективно использовать как один из компонентов при выборе локации для строительства солнечных электростанций.



a)



б)

Солнечные электростанции: 1. Кош-Агачская, 2. Усть-Канская, 3. Майминская, 4. Онгудайская, 5. Ининская, 6. Чемальска, 7. Усть-Коксинская

Рис. 1. Карты-схемы распределения значений коэффициента вариации поступления прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность по данным базы NASA SSE за десятилетний период (2009-2018гг.): а) среднемесячных значений $C_{\text{вмес}}$. б) среднегодовое значение $C_{\text{вгод}}$

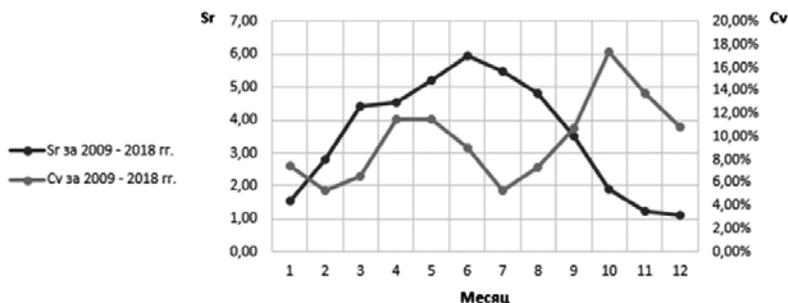


Рис. 2. Внутригодовые изменения среднемесячных значений Sr (кВт·ч/м² в сут) и значений $CvSr$ среднемесячных за многолетний период вблизи с. Кош-Агач Республики Алтай

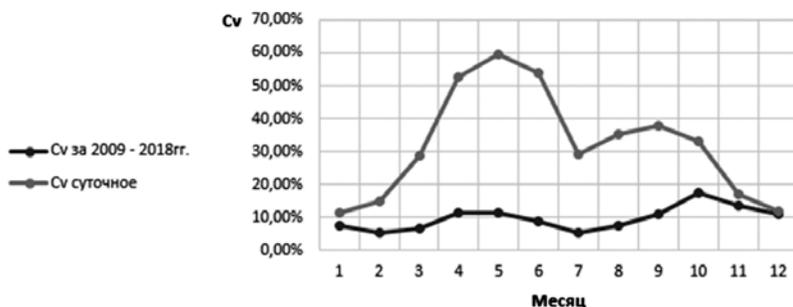


Рис. 3. Внутригодовые изменения значений $CvSr$ среднемесячных и $CvSr$ суточных за многолетний период вблизи с. Кош-Агач Республики Алтай

Внутригодовой ход изменчивости поступления солнечной радиации, а соответственно – и изменения рисков получения стабильной выработки электроэнергии на фотоэлектрических станциях можно проследить по графикам. В районе Кош-Агачской СЭС в период с марта по сентябрь среднее суточное поступление прямой солнечной радиации (Sr) составляет более 4,0 кВт·ч/м² в сут. Коэффициент вариации среднемесячных значений Sr в этот период – менее 12% и снижается до 6% в июле. В осенне-зимний период же коэффициент вариации значительно выше – до 18% (рис.2).

Суточные значения характеризуются очень высокой изменчивостью, причем и в летний период – когда высока выработка электроэнергии от работы солнечных панелей. Коэффициент вариации суточных значений Sr составляет летом более 40%, а в мае-июне – до 60% и лишь в июле снижается до 30% (рис.3). Это доказывает, что при общем высоком уровне инсоляции прогнозы выдачи гарантированной мощности от фотоэлектрических панелей на данной территории имеют низкую достоверность, и в связи с высокими природно-ресурсными рисками работы PV панелей показывает необходимость обязательного наличия дублирующих мощностей выработки электроэнергии.

Выводы

Сегодня модернизация российских ТЭС на базе традиционных технологий с заменой турбин и котлов, отработавших свой ресурс, на новые, пусть даже с несколько лучшими параметрами, приведёт только к ещё большему отставанию нашей энергетики от мирового уровня. Устанавливая сегодня новое паротурбинное оборудование взамен изношенного, мы обрекаем себя на использование устаревающих энергетических технологий еще, как минимум, на 40 лет – период, равный сроку службы этого оборудования. И если еще всего 3-4 года назад эти вопросы не стояли так остро, то теперь уже недопустима потеря времени без внедрения новых технологий на основе ВИЭ.

Становится очевидным, что действующие ныне «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года» и «Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2035 года», в которых перспективная структура энергетических мощностей сохранена на сегодняшнем уровне с большей долей производства электроэнергии за счёт ископаемого топлива, уже не отвечает мировым тенденциям, социально-экономическим потребностям страны и требуют коренного пересмотра.

Напомним, что, в соответствии с решениями Парижской конференции ООН по климату перед мировым сообществом поставлена цель: ограничить рост температуры на планете к 2050 г. в пределах 2°C. Эта цель может быть достигнута только в том случае, если к 2050 г. будет использоваться не более 10% от уже имеющихся запасов углеводородных топлив. В рамках обозначенных ограничений примерно 80% мировых запасов угля, 50% природного газа и 30% нефти *должны будут остаться неиспользованными.*

Если данные подходы справедливы, то затраты на разведку и освоение новых месторождений ископаемых топлив не имеют смысла. Необходимо финансировать не разведку и освоение новых месторождений природных топлив, а исследования, направленные на создание новых методов получения энергии без использования этих топлив.

Сегодня основные статьи дохода Государственного бюджета – это отчисления от прибылей корпораций, продающих за границу газ, нефть и уголь. Однако спрос на ископаемые топлива будет быстро сокращаться. В распоряжении России остается не более 10–15 лет для того, чтобы найти источники получения доходов, отличных от экспорта природных углеводородов.

Основная доля российского экспорта углеводородов приходится на страны ЕС. Развитие экономики этих стран приводит к значительному росту потребности в электрической энергии и биотопливе. Поэтому, само собой напрашивается и решение: планировать источники бюджетного дохода именно за счёт производства в России и экспорта за рубеж энергетической продукции взамен сырьевых компонентов. В этом свете, на наш взгляд, целесообразно выполнение следующей программы действий:

- Проведение маркетинговых исследований с целью определения возможных объёмов продаж за границу электрической энергии и биотоплив.
- Подготовка схемы размещения в приграничных регионах новых энергогенерирующих мощностей, преимущественно солнечных электростанций, дающих сегодня наиболее дешёвую электроэнергию и требующих минимальных инвестиций в их строительство. Для целей сбыта электроэнергии в страны Европы, в Турцию,

Иран, Ирак, Сирию и другие страны целесообразно планировать создание крупных СЭС в южной части европейской территории РФ: в Краснодарском и Ставропольском краях, в Адыгее, в Ростовской области, в Республике Крым, где имеются тысячи гектар земли, непригодной для ведения сельхозработ и списанных с сельскохозяйственного оборота (пески, заболоченные земли, овраги, неудобья, засоленные и закисленные земли и др.), которые вполне пригодны для строительства СЭС.

- Проведение научных исследований для повышения эффективности фотоэлектрических модулей, отработки новых технологий производства ФЭМ с целью обеспечения максимального их удешевления, разработки принципиально новых схем СЭС и передачи энергии, вырабатываемой ими, на большие расстояния. К этим работам могут быть привлечены российские научно-исследовательские институты, имеющие большой научно-технический задел, мало реализованный на практике.

- Создание полигонов для проведения крупномасштабных экспериментальных исследований в области использования ВИЭ. Такие полигоны могут быть созданы в Дагестане на базе Института проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН, в г.Севастополь на базе Севастопольского государственного университета, в г.Дубна Московской области на базе Международного университета, Природы, общества и человека «ДУБНА». Эти полигоны могут иметь разную технологическую направленность в соответствии с особенностями их территориального размещения.

- Проведение НИОКР по созданию эффективных технологий конверсии различных видов биомассы в электрическую и тепловую энергию, технологий по производству дешевых твердых, жидких и газообразных биотоплив.

- Проектирование и строительство новых крупных предприятий по производству биотоплив. Организация продажи биотоплив зарубежным и российским потребителям, а также потребителям в странах СНГ.

- Строительство СЭС за рубежом с последующей их продажей или поставкой электроэнергии местным потребителям.

Использование возобновляемых источников энергии уже стало нормой практически во всем мире. В странах же СНГ оно до сих пор вызывает определенное недоверие. Это привело к серьезному отставанию СНГ и, в частности, РФ в вопросах создания современной базы развития энергетики.

Отказ от использования ископаемых топлив – общее направление развития мировой энергетики. В настоящее время происходит повсеместное замещение традиционных технологий получения энергии на использование возобновляемых источников. Переход от экспорта ископаемых топлив на экспорт электроэнергии, производимой с использованием возобновляемых источников, позволит получить для нашей страны значительные бюджетные преференции.

В нашей стране имеются значительные запасы торфа и древесины. Именно эта ресурсная база может сыграть определяющую роль в переходе на новые энергетические технологии в нашей стране. В настоящее время в мире не существует эффективных промышленных технологий энергетической утилизации биомассы. Имеющиеся отечественные разработки новых технологий энергетического использования биомассы позволяют рассчитывать на передовые позиции в модернизации энергетической отрасли в этом направлении.

Сопоставление результатов анализа рисков гарантированного производства электроэнергии на солнечных электростанциях путем проведения оценок изменчивости инсоляции с применением метода расчетов коэффициентов вариации среднемесячных и суточных значений поступления прямой солнечной радиации и данных об эффективности работы действующих СЭС в Республике Алтай по расчету коэффициента использования установленной мощности показало соответствие выделенных благоприятных для расположения СЭС территорий путем применения ГИС-технологий и районов расположения СЭС с более высокими значениями Киум. Проведенные исследования показали возможность и перспективность использования данной методики для оценок природно-ресурсного рисков использования гелиоэнергетических ресурсов. Планируется проведение дальнейших разработок для уточнения методики и проведения оценок в других регионах России с высоким потенциалом гелиоресурсов.

Исследование выполнено в рамках Госзадания (регистрационный номер 21051400082-4, 075-00460-21-00).

Литература

1. Новак А.В. Российский ТЭК: программа «Антивирус» // Энергетическая политика. 2020. № 5. С. 4–13. DOI:10.46920/2409-5516_2020_5147_4.
2. Бушуев В.В., Первухин В.В. Энергетический потенциал новой цивилизации и геополитика // Академия энергетики. № 4(66). С. 4–10.
3. Бушуев В.В. Quo vadis? // Энергетическая политика. 2020. № 6. С. 26–41. DOI:10.46920/2409-5516_2020_6148_26.
4. Новак А.В. Энергетическая стратегия России до 2035 года. Министр энергетики Российской Федерации (доклад) [Электронный ресурс]. . 2015 URL: <https://docplayer.ru/27601758-Energeticheskaya-strategiya-rossii-do-2035-goda-ministr-energetiki-rossiyskoj-federacii-a-v-novak.html> (дата обращения: 6.08.2020).
5. Пергаменщик Б., Теличенко В., Темишев Р. Возведение специальных защитных конструкций АЭС. Москва: МЭИ, 2011.
6. Смоляр И., Нестеренко В., Смоляр И., Лепин Г. Атомная энергетика - “мирный убийца.” Минск: Белорусский институт радиационной безопасности «Белград», 2008.
7. Зайченко В.М., Чернявский А.А., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Абейдулин С.А. Направления развития энергетики // Энергетические установки и технологии. 2019. № 3(5). С. 53–61.
8. Попель О., Фортов В. Возобновляемая энергетика в современном мире. Москва: Издательский дом МЭИ, 2015.
9. Wuester H., Lee J.J., Lumijarvi A., Flannery S., Veilleux N., Joubert A. Unlocking Renewable Energy Investment: The Role of Risk Mitigation and Structured Finance 2016.
10. Wing L.C., Jin Z., Zhong J. Risk management methods applied to renewable and sustainable energy: A review Risk Management Methods Applied to Renewable and Sustainable Energy: A Review. Journal of Electrical and Electronic Engineering. Special Issue: Sustainable and Renewable Energie // Journal of Electrical and

- Electronic Engineering. 2015. № 1(3). С. 1–12. DOI:10.11648/j.jeee.s.2015030101.11.
11. Нефедова Л.В., Соловьев А.А. Финансовые методы управления рисками при использовании ВИЭ // Энергетическая политика. 2020. № 5(147). С. 62–75. DOI:10.46920/2409-5516_2020_5147_62.
 12. Нефедова Л.В., Соловьев А.А. Анализ рисков освоения возобновляемых источников энергии в России // Проблемы анализа риска. 2015. № 6(12). С. 56–63.
 13. Официальный сайт ГК ХЕВЕЛ [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hevelsolar.com/> (дата обращения: 6.08.2020).
 14. Перечень квалифицированных энергообъектов, функционирующих на основе ВИЭ. Возобновляемые источники энергии [Электронный ресурс]. URL: <https://www.np-sr.ru/ru/market/vie/index.htm> (дата обращения: 6.08.2020).
 15. ГИС Возобновляемые Источники Энергии России [Электронный ресурс]. 2018 URL: <http://gisre.ru/> (дата обращения: 15.01.2018).
 16. База данных NASA SSE. POWER Data Access Viewer [Электронный ресурс]. 2020 URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (дата обращения: 6.08.2020).
 17. Global Trends in Renewable Energy Investment. Frankfurt School. – Frankfurt am Main, 2014.

ФИНАНСОВЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ
В ЭНЕРГЕТИКЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ
ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

Л.В.НЕФЕДОВА, А.А.СОЛОВЬЕВ

Аннотация. Статья посвящена проблемам риск-менеджмента в возобновляемой в мире и в России. Составлен реестр рисков в этой области энергетики с выделением внутренних и внешних рисков. Подробно рассмотрены финансовые методы управления рисками. Анализ зарубежных исследований по применению математических методов управления рисками показал высокую перспективность использования метода анализа сетей (ANP) в возобновляемой энергетике. Приведены примеры новых форм риск-менеджмента, таких как использование погодных деривативов, климатическое моделирование, интегрированные многорисковые контракты и др.

Ключевые слова: энергетика, риск –менеджмент, реестр рисков, ресурсные риски, инвестиционные риски, возобновляемые энергоресурсы, ветроэнергетика, гелиоэнергетика,

Современное состояние возобновляемой энергетики показывает то значительное место, которая данная отрасль заняла на мировых энергетических рынках. Установленные суммарные мощности энергообъектов на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ) и вырабатываемые ими объемы электроэнергии уже позволяют говорить о создании нового энергетического перехода, занимая все более важное место в энергокомплексах многих стран мира. В период 2000-2019 гг. суммарная

мощность электростанций на ВИЭ (солнечная, ветровая и энергия биомассы, без учета традиционной гидроэнергетики) увеличились более чем в 22 раза с 56 ГВт в 2000 г. до 1246 ГВт в 2019 г. За 2018г. было введено в строй более 180 ГВт мощностей на ВИЭ, в том числе - 100 ГВт солнечных фотоэлектрических установок. В мире теперь ежегодно вводится больше мощностей возобновляемой энергетики (около 67% в 2018г.), чем всех новых мощностей на ископаемых видах топлива. К 2019г. г. суммарная мощность электростанций на ВИЭ в мире составила 1246 ГВт, в т.ч. ветроэнергетика – 591 ГВт, гелиоэнергетика – 505 ГВт. Ветроэлектростанции (ВЭС) работали более чем в 90 странах, в 24 странах выработка ветроэнергетики обеспечивала до 5% суммарного энергопотребления, а в 13 странах – более 10%. Девять стран теперь имеют более 20 % солнечной фотоэлектрической и ветровой генерации в своем энергобалансе. В 17 странах мощность возобновляемой энергетики, (без учета крупных ГЭС), превышает 10 ГВт, а в 45 странах превышает 1 ГВт. В Африке и в развивающейся Азии почти 150 миллионов человек получили доступ к электричеству, используя автономные солнечные фотоэлектрические системы [1].

Уже 17 стран имели к 2017г. мощность установок на солнечной энергии к достаточную для удовлетворения более 2% спроса на электроэнергию, а для ряда стран характерны значительно более высокие показатели за 2017 г. в мире было введено в эксплуатацию 98,9 ГВт солнечных электростанций. Это на 29,3% больше, чем в 2016 г. Объем инвестиций гелиоэнергетику возрос в общем по миру лишь на 18% в сравнении предыдущим годом и составил в 2017г. 160,8 млрд. долл. США (рис.1). Это связано со снижением капитальных затрат на солнечную энергетику, в 2017г. вводимые в строй фотоэлектрические системы были примерно на 25% дешевле на мегаватт мощности, чем два года назад. При этом общемировые инвестиции в возобновляемую энергетику в 2017г. составили 333,5 млрд. долл. США, что лишь на 3% выше 2016 г. 40% всех инвестиций в использовании ВИЭ были произведены в Китае [2].

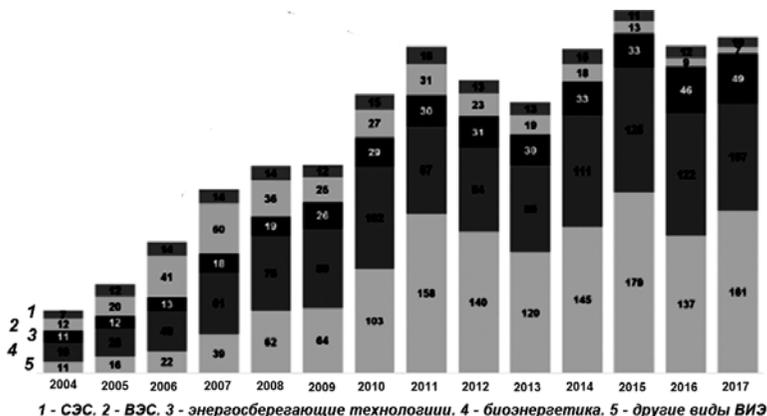


Рис. 1. Динамика общемировых инвестиций в возобновляемую энергетику в 2004-2017гг. по данным BNEF(млрд. долл. США) [2].

Согласно данным доклада подразделения американской корпорации Bloomberg – Bloomberg New Energy Finance (BNEF), к 2050 г. доля ветровой и солнечной энергии в мировом энергообеспечении вырастет с нынешних 7 % до 48 %. В докладе сообщается, что данный прогноз обусловлен значительным снижением стоимости электроэнергии, произведённой за счёт использования этих двух источников, а также созданием новых типов накопителей энергии. В BNEF прогнозируют, что к 2050 г. спрос на энергию вырастет на 62 %, что привлечёт в сектор возобновляемой энергетики новые инвестиции в объёме \$13,3 трлн. На долю ветроэнергетики из этой суммы придётся \$5,3 трлн, на долю солнечной – \$4,2 трлн [3].

В России благодаря действующей системе конкурсного отбора на строительство объектов на ВИЭ и государственным мерам поддержки ДПП инвестирования в возобновляемую энергетику за последние два года произошел значительный прорыв освоению ВИЭ страны. В ветроэнергетике уже введены в строй три крупные ВЭС: Ульяновские ВЭС 1 и 2 (35 МВт и 50 МВт) и Адыгейская ВЭС (150 МВт), ведётся строительство ВЭС в Ставропольском крае, Мурманской, Ростовской областях. Создано отечественное производство компонентов ветроагрегатов и башен, что обеспечивает требуемый уровень локализации. В стране уже в ряде регионов установлены и эффективно работают солнечные фотоэлектрические станции, сертифицированные на рынке дополнительной мощности, как объекты ВИЭ. К 2020г. суммарная установленная мощность солнечных электростанций (СЭС) в России составила 1265,67 МВт, за 2019 г. было введено в строй 568,5 МВт, т.е. 45%. За 2019 г. прирост составил 81,5%. суммарной мощности 2018г. Группой компаний «Хевел» разработано и создано производство в г.Новочебоксарске (260 МВт год) инновационных гетероструктурных солнечных модулей с повышенной эффективностью и КПД более 22%. Планы достижения в России запланированной мощности к 2024 г. мощности электростанций на ВИЭ в 4 ГВт и последующего развития возобновляемой энергетики в стране определяется дальнейшим наращиванием инвестиций и уровня локализации производства. Интенсивность инвестиционных потоков определяется уровнем надежности капиталовложений в возобновляемую энергетику, связанной с состоянием разработки методов управления рисками в данной отрасли.

Цели и задачи исследования.

Активизация процесса освоения ВИЭ в России требует изучения факторов риска, возникающих при создании и эксплуатации энергообъектов, а также анализа основных методов управления рисками, применимыми в возобновляемой энергетике. Последние годы, благодаря наличию обширного фактического материала по объектам на ВИЭ, зарубежными исследователями активно разрабатывается тематика методов риск-менеджмента в возобновляемой энергетике. Для территории России велико значение решения проблем рисков неопределенности необходимых ресурсов для обеспечения рентабельности проекта – обусловленных неравномерностью распределения энергопотенциала ВИЭ во времени и пространстве [4]. Проведенный анализ проблем освоения ВИЭ в нашей стране свидетельствует о необходимости методических разработок по управлению возможными рисками различного характера для безопасного и экономически эффективного использования данных энергоисточников в регионах России.

Реестр внешних и внутренних рисков.

Для разработки методологии управления рисками необходимо предварительно оценить возможные риски на всех стадиях развития проекта сооружения на ВИЭ. Риски объектов на ВИЭ, как и других энергообъектах, можно разделить на внешние риски (не зависящие от девелопера проекта) и внутренние (связанные с деятельностью девелопера по проекту) [5, 6]. Составленный нами реестр основных рисков представлен нами в табл. 1. При этом необходимо отметить, что ресурсные и экологические риски имеют как внутреннюю, так и внешнюю составляющие. Риск дефицита необходимых ресурсов для обеспечения рентабельности проекта – обусловлен неравномерностью распределения энергopotенциала ВИЭ во времени и пространстве. Однако, проведение дополнительных измерений, точный подбор параметров энергоустановок, позволяющих получить наиболее высокий $K_{\text{нум}}$ – значительно снижают данный вид рисков. Природные и экологические риски связаны с возможностью катастрофических явлений (ураганов, ливней, снегопадов, смерчей, землетрясений). К данному виду рисков относятся и возможные последствия для окружающей среды вследствие штатной работы или аварийных ситуаций на энергообъектах ВИЭ.

Риск-менеджмент в возобновляемой энергетике.

Инвесторы принимают решения о поддержке проектов на ВИЭ на основе анализа будущих доходов и оценки основных рисков, которые могут потенциально повлиять на проект. Объемы и условия финансирования находятся в тесной связи с тем, насколько высок уровень риска проекта и от наличия инструментов их снижения. Таким образом, возможности получения необходимых инвестиций и кредитов на проекты возобновляемой энергетики зависят от эффективности управления рисками в этой отрасли. Для объектов возобновляемой энергетики необходим учет рисков на всех этапах разработки проекта: при подготовке технико-экономического обоснования, при проектировании, при организации инвестирования и проведении тендеров, непосредственно при строительстве, а также на этапе функционирования. В настоящее время различают качественную и количественную оценку рисков.

Качественный анализ предполагает выявление:

- источников риска;
- этапов и работ, при выполнении которых возникает риск (установление потенциальных зон риска, изменение риска в динамике, выявление всех положительных и отрицательных моментов, связанных с реализацией решения, содержащего риск).

Количественная оценка позволяет:

- выявить математическую вероятность возникновения выявленных рисков;
- определить значения потерь (или прибыли) от действий в рисковомой ситуации, которые будут являться объектом дальнейшего анализа для принятия решения об управлении данными рисками;
- определить степень влияния различных факторов на рисковомой ситуацию;
- подготовить оптимальный план управления проектом на ВИЭ в рисковомой ситуации;

Таблица 1.

Реестр основных видов рисков при освоении ВИЭ

<i>ВНЕШНИЕ РИСКИ – НЕ ЗАВИСЯЩИЕ ОТ ДЕВЕЛОПЕРА ПРОЕКТА</i>	
ВИДЫ РИСКОВ	НАИМЕНОВАНИЕ РИСКОВ
ПОЛИТИЧЕСКИЕ РИСКИ	Политическая нестабильность, изменение таможенной политики, риск географической нестабильности и государственного неподчинения обязательствам.
РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ РИСКИ	Риски изменения тарифного и экологического регулирования; регулирования в области безопасности; специфические налоговые риски; риски антимонопольного регулирования. Риски, связанные с ограничениями в подсоединении, управлении сетью.
РЫНОЧНЫЕ РИСКИ	Риск недополучения прибыли, риск изменения стоимости капитала, риск влияния крупных транзакций на параметры рынка, финансово-экономические, изменение конъюнктуры рынка, цен на топливо.
ВАЛЮТНЫЕ РИСКИ	Риски, связанные с изменением или нестабильной валютой неблагоприятно влияют на стоимость инвестиций и возникают, когда есть валютное несоответствие активов (доходов) и обязательств (долговое финансирование).
РЕСУРСНЫЕ РИСКИ	Риск, связанный с высокой пространственно-временной изменчивостью потенциала различных видов ВИЭ, неопределенностью связанной с его доступностью, с будущей ценой возобновляемых источников энергии
ПРИРОДНЫЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ	Риски, связанные с возможностью катастрофических явлений (ураганов, ливней, снегопадов, смерчей, землетресений).
<i>ВНУТРЕННИЕ РИСКИ – ОПРЕДЕЛЯЮТСЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ДЕВЕЛОПЕРА ПРОЕКТА</i>	
СТРАТЕГИЧЕСКИЕ (УПРАВЛЕНЧЕСКИЕ) РИСКИ	Разработка и воплощение неверных бизнес-решений, неспособность управленческого аппарата принимать правильные решения с учётом изменений внешних факторов.
ОПЕРАЦИОННЫЕ РИСКИ	Возникновение отклонений в информационных системах и системах внутреннего контроля; связанные с недостаточностью систем контроля, риски связаны с ошибками людей
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РИСКИ	Непреднамеренные сбои в работе, неверный выбор технологического оборудования, нарушения технологических процессов, нерегулярные профилактика и ремонт оборудования, потери в результате сбоев и поломок.

Анализ опыта зарубежных проектов на ВИЭ показал, что при решении задач *риск-менеджмента* можно выделить *нефинансовые* и *финансовые* механизмы управления рисками. Нефинансовые методы направлены преимущественно на действия девелопера проекта на ВИЭ для предотвращения или уменьшения потерь внутренних рисков при технологическом процессе работы объекта. Они включают в свой состав: *технические меры* уменьшения вероятности наступления негативных событий или минимизации потери; *организационные мероприятия* предполагают использование комплекса мер, направленных на оптимальное построение технологических процессов и отдельных операций, на разработку охранных и предупредительных мероприятий; *правовые мероприятия* включают разработку и утверждение соответствующих нормативных документов, которые регламентируют определённые ситуации, возлагают ответственность за нарушение или ненадлежащее исполнение возложенных обязанностей; *обучение персонала* также можно отнести к специфическим мероприятиям по воздействию на рисковые ситуации, т. к. в основе риска часто лежит человеческий или субъективный фактор.

Анализ финансовых методов управления рисками.

В финансовых методах управления рисками в возобновляемой энергетике можно выделить три основные стратегии: *принятие, снижение и перенос риска*. Принятие риска обычно означает оставление всего или части риска за предпринимателем, т. е. на его ответственности. В этом случае предприниматель принимает решение о покрытии возможных потерь в результате свершения рискового события за счет собственных средств, например, самострахование (создание девелопером собственных страховых фондов, которые предназначены для покрытия убытков), компенсация (покрытие риска за счет текущего денежного потока); резервирование (создание фонда средств на покрытие непредвиденных расходов) [7].

При сооружении энергообъекта на ВИЭ распределение риска между участниками проекта является действенным способом его снижения. Он заключается в распределении риска между владельцем, инвестором и исполнителем проекта. Отношения между владельцем проекта и исполнителем проекта в большинстве случаев основаны на договорных отношениях. Поэтому при заключении договора подряда заранее оговариваются все штрафные санкции, которые будут применены к подрядчику за невыполнение им договорных обязательств. Тем самым риск будет распределен между участниками договора и некоторым образом компенсирован. Анализ опыта зарубежных проектов на ВИЭ показал, что наиболее применимыми являются такие методы снижения рисков, как долгосрочные соглашения о закупке электроэнергии, контракты на эксплуатацию и техническое обслуживание, а также передача части рисков третьим лицам

Вопрос о том, какой риск следует принимать на себя является одним из самых сложных и важных в практике риск-менеджмента. Современное понимание риск-менеджмента базируется на так называемой «концепции приемлемого риска», согласно которой основной целью процесса управления риском является придание максимальной устойчивости всем видам деятельности компании путем удержания совокупного риска (ожидаемого уровня потерь) в заданных стратегией развития пределах [7].

Перенос риска – это методы страхования сооружения объектов на ВИЭ, их работы и выдачи гарантированной мощности. Страхование позволяет девелоперу (разработчику) проекта компенсировать потери, которые могут возникнуть в случае негативных последствий существующих рисков. К рискам, принимаемым страховыми компаниями, относятся обычно риски, разработанные для традиционных отраслей промышленности. Сюда относятся: технологические риски (выход из строя оборудования), организационные (задержки в поставках), стихийные бедствия, человеческий фактор, а также часть юридических и финансовых рисков.

Для получения точных прогнозов доходности и планирования доходов с учетом рисков, владельцы ветроэлектростанций должны сочетать в своем портфеле оценки выработки для ВЭС с прогнозами цен на электроэнергию на рынке фьючерсов. С помощью программных продуктов MATLAB® аналитики Horizon-Wind Energy (ныне EDP Renewables), компании владеющей 18 ВЭС в разных районах США, в 2015г. разработали автоматизированную систему по прогнозированию рисков, которая учитывает в своей работе многолетние данные, текущие цены и оценочные прогнозы экспертов. Климатическая изменчивость частично предсказуема и является фундаментальным фактором в объяснении финансового риска в проектах в области возобновляемых источников энергии. Последние годы разрабатывается методология оценки риска, учитывающая прогнозируемость климата. В работе [9] описана методика по снижению риска на PV проектах путем моделирования предсказуемых компонентов солнечной радиации и атмосферных колебаний. Новая модель прибыли для фотоэлектрических установок учитывает предсказуемую климатическую информацию. Модель была адаптирована для оценки рисков PV-инвестиций и применяется в более чем 10 географических районах по всему Чили, где климат сильно зависит от трех океанских атмосферных колебаний (южное колебание Эль-Ниньо, Южный кольцевой режим и Диполя в Индийском океане). Использование модели в этих регионах позволяет снизить ежемесячный финансовый риск на 60-81% по сравнению с традиционной методологией. Моделирование океанско-атмосферных колебаний позволяет добиться наибольшего снижения рисков для южных районов страны, с экстремальными климатическими условиями. Данная методология потенциально применима к гидроэнергетическим, ветровым и другим возобновляемым ресурсам и позволяет исключить прогнозные компоненты климата из расчета риска проекта.

В количественных методах риски в основном измеряются с помощью дисперсии или распределения плотности вероятности технических и экономических параметров. В то время как полуколичественные методы, такие как анализ сценариев и многокритериальный анализ решений, также могут учитывать и нестатистические параметры, такие как социально-экономические факторы [10, 11]. Для оценок рисков и математического анализа решений наиболее широко нашли применение методы моделирования стохастических процессов Монте-Карло [12] и применяется метод анализа сетей (MAC), в англоязычной литературе – Analytical-Network Process (ANP), разработанный Т.Саати [13]. Метод используется для оценки ключевых факторов риска и анализа последствий выбранных альтернативных решений. Также MAC позволяет внедрять различные факторы и критерии – материальные и нематериальные – которые характеризуют оценку рисков. Данный метод позволяет определить, какая из стратегий является приоритетной в общем процессе оценки рисков, а также, какая стратегия управления наиболее приемлема

для группы и отдельных рисков. С использованием ANP классификация рисков и приоритизация методов регулирования рисков проведена в процессе всего жизненного цикла ВЭС [14]. Использование метода анализа сетей позволяет также проводить анализ рисков для выбора стратегии риск-менеджмента: принятие, перенос или уменьшение риска [15]. Эмпирические данные в специально построенной стохастической имитационной модели использованы для оценки экономических последствий инвестиций в технологии использования возобновляемых технологий в электрическую сеть малых островных государств [16]. Смешанное целочисленное линейное программирование использовано для представления и оптимизации рентабельности многоэлементной, многопериодной и пространственно-явной цепи поставок на основе биомассы для производства биоэтанола и биоэлектричества, где одновременно учитываются несколько технологий преобразования. Структура моделирования включает в себя культивацию биомассы, транспортировку, конверсию, распределение и конечное использование в транспортных средствах альтернативного топлива [17].

Далеко не все виды рисков, присущие для объектов возобновляемой энергетики, подлежат страхованию. Страховые компании, как правило, покрывают только те риски, по которым может быть оценена вероятность наступления страхового случая, оценен размер возможного ущерба и вычислена соответствующая страховая премия. Ряд факторов риска, характерных для работы проектов на ВИЭ, и в первую очередь - изменение законодательства и экономического и политического климата в стране, обычно выходят за рамки страхования. Это также касается отдельных проектов с использованием новых технологий возобновляемой энергетики, реализация которых не отвечает базовым требованиям страховых компаний. В связи с этим многие проекты в области возобновляемой энергетики имеют высокий уровень риска, что снижает их перспективы их инвестирования и получения кредитов с точки зрения банков.

Современные формы риск менеджмента в возобновляемой энергетике.

Анализ действующих проектов на ВИЭ показывает, что ряд крупных девелоперов активно используют и альтернативные инструменты передачи риска, адаптированные для возобновляемой энергетики. Рассмотрим некоторые кроме традиционного страхования существующие альтернативные механизмы передачи риска, которые могут повысить инвестиционную привлекательность проектов возобновляемой энергетики.

Погодные деривативы. В течение многих десятилетий единственной возможностью снизить погодные риски было их страхование, и лишь в конце 90 – х годов прошлого века появилось такое понятие, как «срочный контракт на погоду», который в настоящее время интенсивно используется иностранными компаниями для снижения риска, связанного с изменениями погодных условий. Ресурсные погодные риски влияют на надежность выработки большинства систем возобновляемой энергетики и, следовательно, на получение запланированной прибыли. Погодные деривативы — это финансовые фьючерные контракты, выплаты по которым напрямую зависят от погодных условий: количества солнечных дней, колебания скорости ветра и количества осадков, отклонения от заданного значения температуры).

В настоящее время ряд международных и финансовых институтов (Deutsche Börse, Entergy-Koch Trading, Merrill Lynch Global Commodities и др.), уже используют индексы выработки ветряной электроэнергии, основанные на сопоставлении кривых мощности типичных ветрогенераторов и среднегодовых показателей скорости ветра в конкретных регионах. Фирма, владеющая ВЭС, может приобрести годовой фьючерс или опцион, фиксирующий определенное значение индекса. В случае, когда скорость ветра становится ниже данного значения, компания получает компенсацию от продавца опциона, тем самым снижая риск финансовых потерь. Таким образом, девелоперы проектов на ВИЭ могут застраховать (застраховать) свои риски в случае наступления для них неблагоприятного события, однако отказываются от сверхприбыли в случае наступления благоприятного события. Растущее производство электроэнергии из возобновляемых источников энергии в последние годы в сочетании с неопределенностью погодных условий в Германии и Австрии привели к росту рисков компаний-производителей энергии при увеличении числа ВЭС. Биржа EEX в 2016г. предложила эффективный инновационный инструмент хеджирования для управления рисками в виде фьючерсов (погодных деривативов). В качестве базового актива фьючерса на ветряную энергию EEX используется индекс ветра, рассчитываемый EuroWind. Модель меняется каждые 15 минут, исходя из данных метеорологической службы, расположенной в Германии. Регулирование торговли ведется в соответствии с правилами MiFID, как и других деривативов в зоне ЕС [18]. Оценивая годовое производство электроэнергии по проекту с помощью индекса ветра соответствующего региона, возможен прогноз долгосрочного - ожидаемого выхода энергии. Очевидно, что с увеличением доли возобновляемых источников энергии в глобальном масштабе появятся фьючерсы и на выработку гелиоэнергетических станций.

К новым формам управления финансовыми рисками в возобновляемой энергетике можно отнести также *интегрированные многорисковые контракты, рисковый капитал, залог акций, валютный своп и секьюритизация кредитов* [5]. *Многорисковые контракты* позволяют компаниям комбинировать различные риски, присущие конкретному проекту. Очевидно, что вероятность того, что несколько событий произойдут одновременно гораздо ниже вероятности того, что они произойдут по отдельности. Поэтому стоимость многорисковых контрактов значительно ниже страховых тарифов. Кроме этого, данные соглашения могут включать в себя такие риски, которые, как правило, не покрываются страховыми компаниями (политические и деловые риски, колебания валютного курса и цен на товары). Понятие *рисковый капитал* включает в себя различные схемы финансирования непредвиденных убытков, которые применяются в качестве альтернативы традиционному страхованию. Рисковый капитал может принимать форму опционов, конвертируемого долга, гибридных ценных бумаг и привилегированных акций. *Залог акций* позволяет разработчику проекта использовать часть принадлежащих ему акций в качестве средств обеспечения кредита. Кредитор может получить право собственности на акции только в случае неисполнения разработчиком проекта его обязательств по займу. Валютный своп – торгово-финансовая операция между двумя партнерами по обмену разнообразными финансовыми активами, с целью снижения или изменения характера рисков. В возобновляемой энергетике применяются обычно договоры валютного свопа в международных проектах, когда изменение валютного курса играет важную роль. *Секьюритизация кредитов*- при-

влечение финансирования путём выпуска ценных бумаг, обеспеченных активами, генерирующими стабильные денежные потоки и позволяет провести преобразование нерыночных активов в рыночные ценные бумаги. Так, в 2013г. компания SolarCity выпустила пакет ценных бумаг на сумму в \$54 млн., обеспеченных активами, включающими в себя солнечные станции, контракты лизинга и долгосрочные контракты на поставку электроэнергии.

Основным препятствием для более широкого использования альтернативных методов управления финансовыми рисками в возобновляемой энергетике и разработки новых продуктов управления освоения ВИЭ в России является недостаток отраслевой информации. Финансовый сектор требует более глубокого понимания отрасли возобновляемой энергетике, существующих в ней технологий и операционных процессов. Для того, чтобы рассчитывать премии за риск, страховые компании должны обладать полным объемом информации, позволяющим оценить вероятность наступления страхового случая, а также размер возможного ущерба от него. Решением данной ситуации может стать более тесное сотрудничество между разработчиками проектов возобновляемой энергетике и представителями финансового сектора. Поскольку возобновляемая энергетика является достаточно молодым сектором, многие отраслевые данные еще не получили широкого распространения среди специалистов других областей. Поэтому разработчики проектов должны инициировать передачу информации о своих технологиях и операционной деятельности представителям различных финансовых институтов. Данное сотрудничество должно помочь страховым компаниям, банкам и другим частным кредиторам лучше понять и изучить все риски, связанные с проектами возобновляемой энергетике.

Важным фактором снижения рисков и повышения кредитного рейтинга компании при создании объектов на ВИЭ и являются также *гарантии международных институтов и государственного сектора*. Данные гарантии играют ключевую роль в снижении политического риска, так как на сегодняшний день традиционные страховые продукты не покрывают риски, связанные с изменением политической обстановки и законодательства в той или иной стране. Это имеет особенно большое значение при привлечении финансирования для проектов возобновляемой энергетике в развивающихся странах с высоким уровнем политического риска.

Выводы

Высокий уровень риска проектов возобновляемой энергетике снижает их кредитоспособность и, следовательно, затрудняет получение заемного капитала. Фундаментальным требованием для привлечения финансирования является снижение рисков, которые имеют наибольшую вероятность негативного воздействия на проект. Сооружение энергообъектов на ВИЭ получает в настоящее время в России большую государственную поддержку, снижающую риски в работе электростанций, однако программа поддержки составлена до 2024г. В рамках второй программы поддержки возобновляемых источников энергии на период 2025–2035 гг. возобновляемая энергетика должна стать полноправным участником рынка с повышением уровня локализации и возможностью выхода на экспортный рынок. И поэтому особенно важна уже на современном этапе разработка и адаптация в российских реалиях существующей в зарубежной практике методологии управления рисками при использовании всех видов возобновляемых источников энергии как для сетевого, так и для автономного энергоснабжения.

Исследование выполнено в рамках Госзадания (№ 21051400082-4).

Литература

1. Renewables 2019.Global status report// REN21/ UNEP, Paris: REN21 Secretariat, 2019, 336 pp.
2. Global trends in renewable energy investment 2017. /Frankfurt School-UNEP
3. Centre/BNEF. Frankfurt am Main 2017.18pp.
4. New Energy Outlook 2019/Bloomberg New Energy Finance, June 2019, 76 pp.
5. Нефедова Л. В., Соловьев А. А. Анализ рисков освоения возобновляемых источников энергии в России //Проблемы анализа риска. 2015, Т. 12, № 6, С. 56–63.
6. Unlocking Renewable Energy Investment: The Role of Risk Mitigation and Structured Finance, IRENA, 2016, Abu Dhabi, 148 pp.
7. Павлова О.С. Риск-менеджмент на российских энергетических предприятиях// Вестник научно-технического развития.-2011.- № 6 (46).- С. 34-43
8. Ермасова Н.Б. Риск-менеджмент–М.: Издательство «Альфа-Пресс», 2005.– 240 с.
9. Fera M., Macchiaroli R., Fruggiero F and A., Lambiasi A. Risks Prioritization in Decision Making for Wind Energy Investments using Analytic Network Process (ANP) //International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 10 (2017) pp. 2567-2574
10. Cristian Bustos, David Watts, Marysol Ayala Financial risk reduction in photovoltaic projects through ocean-atmospheric oscillations modeling// Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 74, Pages 548-568,2017.
11. Anastasia Ioannou, Andrew Angus, Feargal Brennan, Risk-based methods for sustainable energy system planning: a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 74, July 2017, Pages 602-615.
12. Guido C. Guerrero-Liquet, Juan Miguel Sánchez-Lozano Decision-Making for Risk Management in Sustainable Renewable Energy Facilities:A Case Study in the Dominican Republic»// Sustainability 2016, v.8, # 455.
13. Arnold, U., &Yildiz, O. (2015). Economic risk analysis of decentralized renewable energy infrastructures – A Monte Carlo Simulation approach. Renewable Energy, 77, 227–239
14. Саати Томас Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. Пер. с англ. / Науч. ред. А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. — М.: Издательство ЛКИ, 2008. — 360 с
15. Fera M., Macchiaroli R., Fruggiero F. and Lambiasi A. Risks Prioritization in Decision Making for Wind Energy Investments using Analytic Network Process (ANP) //International Journal of Applied Engineering Research, Volume 12, Number 10, 2017, pp. 2567-2574
16. Калинин В.П., Кокорина М.Т. Оценка рисков генерации энергии из возобновляемых источников // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація, вып. 26, 2013, 225-230.
17. Dornan, M. and Jotzo, F. Renewable Technologies and Risk Mitigation in Small Island Developing States: Fiji's Electricity Sector, Renewable and Sustainable Energy. Reviews, 2015, Vol. 48, August 2015, 35-48

18. d'Amore, Federico & Bezzo, Fabrizio, 2017. "Managing technology performance risk in the strategic design of biomass-based supply chains for energy in the transport sector," Energy, Elsevier, vol. 138(C), pages 563-574.
19. EEXWindPowerFutures // Режим доступа: <http://www.eex.com/en/products/energie-wende-products/wind-power-futures/overview> (Дата обращения 10.03.2020).

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИННОВАЦИИ В ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ И ПРОМЫШЛЕННАЯ ПОЛИТИКА РОССИИ

БРЁЗКИН М.Ю., СИНЮГИН О.А., СОЛОВЬЕВ А.А.

Аннотация. Начиная с 2011 г. в рамках промышленной политики России было создано 34 технологических платформы по ключевым направлениям: медицина и биотехнологии, информационные и коммуникационные технологии, фотоника, авиакосмическая промышленность, ядерные технологии, энергетика, транспорт, новые материалы и металлургия, добыча природных ресурсов, технологии производства и экология. Несмотря на то, что они были инициированы в трудное посткризисное время, они представляют собой дорожные карты для ускоренного развития в контексте экономики России до 2030 г. В статье мы обсуждаем идеи глобальных технологических инновации в следующих областях: биоэнергетика, гидроэнергетика, геотермальная энергия, энергия ветра, солнечная энергия и морская энергия.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, технологические инновации, промышленная политика России.

Введение

По данным Организации экономического сотрудничества и развития [1], мировые расходы на исследования и разработки (НИОКР) составляют 1200 млрд долл. США ежегодно. Национальные цифры сильно различаются, например, сумма НИОКР в России составляет 1% ВВП, а в Республике Корея – 2,7% ВВП. Около 10 млрд дол. США – 0,8% от общей суммы – направляются на исследования и разработки в области возобновляемых источников энергии. Чтобы эффективно направлять эти средства как в коммерческих целях, так и через государственный бюджет, необходимо определить технологические приоритеты в области возобновляемых источников энергии. Такие *глобальные технологические приоритеты* следующие:

- биоэнергетика,
- гидроэнергетика,
- геотермальная энергия,
- энергия ветра,
- солнечная энергия
- морская энергия.

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) – это современный высокотехнологичный инновационный сектор с двузначными ежегодными темпами роста с существенным потенциалом совершенствования и появления новых технологий привлекающий внутренние и международные инвестиции [3]. На потенциально обширном российском рынке – это окно возможностей. Главный вопрос в том, соответствуют ли российские технологические платформы мировым трендам в движении ВИЭ.

Начиная с 2011 г. в рамках промышленной политики России было создано 34 технологических платформы. Несмотря на то, что они были инициированы в трудное посткризисное время, они представляют собой *дорожные карты* для ускоренного развития в контексте экономики России до 2030 г.

Среди этих направлений 4 имеют отношение к возобновляемой энергетике:

- 1) «Биоэнергетика»,
- 2) «Перспективные технологии возобновляемых источников энергии»,
- 3) «Малые децентрализованные энергетические системы»
- 4) «Ресурсы океана».

Расходы на НИОКР в возобновляемой энергетике

Мировые расходы на НИОКР в возобновляемые источники энергии достигли своего пика в 2010 г. и составили 10 млрд долл. США по сравнению с примерно 5 млрд долл. США в 2004 г. Это было время как раз перед резким увеличением общих инвестиций в возобновляемые источники энергии и соответствующим резким падением в возобновляемых источниках энергии. расходы. С тех пор бюджеты НИОКР упали до уровня 8 млрд долл. США в 2016 г. [2].

В инвестициях можно выделить две большие группы – это правительства и частные корпорации. До 2015 г. расходы на НИОКР распределялись между этими двумя участниками равномерно – по 50%. Совсем недавно государственные НИОКР начали сокращаться, и теперь корпоративные НИОКР составляют 70% от общей суммы (5,5 млрд долл. США в год в абсолютном выражении в 2016 г.).

Географически Европейский союз (ЕС) по-прежнему является лидером в НИОКР в области возобновляемых источников энергии, за которыми следует Китай. В отраслевой разбивке большая часть финансирования идет на исследования в солнечной энергетике, до 50% от общего объема (3,6 млрд долл. США в 2016 г.), далее идет биотопливо – 1,7 млрд долл. США (23% от общих инвестиций).

Государственные инвестиции в области солнечной энергии и ветра упали на 30-40% по сравнению с началом 2010-х годов. Доля расходов на НИОКР в общих инвестициях снизилась с 5% в 2010 г. до менее 3% в 2018 г. Несмотря на эту тенденцию, с 2011 г. увеличение установленной мощности ВИЭ продолжилось, что является четким показателем зрелости отрасли, которая может успешно развиваться при уменьшении затрат на НИОКР.

Национальные цели возобновляемой энергетике в России

Первые национальные целевые программы для возобновляемых источников энергии были установлены в 2009 г. Согласно федеральной программе «Энергоэффективность и развитие энергетического сектора» к 2020 г. в России должно было быть установлено 6,2 ГВт новых генерирующих мощностей на основе возобновляемых источников. Развертывание мощностей возобновляемых источников

энергии мощностью 6,2 ГВт соответствует ежегодным инвестициям в размере 2 млрд долл. США в год. Средний показатель инвестиций в ВИЭ в России в 2005-2019 гг. оценивается в 100 млн долл. США в год, что в 10 раз меньше заявленного уровня. Таким образом, доля ВИЭ в национальном энергобалансе вместо того чтобы достигнуть 2,5% составила 0,8% в настоящее время.

В России в области возобновляемой энергетики можно выделить следующие технологические платформы:

Технологическая платформа №3. Биоэнергетика

Цель: сформулировать концепцию развития и дорожную карту реализации национального биоэнергетического сектора.

Координатор: Федеральный исследовательский центр «Курчатовский институт».

Направления:

- Адаптация и интеграция биоэнергетики в контекст существующего энергетического сектора.
- Технологии производства непищевой биомассы в промышленных масштабах.
- Улавливание CO₂ и преобразование в биомассу.
- Утилизация сельскохозяйственных, промышленных и городских органических отходов.
- Ферментация непищевой биомассы до биогаза.
- Каталитическая переработка биомассы в жидкое топливо, спирт и биодизель.
- Выбор видов и биоинженерия.

Технологическая платформа №9. Малые распределенные энергетические системы

Цель: разработка типовых модулей оборудования и проектирование небольших распределенных систем энергоснабжения.

Координаторы: «Агентство прогнозирования энергобаланса», компания «Интер РАО ЭС».

Направления:

- Объединить стандартные блоки генерации, локальные сети, управление и автоматизацию, хранение
- Минимизация затрат на развертывание и распространение, снижение производственных затрат.
- Сформулировать дорожную карту для рыночных, институциональных и научных условий окружающей среды.
- Сформулировать стратегический план по внедрению НИОКР и инноваций в области малых энергетических систем.

Переход от централизованного энергоснабжения к комбинации диверсифицированных энергетических систем, адаптированных к потребительскому спросу и местным условиям

Технологическая платформа №18. Ресурсы океана

Цель: разработать набор прорывных технологий для разработки морских ресурсов.

Координатор: Федеральный научный центр «Концерн МПО Гидроустройство».

Направления:

- Соедините государственно-частное партнерство и научные исследования.
- Акцент в настоящее время на добыче газа и нефти на морском шельфе.
- Роботизированные системы для надводного и подводного применения.
- Судовые объекты энергоснабжения прибрежных городских районов (включая атомную энергетику).
 - Специальные возможности для развития приливной энергетики в Охотском море (Тугурский проект, 20 ГВт).

Обширный потенциал минеральных, био- и энергетических ресурсов в 3 океанах. 5 млн км² – национальная исключительная экономическая зона в Тихом океане.

Технологическая платформа №19. Перспективные технологии возобновляемой энергетики

Цель: ускорить внедрение технологий производства электроэнергии и тепла на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Координатор: ОАО «Русгидро».

Направления:

- Разработать программу стратегических исследований. Координировать деятельность участников технологической платформы.
- Облегчить работу генераторов ВИЭ в существующей энергосистеме.
- Утверждение тарифов на «зеленую энергию» на производство ВИЭ.
- Стандартизация оборудования, конструкции и эксплуатации.
- Мониторинг и управление жизненным циклом проектов ВИЭ.
- Международное сотрудничество в развитии ВИЭ. Россия присоединилась к Международной ассоциации сетей возобновляемой энергии (IRENA) в сентябре 2014 г.

Материалы и методы

Для достижения целей развития возобновляемой энергетики в промышленной политике Россия должна следовать глобальным тенденциям в области исследований и разработок (НИОКР) в этом секторе.

Оценка технологий. Технологии новой и возобновляемой энергии. В основном мы используем стандартный подход к анализу затрат и выгод. Стадия исследований и разработок (НИОКР) требует особого подхода, полезно сравнение с аналогами.

1. Глобальные исследования и разработки в области гидроэнергетики

Инвестиционная стоимость – 1100-1700 долл. США / кВт-ч. Установленная мощность – 816 ГВт по большой ГЭС плюс 280 ГВт по малой ГЭС (с менее 25 МВт установленной мощности), всего 1096 ГВт. Нормированная стоимость электроэнергии (ЛСОЕ) - 5 центов США / кВт-ч [4].

Цели:

- Компьютерная автоматизация в технологиях мониторинга, диагностики, защиты и управления.
- Максимизировать энергию, производимую в рамках существующих проектов, за счет модернизации
- Новые площадки для малых гидроэлектростанций.
- Гибридные системы гидрокрыла.
- Насосные хранилища и балансировка сети

- Повышение эффективности. Снижение затрат на оборудование. Снижение затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание. Повышение надежности и доступности.

2. Глобальные исследования и разработки в области ветра

Инвестиционная стоимость - 1400-1700 долл. США / кВт-ч. Установленная мощность - 487 ГВт. Нормированная стоимость электроэнергии (LCOE) - 6 центов США / кВт-ч [4].

Цели:

- Масштабная интеграция ветряных турбин в электрические сети.
- Прогнозирование мощности, снижение неопределенности в выходной мощности
- Экстремальные условия окружающей среды, безопасность, мощность и шум
- Методы хранения
- Более эффективные генераторы и преобразователи из электронной промышленности.
- Контроль электрической нагрузки и улучшение качества электроэнергии

3. Глобальные исследования и разработки в области солнечной тепловой энергии.

Инвестиционная стоимость - 5000-7000 долл. США / кВт-ч. Установленная мощность - 5 ГВт. Нормированная стоимость электроэнергии (LCOE) - 22 центаUS / кВт-ч [4].

Цели:

- Технология параболического желоба с использованием высокотемпературной жидкости (HTF) или прямого производства пара (DSG).
- Системы центрального ресивера (CRS), использующие: расплавленную соль, ресивер сжатого воздуха и тарельчатые системы Стирлинга.
- Усовершенствование модульных компонентов - концентраторов, гелиостатов или модульных приемников.
- Системы хранения пара высокого давления и сжатого и высокотемпературного воздуха - значительное снижение затрат на электроэнергию
- Оптимизация потерь энергии / эксергии

4. Глобальные исследования и разработки в области фотоэлектрической энергии.

Инвестиционная стоимость - 1300-1700 долл. США / кВт-ч. Установленная мощность - 303 ГВт. Нормированная стоимость электроэнергии (LCOE) - 10 центов США / кВт-ч [4].

Цели:

- Улучшенные оксидные клетки.
- Органические солнечные элементы.
- Наноструктурированные материалы.
- Многопереходные элементы для использования в концентраторах
- Новые концепции механизма преобразования
- Новый ресурс для производства кристаллического кремния.
- Снижение затрат на тонкопленочные технологии.
- Долговременная стабильность до 25 лет жизни.

Исследования и разработки в области материаловедения, физики и химии устройств, электроники, робототехники, строительных технологий, систем электропередачи и хранения.

5. Глобальные НИОКР в области биоэнергетики

Инвестиционная стоимость – 1600-2600 долл. США / кВт-ч. Установленная мощность по выработке электроэнергии -112 ГВт. Нормированная стоимость электроэнергии (LCOE) - 5 центов США / кВт-ч [4].

Цели:

- Разработка концепции биоперерабатывающего завода для сырья биомассы.
- Биологическая конверсия для этанола, биогаза
- Анаэробное сбраживание биогаза
- Сжигание твердых бытовых отходов - электричество и тепло
- Производство биоэтанола и биодизеля из сахара, масличных культур и лигноцеллюлозы.
- Биоводород.
- Доступность дешевого сырья: лесоводство с коротким оборотом, травы, солома, сточные воды.
- Увеличить плотность энергии за счет гранулирования.
- Повышение эффективности конверсионных процессов при снижении их затрат.

6. Глобальные геотермальные исследования и разработки

Инвестиционная стоимость – 2900-3300 долл. США / кВт-ч. Установленная мощность - 14 ГВт. Нормированная стоимость электроэнергии (LCOE) - 7 центов США / кВт-ч [4].

Цели:

- Разработка глубоких (> 3000 м) геотермальных ресурсов.
- Разработка горячих сухих горных пород.
- Увеличение геотермальной комбинированной выработки электроэнергии и тепла.
- Снижение затрат на бурение, каротаж и заканчивание геотермальных скважин.
- Геотермальные системы прямого действия, включая геотермальные тепловые насосы и отопление помещений.
- Анализ жизненного цикла, устойчивость производства геотермальной энергии
- Улучшенные циклы эффективности преобразования, оптимизация эксергии.
- Наведенная сейсмичность на геотермальных участках

7. Глобальные исследования и разработки в области океанической/морской энергетики

Инвестиционная стоимость - 2000-5000 долл. США / кВт-ч. Установленная мощность - 0,5 ГВт. Нормированная стоимость электроэнергии (LCOE) - более 20 центов США / кВт-ч [4].

Цели:

- Системы приливных течений на базе подводных турбин (перенос турбин и роторов из судостроительной промышленности).
- Градиент солености (эффективные мембраны).
- Преобразование тепловой энергии океана (ОТЕС)

- Оценка и мониторинг ресурсного потенциала
- Волновые энергетические системы.
- Совершенствование систем отбора мощности.

Рис. 1 иллюстрирует относительное положение 7-ми макротехнологий возобновляемой энергетики на основе кривой себестоимости – инструмента оценки технологий. Картинка качественная (нет конкретные единицы на оси), но она правильно отражает уровень зрелости и структуру сектора возобновляемой энергетики. Сразу под горизонтальной красной линией – солнечные фотоэлектрические технологии, демонстрирующие ключевое достижение возобновляемых технологий в 2010-х гг. – солнечные фотоэлектрические установки для коммунальных предприятий достигли рентабельности даже без каких-либо субсидий, их производственная себестоимость упала ниже паритета сети [5].

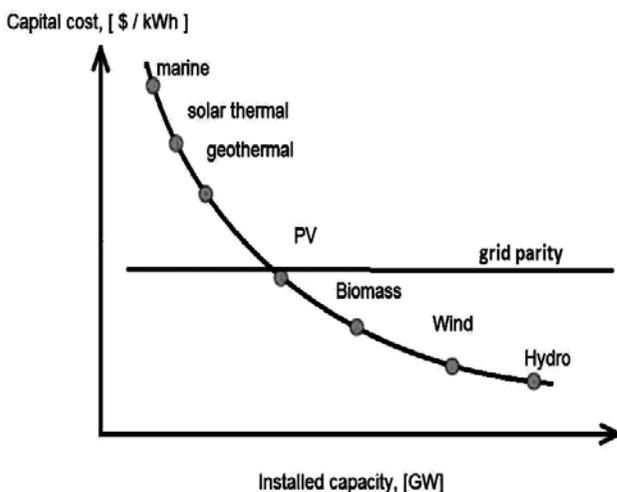


Рис. 1. Инструмент оценки технологий: кривая себестоимости

К низкоуглеродному будущему

Внедрение и расширение набора технологий использования возобновляемых источников энергии, описанных выше, ведет к энергетической системе, менее ориентированной на углерод. Ранние признаки так называемого «великого перехода» к этой новой системе происходит в области инвестиций в энергетику.

Доля ископаемого топлива в общих инвестициях в энергию резко снизилась в 2014–2016 гг., приблизившись всего к 50% (десять лет назад она составляла около 70%) [6]. Рост сместился в сторону возобновляемых источников энергии, сетей, хранилищ и энергоэффективности. Они увеличивают свою долю за счет стабильного роста.

Доля возобновляемых источников энергии увеличилась с 16% до 19%, сетей с 12% до 16% и инвестиции в повышение эффективности составили 14% от общего объема в 2018 г. по сравнению с 10% в 2014 г.

В 2018 г. инвестиции в энергоэффективность достигли 281 млрд долл. США. Инвестиции в разведку и добычу нефти и газа в период 2014–2016 гг. сократились на 44%. В абсолютном выражении инвестиции в энергию в мировой экономике составили 1 830 млрд долл. США в 2018 г., что на 8% меньше, чем в 2014 г., в основном из-за сокращения добычи нефти и газа. Расходы на производство электроэнергии достигли 420 млрд долл. США, из которых около 70% составляют возобновляемые источники энергии, или 288 млрд долл. США.

Затраты на все возобновляемые источники энергии, включая биотопливо для транспорта и солнечные тепловые установки, составили 313 млрд долл. США в рамках широкой переориентации инвестиций в сторону низкоуглеродных источников энергии.

В Китае, крупнейшем по размеру инвесторе в энергетику, в инвестициях в новую энергию преобладают расходы на возобновляемые источники энергии, сети и энергоэффективность. Таким образом, в 2018 г. введено на 25% меньше угольных мощностей по сравнению с 2015 г.

Выводы

Учитывая отставание во времени, на 5–7 лет вперед, в середине 2020-х гг. мы должны испытать установление новой структуры энергетического баланса в глобальном масштабе, а также в отдельных странах. Структура мировой энергетики в ближайшее десятилетие сильно диверсифицируется, что будет способствовать развитию конкуренции между разными видами энергии, между странами и регионами. Будут соответствующие экономические и социальные последствия.

Производство возобновляемой энергии продолжало активно расти, достигнув к 2018 г. почти 22% от мирового производства по сравнению с 18% в 2007 г. Инвестиции в новые мощности возобновляемых источников энергии превысили 270 млрд долл. США во всем мире в 2016 г. и, вероятно, останутся на высоком уровне.

Уровень инвестиций в возобновляемые источники энергии в России должен быть значительно увеличен. В среднем, объем инвестиций в ВИЭ в России в 2005–2014 гг. оценивается в 100 млрд долл. США в год, что в гораздо меньше требуемого уровня, заявленного в прогнозе правительства. Для достижения целей развития возобновляемой энергетики промышленность России должна следовать глобальным тенденциям в области исследований и разработок (НИОКР) в этом секторе.

Литература

1. Sustainable Development Indicators. OECD. Paris. 2016.
2. Renewables 2017 Global Status Report. REN21. Paris: REN21 Secretariat. 2017.
3. Берёзкин М., Синюгин О., Соловьев А. География инноваций в сфере традиционной и возобновляемой энергетик мира // Вестник Московского университета. Серия 5. География. №1, 2013. с. 28–32.
4. Renewable Power Generation Costs in 2017. International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi. 2018.
5. Bloomberg New Energy Finance 2017. BNEF. NY. 2017 // www.bloomberg.com/bnef
6. World Energy Outlook 2016. International Energy Agency. Paris. 2016.

«ЗЕЛЕНАЯ» ЭНЕРГИЯ АРКТИКИ ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

*БУШУЕВ В.В., НЕФЕДОВА Л.В., СОЛОВЬЕВ Д.А.,**ГАБДЕРАХМАНОВА Т.С.*

Аннотация. В статье представлен обзор современных тенденций в области развития «зеленых» энергетических технологий и устойчивого развития энергетического комплекса Арктической зоны России. Рассмотрены проблемы и перспективы применения технологий возобновляемой энергетики в суровых природных условиях Арктики и их возможная роль в повышении эффективности использования генерирующих мощностей.

Ключевые слова: зеленая энергетика, экономика энергетики, технологии использования ВИЭ, устойчивое развитие

Освоение природных ресурсов Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) имеет стратегическое значение для социально-экономического развития страны. В связи с этим появляется необходимость дополнительно исследовать новые возможности по разработке и внедрению методов построения распределенной энергетической инфраструктуры автономного энергоснабжения арктических территорий России. Также требуется оценка их энергетической и социально-экономической эффективности. Россия является северной державой: более 60% ее территории приходится на северные регионы, в которых проживает около 12 млн. человек. Значение Севера для экономики России велико, поскольку эти территории исключительно одарены природой: свыше половины леса, гидроресурсов, более 80% природного газа, нефти, 50% деловой древесины, 80% золота, меди и никеля; почти все алмазы, кобальт и многие редкие и редкоземельные металлы. Арктика (особенно российская) сегодня является крупнейшей нефтегазоносной провинцией на Земле, способной спокойно обеспечивать углеводородами потребности всего человечества в 21 веке. Северный морской путь является глобальной транспортной системой, способной обеспечивать кратчайшие перевозки: транзит в США и Японию из Европы по нему дешевле, чем через Суэцкий канал (Рис.1).

Существующее состояние с энергоснабжением арктических территорий не может считаться удовлетворительным. Основная проблема транспортного снабжения арктических территорий заключается в сезонности ее функционирования. Доставка топлив для работы местных систем энергоснабжения может осуществляться только периодически. К настоящему времени водный транспорт обеспечивает до 80% поставок, в частности, в Якутию. Продолжительность работы водного транспорта не превышает 120 – 150 суток в течение года. Необходима разработка и создания технологий, обеспечивающих местное энергоснабжение арктических территорий с использованием местных топливно-энергетических ресурсов. В качестве местных топливно-энергетических ресурсов должны использоваться также и различные виды отходов, включая твердые и жидкие бытовые отходы.

В работах [1-3] были получены результаты оценки энергетической и социально-экономической эффективности перспективного развития энергетической инфраструктуры на базе ВИЭ в районах постоянного проживания людей и трудовой деятельности показали, что АЗРФ обладает как существенным потенциалом, так и значительной потребностью в применении ВИЭ.



Рис. 1. Схема СМП.

В рамках этого исследования были рассмотрены принципы построения энергетической инфраструктуры в Арктике с учетом характерных особенностей региона — удалённость и малочисленность населённых пунктов, развитие крупных транспортно-логистических и производственных узлов, климатические условия и др. Показано, что необходимым условием будущей эффективности энергетического комплекса в АЗРФ является соответствие принципам устойчивого развития. Важные результаты, полученные в ходе выполнения исследования можно сгруппировать по трем основным тематическим направлениям: (1) географического анализа общего состояния энергетического комплекса АЗРФ с точки зрения использования различных энергетических ресурсов; (2) оценки потенциала ВИЭ и экологической эффективности энергоустановок с использованием ВИЭ; (3) влияния климатических изменений на развитие энергетической инфраструктуры в пределах жизненного цикла как действующих, так и проектируемых энергоустановок. Полученные результаты, направленные на решение актуальных проблем развития энергетической инфраструктуры в арктическом регионе России, будут способствовать оптимизации состава и структуры энергетического хозяйства арктических территорий в районах постоянного проживания, снижению нагрузки на природные экосистемы и устойчивому экономическому и социальному развитию региона в целом. На основе данной работы [4] были сформулированы рекомендации по адаптации энергетической инфраструктуры к изменяющимся климатическим и экологическим условиям и выполнена разработка базовых принципов построения энергетического комплекса АЗРФ с точки зрения комплексности и устойчивого развития.

Благодаря относительно высокому валовому и техническому потенциалу возобновляемых источников энергии в Арктическом регионе (рис.2 и 3) возможно внедрение соответствующих технологий для обеспечения более устойчивого энергоснабжения[1], [5]. Решения, сочетающие в себе традиционные и возобновляемые энергетические технологии, способны удовлетворить основные требования надежности, способствуя при этом повышению устойчивости нефтегазовой отрасли.

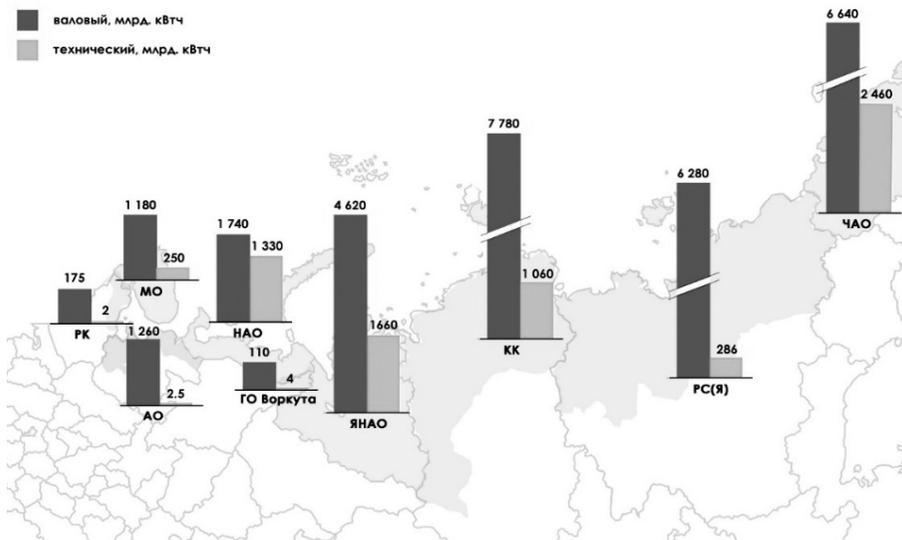


Рис.2. Годовой валовый и технический потенциал ветровой энергии на материковой части АЗРФ на высоте 50 м (в расчете на площадь субъекта, входящую в АЗРФ) (диаметр ветроколеса - 50 м). [1].

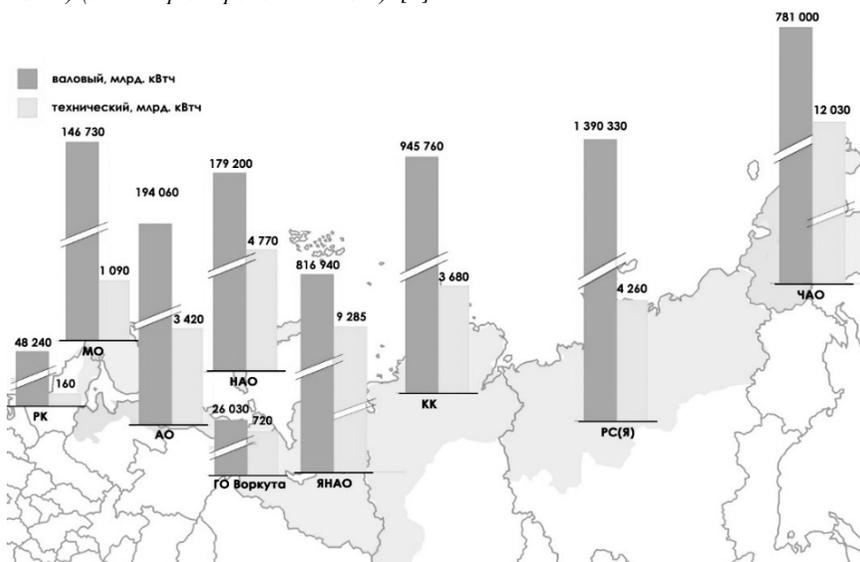


Рис.3. Валовый и технический потенциал солнечной энергии в АЗРФ (в расчете на площадь субъекта, входящую в АЗРФ). [1].

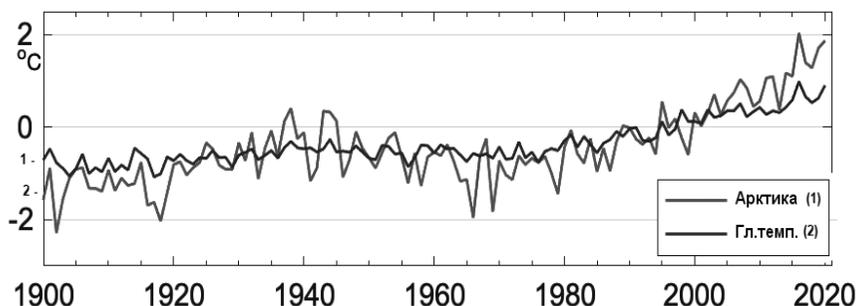


Рис.4. Среднегодовые аномалии температуры вблизи поверхности Земли (в °С) для наземных метеостанций, расположенных в Арктике (60-90 °N; красная линия) и глобально (синяя линия) за период 1900-2020 гг. По сравнению со средними значениями 1981-2010 гг. Источник: данные CRUTEM4 SAT получены из Отдела климатических исследований (Университет Восточной Англии) и Метеорологического бюро.

Основные экономические интересы арктических государств по-прежнему в большей степени сосредоточены вокруг природных ресурсов и новых транзитных возможностей [6]. Для Российской Арктики (РА) этот интерес определяется высоким традиционным и нетрадиционным углеводородным потенциалом региона, а также другими природными ресурсами и новыми транспортно-логистическими маршрутами, такими как Северный морской путь. Тем не менее, будущее социально-экономическое развитие региона во многом зависит не только от эксплуатации природных ресурсов, но и от развития энергетической и транспортной инфраструктуры. В настоящее время транспортировка и доставка традиционных энерго-ресурсов в арктические регионы составляют значительную часть общих затрат на производство электроэнергии и содержание существующей инфраструктуры. Наиболее перспективным способом обеспечения надежного и доступного энергоснабжения развивающегося Арктического региона являются местные и возобновляемые источники энергии. Такие решения по энергоснабжению Арктического региона возможны благодаря наличию новых технологий и материалов, которые существенно влияют на его эффективность и надежность. Их успешная реализация будет содействовать устойчивому развитию энергетической инфраструктуры и энергоснабжения в российской Арктике в соответствии с климатическими и экологическими вызовами. Необходимо более широкое внедрение децентрализованных решений в области производства энергии, основанных на совместном использовании традиционных и местных возобновляемых источников энергии. Особенно это важно для развития инфраструктуры Северного морского пути и аналогичным удаленным децентрализованным потребителям энергии. Более широкое внедрение децентрализованных комбинированных решений в области производства энергии обеспечит основу для устойчивого регионального развития.

Арктика – это специфический географический регион с экстремальными климатическими условиями, уязвимой природной средой, но достаточно интенсивно

идущей индустриализацией. Также этот регион является наиболее чувствительным к глобальным климатическим изменениям. Среднегодовая аномалия температуры в Арктике с октября 2019 года по сентябрь 2020 года была на 1,9° С теплее, чем в среднем за 1981-2010 годы для участков суши между 60 и 90° с.ш. (рис. 4). С 2000 года средние аномалии температуры в Арктике более чем в два раза превышают глобальные аномалии.

Специфика Арктики требует альтернативных решений для обеспечения энергоснабжения потребителей энергоресурсов, что обусловлено растущим спросом на энергоносители и маломасштабным децентрализованным характером энергоснабжения [7]. В настоящее время большая часть энергопотребления в регионе покрывается за счет углеводородных энергоресурсов, поставляемых с материка. Технологии возобновляемой энергетики могут быть эффективно реализованы для удовлетворения потребностей небольших децентрализованных потребителей энергии в российской Арктике, но в настоящее время они применяются в очень скромных масштабах. Экологические вызовы и угрозы, связанные с изменением климата, их взаимосвязь и влияние на технологический выбор будущего энергоснабжения региона, должны рассматриваться ис точки обеспечения будущего устойчивого развития Российской Арктики.

Изменения климатических характеристик неизбежно оказывают влияние на условия эксплуатации, и на эффективность работы энергообъектов. В работе [8] исследована степень этой зависимости для разных типов инфраструктурных объектов ТЭК. Приведены данные оценки последствий воздействия глобальных климатических изменений на инфраструктуру ТЭК и возможности по ее адаптации, которые включают: (1) влияние на объекты электрогенерации; (2) влияние на транспортировку энергии; (3) проблемы оттаивания вечной мерзлоты и солифлюклии; (4) воздействие климата на электропотребление и социально-экономические последствия; (5) роль распределенной энергетики и ВИЭ в адаптации к изменению климата. Показано, что для территорий РА с изолированным энергоснабжением развитие энергоэффективных систем и ВИЭ позволит снизить климатические риски для устойчивого роста данного сектора экономики, хозяйственного комплекса в целом за счет как лучшей их адаптации к последствиям климатических изменений, так и сокращения техногенных выбросов парниковых газов.

Северные территории играют значительную роль в национальной экономике, в обеспечении безопасности и геополитических интересов России. В рамках новой стратегии развития северных территорий до 2035 г планируется создание предприятий топливно-энергетической отрасли, отвечающих современному уровню развития и не оказывающих отрицательного воздействия на уникальную северную среду. Для практической реализации данной программы необходима разработка новых технологий местного энергоснабжения, которые могут быть использованы в арктической зоне. Необходимо обеспечение северных регионов страны экологически чистым энергетическим и моторным топливом на основе местного сырья, ограничение и, в конечном итоге, полное исключение дорогостоящего северного завоза нефтепродуктов. Чтобы решить эту задачу необходима разработка методов комплексной оценки социально-экономической эффективности развития экологически безопасной возобновляемой энергетики в отдаленных малонаселенных районах Севера, в том числе для инфраструктурного обеспечения Северного морского пути и особо охраняемых природных территорий.

Результаты исследования получены за счет средств РФФИ (проект № 1 8-05-60252) в рамках Госзадания (регистрационный номер 21051400082-4, 075-00460-21-00, 0128-2021-0003).

Литература

1. Бушуев В.В., Габдерахманова Т.С., Моргунова М.О., Нефедова Л.В., Соловьев Д.А. Энергетическая инфраструктура Арктической зоны Российской Федерации. Москва: ИД «Шанс», 2019. 146 с. ISBN:978-5-6042605-8-6.
2. Solovyev D.A., Morgunova M.O., Solovyev A.A. Creating a Synergy: Renewable Energy to Develop the Russian Arctic (140718-030623) // *Advanced Agro-Engineering Technologies for Rural Business Development* IGI Global, 2019. С. 300.
3. Соловьев Д.А., Моргунова М.О. Комплексное освоение российской Арктики: климатические вызовы, транспортные коридоры и новые энергетические технологии // *Энергетическая политика*. 2018. № 4. С. 89–98.
4. Morgunova M.O., Solovyev D.A., Nefedova L. V., Gabderakhmanova T.S. Renewable energy in the Russian Arctic: Environmental challenges, opportunities and risks // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. (1565). С. 012086. DOI:10.1088/1742-6596/1565/1/012086.
5. Нефедова Л.В., Соловьев Д.А., Бушуев В.В., Зайченко В.М. Риски включения возобновляемой энергетики в ТЭК Арктики в свете возможных климатических изменений // *Материалы VI Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы» и XII школы молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» имени чл.-корр. РАН Э.Э. Шпильрайна. 12-15 октября 2020 г.* 2020. С. 483–488. DOI:10.33580/2313-5743-2020-8-1-483-488.
6. Нефедова Л.В., Соловьев Д.А. Природно-климатические изменения и обеспечение энергетической безопасности в арктической зоне РФ // *Энергоэффективность. Ценология. Экология и Энергобезопасность: Материалы научной конференции (г. Астрахань, 16-19 сентября 2020 г)* под науч. ред. д-ра пед. наук, проф. Зайнутдиновой Л.Х. и д-ра техн. наук, проф. Тягунова М.Г. 2020. С. 328–334.
7. Нефедова Л.В., Соловьев А.А. Новые вызовы и риски на пути развития распределенной энергогенерации в арктическом регионе России // *Энергетическая политика*. 2018. № 4. С. 99–108.
8. Нефедова Л.В., Соловьев Д.А. Оценка последствий воздействия глобальных климатических изменений на инфраструктуру ТЭК и возможности адаптации в регионах Российской Арктики // *Всероссийская конференция «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования»*, 26–28 ноября 2019 года. Москва. Сборник тезисов докладов. 2019. С. 166.

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АТОМНОЙ И
ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ*М.Ю. БЕРЁЗКИН, А.А. СОЛОВЬЁВ, К.С. ДЕГТЯРЁВ*

Аннотация. Проводится анализ экологической и экономической эффективности, рисков и перспектив развития энергетики, базирующейся на различных типах энергоносителей, начиная с 1960-х гг. Показано, что снижение доли атомной энергии в мировом энергетическом балансе пока не может быть компенсировано за счет возобновляемых источников энергии и приводит к росту использования ископаемых энергоносителей. Сделан вывод о необходимости с целью устойчивого развития неуглеродной энергетики развивать возобновляемую и атомную энергетику там, где риски экологических последствий производства энергии минимальны.

Ключевые слова: атомная энергия, возобновляемые источники энергии, энергетическая политика.

Введение

Цель данной работы – выявление и сравнительная оценка роли атомных электростанций (АЭС) и различных типов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в формировании неуглеродного энергетического уклада, росте эколого-экономической эффективности; анализ рисков и перспектив развития многополярной энергетики. В содержании настоящей статьи, построенной на материалах статистического и аналитического характера, рассматривается динамика развития мировой неуглеродной энергетики во второй половине XX - начале XXI в., сравнительная оценка тенденций и закономерностей развития, корреляция развития атомной энергетики с изменениями экологических параметров среды и экологической эффективностью различных типов энергетики. Представлены сравнительные оценки экономической эффективности энергетики на основе различных источников энергии с обсуждением неопределенностей и рисков в отношении АЭС и ВИЭ и их влиянием на перспективы развития энергетики на основе неуглеродных источников энергии.

Динамика развития мировой энергетики на основе атомных и возобновляемых источников

Доля атомной энергии в мировом производстве энергии в период с 1965 по 2014 гг. выросла с 0,2 до 4,4%, или с 6 до 574 млн т н.э. [3]. Атомная энергетика пережила два периода: активный рост до начала 1990-х гг. и стагнацию, начиная с 2000-х годов. Максимальной величины доля атомной энергетики в мировой структуре потребления энергии достигала в 1995-2002 гг. - 6,1-6,3%, после чего начала снижаться. Максимальная величина потребления атомной энергии была достигнута в 2006 г. - 635 млн т н.э., после чего началось снижение и абсолютных показателей, позже стабилизировавшихся и даже продемонстрировавших незначительный рост в 2012-2014 годах.

Еще более отчетливее данная динамика прослеживается на примере производства электроэнергии (табл. 1), доля которого в мировом потреблении энергии выросла с 1985 по 2014 гг. с 31 до 41% - соответственно с 9 956 ТВтч (2253 т н.э.) до 23 537 ТВтч (5326 т н.э.).

Таблица 1
Динамика и структура по источникам производства электроэнергии в 1980-2014 гг., ТВтч [US Energy Information Administration, 2012; BP Statistical Review of World Energy, 2015]

Источники энергии	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2014
Объемы производства электроэнергии, ТВтч								
Ископаемые	5 589	6 041	7 136	7 787	9 333	11	13	15
Атомная	684	1 426	1 909	2 210	2 450	2 625	2 630	2 537
Гидроэнергия	1 723	1 952	2 144	2 453	2 623	2 905	3 422	3 885
Другие ВИЭ	31	54	135	179	249	391	765	1 401
Всего	8 018	9 460	11	12	14	17	20	23
Доля в общей структуре производства, %								
Ископаемая	69,7	63,9	63,1	61,8	63,8	66,0	66,8	66,8
Атомная	8,5	15,1	16,9	17,5	16,7	15,1	12,9	10,8
Гидроэнергия	21,5	20,6	19,0	19,5	17,9	16,8	16,7	16,5
Другие ВИЭ	0,4	0,6	1,2	1,4	1,7	2,3	3,7	6,0
Всего	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Таблица 2
Изменение долей различных энергоносителей в мировом энергобалансе в 1980-2014 гг.

Источник энергии	1980	1995	1980 - 1995	2010	1995 - 2010	2014	2010 - 2014	1980 2014
В мировом потреблении первичной энергии								
Ископаемые углеводороды (уголь, нефть, газ)	91,7%	86,9%	-4,8%	87,0%	+0,1%	86,3%	-0,7%	-5,4%
Атомная	2,4%	6,1%	+3,7%	5,2%	-0,9%	4,4%	-0,8%	+2,2%
Гидроэнергетика	5,8%	6,5%	+0,7%	6,5%	+0,0%	6,8%	+0,3%	+1,0%
Другие ВИЭ	0,1%	0,4%	+0,3%	1,4%	+1,0%	2,5%	+0,9%	+2,4%
Всего ВИЭ	5,9%	6,9%	+1,0%	7,9%	+1,0%	9,3%	+1,4%	+3,4%
В мировом производстве электроэнергии								
Ископаемые углеводороды (уголь, нефть, газ)	69,7%	61,8%	-7,9%	66,8%	+5,0%	66,8%	+0,0%	-2,9%
Атомная	8,5%	17,5%	+9,0%	12,9%	-4,6%	10,8%	-2,1%	+2,3%
Гидроэнергетика	21,5%	19,5%	-2,0%	16,7%	-2,8%	16,5%	-0,2%	-5,0%
Другие ВИЭ	0,4%	1,4%	+1,0%	3,7%	+2,3%	6,0%	+2,3%	+5,6%
Всего ВИЭ	21,9%	20,9%	-1,0%	20,4%	-0,5%	22,5%	+2,1%	+0,6%

Максимальная доля атомной энергетики в мировом производстве электроэнергии была достигнута в 1993-1999 гг., после чего снижалась с 2012 г. и затем стабилизировалась. По отношению к другим видам производства энергии максимальная доля атомной энергии совпала с минимальной долей генерации на основе ископаемых энергоносителей. Снижение доли атомной энергетики, напротив, усилило роль ископаемых энергоносителей в мировом энергетическом балансе. Их доля в общем потреблении энергии к 2007 г. выросла до 87,6% и вновь упала до уровня ниже 87% после 2002 [1].

Таблица 3

Структура производства по источникам энергии.

Источник: IEA Key World Energy Statistics, 2020.

Энергоноситель	1973		2019	
	Производство энергии, млн т н.э.	Доля в мировом производстве	Производство, млн т н.э.	Доля в мировом производстве
Уголь	1 502	24,6%	3 543	28,4%
Нефть	2 815	46,1%	3942	31,6%
Газ	977	16,0%	2 794	22,4%
Всего ископаемые углеводороды	5 294	86,7%	10 841	82,4%
Атомная энергия	55	0,9%	561	4,5%
Гидроэнергия	110	1,8%	321	2,4%
Биотопливо и мусор	641	10,5%	1 337	10,0%
Другие ВИЭ	6	0,1%	237	1,9%
Всего ВИЭ	757	12,4%	1 805	13,3%
Всего	6 106	100,0%	12 476	100,0%

Частично падение доли атомной энергии компенсировалось за счет развития энергетики на основе ВИЭ, но в большей степени это происходило за счет роста ископаемой энергетики (табл. 2) прежде всего в электроэнергетике, также как и снижение ее доли достигалось преимущественно за счет развития атомной энергетики.

В целом в 1980-2014 гг. в мировом потреблении первичной энергии доля ископаемых углеводородов уменьшилась с 91,7 до 86,3%, а доля ВИЭ, включая гидроэнергию, выросла с 5,9 до 9,3%. В то же время производство электроэнергии росло темпами, опережающими общий объем энергопотребления, и этот прирост достигался либо за счет атомной энергетики в период ее активного роста, либо за

счет ископаемых углеводородов в период стагнации и сокращения атомной энергетики.

Обращает на себя внимание, что в период 1980-2014 гг. доля ВИЭ (включая гидроэнергию) в мировом производстве электроэнергии выросла всего на 0,6% – с 21,9 до 22,5%, при этом доля гидроэнергетики заметно сократилась – с 21,5 до 16,5%, а рост других видов возобновляемой энергетики в основном компенсировал сокращение доли гидроэнергетики. При этом необходимо отметить, что в период с 1973 по 2019 гг. доля ВИЭ в структуре мирового производства энергии выросла с 12,4 до 13,3% на фоне более заметного подъема с 0,9 до 4,8% атомной энергетики.

Таким образом, фактическая динамика развития энергетики на основе ВИЭ не вполне соответствует распространенным представлениям о ее бурном росте, а ключевая роль в сокращении доли энергетики, основанной на ископаемых энергоносителях, принадлежит атомной энергии.

Экологическая эффективность различных типов энергетики

Динамика развития атомной энергетики обнаруживает корреляцию с изменениями экологических параметров среды. В частности, период активного роста атомной энергетики совпадает с менее высокими темпами роста содержания CO_2 в атмосфере. Кроме того, в группе наиболее развитых стран существенно менее высокими значениями эмиссии CO_2 на душу населения отличается Франция – страна с наиболее высокими показателями доли АЭС в производстве электроэнергии – более 70%.

При этом доля ВИЭ – около 16%, включая гидроэнергетику, во Франции ниже, чем в большинстве ведущих стран (для сравнения, в Германии – около 25%).

В целом анализ всего жизненного цикла производства (от добычи энергоносителя и изготовления оборудования до утилизации отходов и выведения из эксплуатации) дает следующие средние (медианные) показатели эмиссии [8] для разных типов действующего в настоящее время производства электроэнергии в граммах эквивалента CO_2 на 1 кВт·ч произведенной электроэнергии (CO_2 экв/кВт·ч):

- тепловые (угольные и газовые) электростанции - 490-820;
- тепловые станции на биомассе - 230-740;
- фотовольтаические - 41-48;
- геотермальные - 38;
- солнечные концентраторы - 27;
- ГЭС - 24;
- АЭС - 12;
- ветровые - 11-12.

Интегральным показателем эколого-экономической эффективности может считаться величина внешних (экстернальных) издержек на производство единицы продукции. Для стран ЕС диапазон внешних издержек производства электроэнергии (евроцент/кВт·ч) для различных источников энергии по данным на 2003 г. был оценен в следующих величинах [3]:

- уголь - от 2 до 15 евроцент/кВт·ч;
- нефть - от 3 до 11;
- газ - от 1 до 4;
- солнечная (фотовольтаическая) энергия - 0,6;
- биомасса - от 0 до 5;
- гидроэнергия - от 0 до 1;

- атомная энергия - от 0,2 до 0,7.
- ветер - от 0 до 0,25.

Таким образом АЭС оказываются вполне экологически конкурентоспособными с электростанциями, работающими на ВИЭ, практически превосходя их все, кроме ветростанций, с точки зрения эколого-экономической эффективности в комплексном и долгосрочном плане.

Что касается собственно экономической эффективности энергетики, то здесь в качестве интегрального показателя используются выровненные затраты (levelized costs) на производство единицы энергии. Выровненные затраты объединяют инвестиционную, операционную и организационную составляющую затрат. Суммарные затраты, включающие затраты на строительство, обслуживание работы электростанции, организационные и транзакционные затраты распределяются на весь период работы электростанции, за время которого она вырабатывает определенное количество энергии.

Для вычисления выровненных затрат необходимо учитывать либо принять в качестве допущений ряд данных. В их числе: период времени, для которого вычисляются выровненные затраты; инвестиционные затраты на единицу установленной мощности; КИУМ электростанций и выработка энергии в единицу времени; цены на энергоносители; финансовые коэффициенты, связанные с временной стоимостью денег и ставкой дисконтирования, ценой капитала и др. В частности, [4] приводит расчетные данные о выровненных затратах на производство электроэнергии различными типами электростанций, вводимых в действие к 2020 г. (табл. 4), принимая следующие допущения: период времени – 30 лет; средневзвешенная цена капитала – 6,5%; КИУМ – см. в табл. 4. Исходя из этого суммарные выровненные затраты на выработку электроэнергии на ТЭС меняются в широком диапазоне от 72 до 145 долл./МВт-ч (7-15 центов за 1 кВт-ч) суммарной мощностью 1 ГВт (мощность сравнительно небольшой АЭС) потребовало бы площади в 100 км², а при КИУМ, составляющем 0,7 от расчетной величины – уже 143 км². А ответ на вопрос, достигнет ли срок службы ветровых и фотовольтаических мощностей 30 лет, следует, на данный момент, считать открытым.

Неопределенности, риски и перспективы развития энергетики

Дополнительным доводом в пользу перспективности атомной энергетики в качестве эколого-экономической альтернативы традиционной углеводородной энергетике является обозначившаяся в последние годы неопределенность перспектив энергетики на основе ВИЭ. С экологической точки зрения выявляется ряд непредвиденных последствий (unintended consequences) энергетики на основе ВИЭ, обозначенных, в частности, в работе норвежского исследователя О.Андерсена [5]. Нельзя исключать того, что с течением времени будут выявляться новые непредвиденные последствия с влиянием на динамику развития ВИЭ. Следует обратить внимание на то, что в последние годы на фоне роста вводимых мощностей обозначилось замедление темпов роста энергетики на ВИЭ.

Так, в солнечной энергетике производственные мощности с 1996 по 2014 гг. выросли с 386 до 180 396 МВт [1], или в 467 раз, и одновременно выросло годовое производство электроэнергии с 695 до 185 882 ГВт-ч, или в 268 раз. В ветроэнергетике за тот же период производственные мощности выросли с 6070 до 372 961 МВт – в 61 раз, и годовое производство электроэнергии с 9184 до 706 175 ГВт-ч – в 77 раз. В то же время темпы роста как производственных мощностей, так и

выработки электроэнергии снизились и в солнечной, и в ветроэнергетике (рис. 1). В солнечной энергетике заметное снижение темпов роста - и мощностей, и выработки фиксируется после 2011 г. (за 2011 г. прирост мощностей в солнечной энергетике составил 72,5%, к 2014 г. он снизился до 28,7%). В ветроэнергетике общий тренд к снижению темпов роста мощностей и выработки фиксируется с 2000-2001 гг. с некоторым усилением его после 2009 г. (прирост мощностей в ветроэнергетике в 2009 г. составил 31,5%, к 2014 г. снизился до 16,2%).

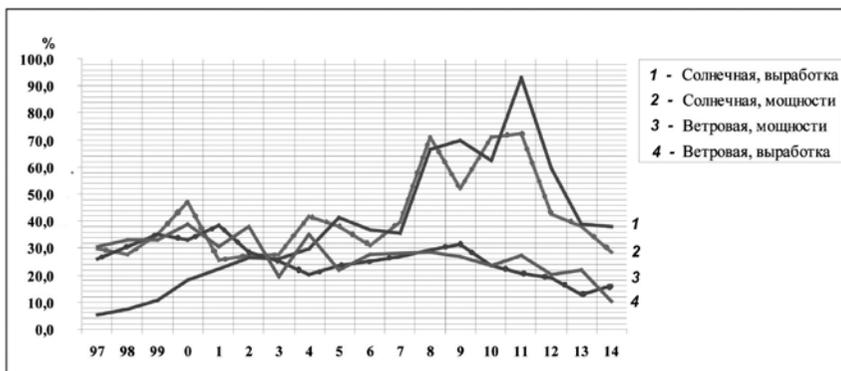


Рис. 1. Динамика годовых темпов роста установленных мощностей и выработки электроэнергии на солнечных и ветряных электростанциях мира в 1997-2014 гг. *Источник:* BP Statistical Review of World Energy, 2015.

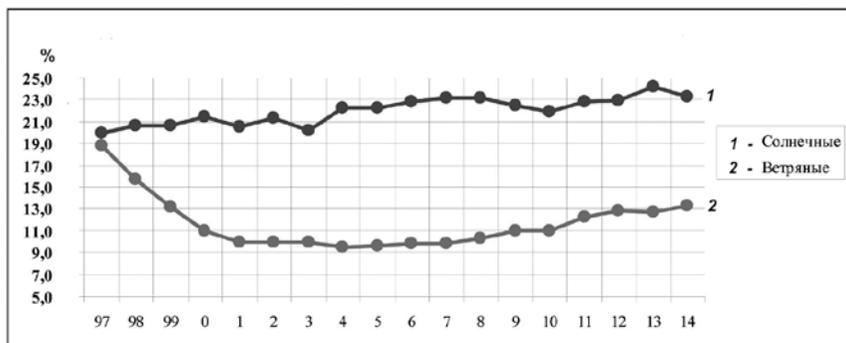


Рис. 2. Динамика среднего КИУМ солнечных и ветряных электростанций мира в 1997-2014 гг. *Источник:* BP Statistical Review of World Energy, 2015.

На основе имеющихся данных о производственных мощностях и объемах производства по годам авторами был проведен расчет среднего мирового КИУМ. Для расчета КИУМ за данный год объем выработки сопоставлялся со средним значением существующих мощностей за предыдущий и данный год для учета распянутого в течение данного года ввода в эксплуатацию новых станций. Например,

для расчета среднего КИУМ солнечных электростанций мира за 1997 г. берется среднее арифметическое мощностей, действующих в 1996 г. – 386 МВт, и в 1997 г. – 502 МВт, равное 444 МВт. Далее объем выработки электроэнергии на солнечных электростанциях мира за 1997 г., равный 732 ГВт-ч, делится на 444 МВт. Таким образом, объем выработки 1 Вт установленных мощностей составит 1649 Вт. Максимальный объем годовой выработки 1 Вт мощности равен количеству часов в году – 8760 и соответствует КИУМ, равному 100%. Фактический КИУМ рассчитывается делением фактического производства электроэнергии на максимальное теоретически возможное и составляет в данном случае 18,8% (средний КИУМ солнечных электростанций в 1997 г.). Таким способом был рассчитан КИУМ солнечных и ветряных электростанций за 1997-2014 гг. (рис. 2).

Расчеты показывают, что по итогам данного периода КИУМ солнечных электростанций уменьшился с 19 до 13%, при этом минимальным КИУМ был в 2004 г. – 9,5%, далее обозначился постепенный рост, хотя максимальные значения конца 1990-х гг. не были достигнуты. Для ветроэнергетики за тот же период обнаруживается тенденция к слабому росту КИУМ – с 20% в конце 1990-х гг. до 23-25% в последние несколько лет.

Расчетные значения US EIA по КИУМ (табл. 4) для строящихся солнечных и ветроэлектростанций, составляющие соответственно 20-25% и 36-38%, представляются несколько завышенными.

Таким образом, нет оснований рассчитывать, что гипотетическое сворачивание атомной энергетики в мире может быть компенсировано развитием энергетики на возобновляемых источниках. С большой вероятностью в этом случае потребности в энергии начнут удовлетворяться главным образом за счет роста использования ископаемых углеводородных энергоносителей. Противопоставление атомной и возобновляемой энергетики представляется контрпродуктивным. Более конструктивный подход заключается в параллельном развитии атомной и возобновляемой энергетики и взаимном дополнении ими друг друга.

При переходе с одного технологического уклада на другой, в 1970-е гг. преобладало оптимистичное мнение о скором замещении нефти ядерной энергией, демонстрирующей тогда экспоненциальный рост. Ядерная энергетика претендовала на роль базового энергоносителя в новом технологическом укладе. Но известные трагические события, связанные с авариями на атомных электростанциях, выявили реальные риски и несовершенство ядерных энергетических технологий. Атомная энергетика не стала базовой энергетической технологией. У атомной энергетики, безусловно, существует свой комплекс проблем, среди которых ключевыми являются неэкономное расходование ядерного топлива в водо-водяных атомных реакторах [6] и проблема хранения отработанного ядерного топлива.

Сейчас в странах-лидерах ядерной энергетики работают над реализацией концепции безопасной эксплуатации атомных электростанций нового поколения. Поэтому основным фактором формирования современного мирового энергетического пространства все же остается природный газ. Благодаря высокой экономической эффективности и относительной экологичности природный газ продолжает замещать нефть и уголь в энергетическом балансе мира. С увеличением доли газа и возобновляемых источников энергии, сохранением доли атомной энергетики и снижением доли угля и нефти в энергобалансе базовый энергоноситель выделяться не будет, как это было при смене технологических укладов в индустриальной эконо-

мике. Структура мировой энергетики в ближайшее десятилетие сильно диверсифицируется, что будет способствовать развитию конкуренции между разными видами энергии, между странами и регионами. Кроме того, как динамично растущая отрасль, и возобновляемая энергетика, и атомной промышленности за счет совершенствования технологий, имеют существенный потенциал инновационного развития [7].

Таблица 4

Расчетные выровненные затраты на производство единицы энергии (2013 г., долл./МВт-ч) для электростанций различных типов, вводимых в эксплуатацию в США в 2020 г.

Тип электростанции	КИУ М, %	Выровненные инвестиционные затраты	Постоянные операционные затраты	Переменные операционные затраты (включая топливо)	Транзакционные затраты	Суммарные выровненные затраты
Тепловые (угольные и газовые различных)	30-85	14,4-97,3	1,7-9,8	30,7-94,6	1,2-3,5	72,6-144,4
Атомные	90	70,1	11,8	12,2	1,1	95,2
Геотермальные	92	34,1	12,3	0,0	1,4	47,8
Биомасса	83	47,1	14,5	37,6	1,2	100,5
Ветровые (на суше и офшорные)	36-38	57,7-168,6	12,8-22,5	0,0	3,1-5,8	73,6-196,9
Солнечные (фотовольтаические и тепловые)	20-25	109,8-191,6	11,4-42,1	0,0	4,1-6,0	125,3-239,7
ГЭС	54	70,7	3,9	7,0	2,0	83,5

Выводы

Анализ динамики развития энергетики на основе атомной энергии и возобновляемых источников, начиная с 1960-х гг., показывает ключевую роль атомной энергетики в формировании неуглеродного уклада в энергетике и снижении отрицательного экологического воздействия на окружающую среду.

Снижение доли ископаемого углеводородного топлива в выработке электроэнергии в мире, начиная с 1960-х гг., а также некоторое замедление темпов эмиссии CO₂ в атмосферу достаточно четко коррелирует с абсолютным и относительным ростом атомной энергетики, притом что совокупная доля других неуглеродных энергоносителей в период с середины 1960-х до начала 2000-х гг. снижалась, прежде всего за счет падения доли гидроэнергетики.

С середины 1990-х гг. наблюдалось снижение доли атомной энергии в мировом энергобалансе, а с 2000-х гг. – абсолютное снижение выработки электроэнергии на АЭС. Это не компенсировалось ростом производства электроэнергии на основе ВИЭ, а напротив, привело к увеличению доли ископаемых углеводородов в мировом производстве электроэнергии, а также коррелирует с новым ускорением эмиссии CO₂ в атмосферу. При этом с 2010-х гг. фиксируется устойчивое замедление роста энергетики на основе ВИЭ. Также обнаруживается отставание темпов прироста выработки электроэнергии на ветровых и солнечных электростанциях от скорости прироста производственных мощностей в ветровой и солнечной энергетике. Это указывает на определенные барьеры в развитии энергетики на основе ВИЭ, которые могут проявиться сильнее в ближайшее время.

Сравнительная оценка экономических и эколого-экономических параметров электростанций на атомной энергии и ВИЭ указывает на сохраняющуюся высокую конкурентоспособность АЭС как в экономическом смысле, так и с точки зрения минимизации ущерба для окружающей среды.

Выявленные тенденции и анализ эколого-экономических показателей говорит об атомной энергетике как необходимой составляющей, наряду с возобновляемой энергетикой, процесса перехода к неуглеродному укладу и снижению рисков для окружающей среды. Анализ данных последних 50-55 лет и текущих тенденций указывает на целесообразность развития как возобновляемой, так атомной энергетики на основе не конфронтации, а взаимного дополнения.

Литература

1. BP Statistical Review of World Energy, 2015. URL: <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
2. Schlomer S., Bruckner T., Fulton L., Hertwich E., McKinnon A., Perczyk D., Roy J., Schaeffer R., Sims R., Smith P., and Wiser R., 2014: Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, p. 1335. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. URL: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf
3. External Costs. Research results on socio- environmental damages due to electricity and transport. European Commission. 2016. URL: http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/externe_en.pdf

4. US Energy Information Administration, 2013. URL: <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=2&pid=2&aid=12&cid=regions,&syid=1980&eyid=2012&unit=BKWH>
5. Andersen O. Unintended Consequences of Renewable Energy. Problems to be solved – London, Springer-Verlag, 2013. URL: <http://www.twirpx.com/file/1272452/>
6. Энергетика и геополитика / под ред. В.В. Костюка, А.А. Макарова. – М.: Наука, 2011. – 396 с.
7. Берёзкин М.Ю., Синюгин О.А., Соловьев А.А. География инноваций в сфере традиционной и возобновляемой энергетики мира // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2013. — № 1. — С. 28–32.
8. IEA Key World Energy Statistics, 2020. URL: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2020.pdf>

ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ЭКОНОМИК СТРАН И РЕГИОНОВ МИРА

ДЕГТЯРЕВ К.С., БЕРЁЗКИН М.Ю., КИСЕЛЕВА С.В., НЕФЕДОВА Л.В.

Аннотация. В статье рассматриваются планы развития водородной экономики в мире и ряде регионов. Выявляются технологические, экологические и экономические барьеры на пути реализации амбициозных сценариев роста производства и потребления водорода и проводится оценка реалистичности данных сценариев. Оспариваются распространённое утверждение о водороде как агенте декарбонизации и состоятельность экологической аргументации водородной экономики. Рассматривается ряд возможных реальных причин продвижения идей и планов водородной экономики.

Ключевые слова: водород, водородная экономика, энергетика, проблемы водородной экономики.

Введение

Новый интерес к водороду и преимущества водорода в качестве энергетического ресурса

Водород производится и используется уже давно, но в последние годы обозначилось резкое повышение интереса к нему как к потенциальному энергетическому ресурсу, получил распространение термин «водородная экономика» (hydrogen-economy), и в ряде стран были продекларированы планы многократного увеличения производства водорода.

В последние годы появилось множество публикаций на водородную тематику разного формата, включая книги, статьи, материалы многочисленных форумов и конференций. Можно сказать, что интерес к водороду как потенциальному источнику энергии принял взрывной характер.

В первую очередь, водород позиционируется как экологически чистый вид топлива, не оставляющий «углеродного следа при сжигании», и рост его производст-

ва и использования рассматривается в контексте «декарбонизации» (decarbonization) и снижения потребления ресурсов [1].

Кроме того, в пересчёте на массу водород обладает высокой теплотворной способностью. Для сравнения – если у природного газа (метана CH_4) она примерно 40-50 МДж (12-15 кВт·ч) на 1 кг, то у водорода – 120-140 МДж (35-40кВт·ч), или в 3 раза выше.

Наконец, водород может использоваться в разными способами - как для выработки тепловой и электрической энергии – в том числе, как аккумулятор энергии, так и в качестве транспортного топлива.

В связи с этим, ряд стран сейчас принимает или разрабатывает программы развития водородной экономики.

Кроме того, рассматриваются перспективы создания мирового рынка водорода с превращением водорода в биржевой товар [2] с большими объёмами торгов.

Текущая ситуация с производством водорода и программы его увеличения

В настоящее время общий объём производства водорода в мире – 55-65 млн. тонн [3], при этом среднегодовые темпы роста на протяжении первых двух десятилетий XXI века не превышали 2%.

Его основные потребители – химическая и нефтеперерабатывающая промышленность, а основной способ получения – почти 70% всего водорода – конверсия метана, при этом, на электролиз приходится всего 5%.

Энергетическое использование водорода – в частности, в качестве транспортного топлива, до последнего времени носило, скорее, экспериментальный характер, представленный отдельными проектами – в частности, проект «водородного шоссе» HуNor в Норвегии [4] и сходные проекты в других странах Европы, США, Японии.

В настоящее время ряд стран принял масштабные водородные программы, предполагающие кратное увеличение производства водорода с перспективами его использования уже в энергетических целях – для получения тепла и электроэнергии, а также в качестве транспортного топлива.

В частности, ЕС принял Дорожную карту развития водородной экономики [5]. Согласно европейской дорожной карте, по состоянию на 2015 год суммарный конечный спрос на энергию в ЕС составлял величину порядка 14 000 ТВт·ч, из которых на водород приходится 2%, или 325 ТВт·ч (что эквивалентно около 8 млн. тонн водорода). Далее рассматривается два сценария – инерционный – *business as usual*, и амбициозный – *ambitious* (табл. 1). Во всех случаях предполагается рост использования водорода во всех секторах хозяйства. При этом, предполагается общее сокращение спроса на энергию – на 35% к 2050 г. При инерционном сценарии годовой объём поставок водорода на рынок ЕС должен составить к 2030 г. 12 млн. тонн, к 2050 г. – более 18 млн. тонн; при амбициозном сценарии – соответственно, более 16 млн. и около 55 млн. тонн.

В Японии аналогичная Дорожная карта – *Strategic Roadmap for Hydrogen and Fuel Cells* [6] предполагает рост объёмов использования водорода к 2050 г. до 10 млн. тонн в год.

Всего в мире заявлено 228 водородных проектов [7] на всех континентах, при этом основная их часть – в Западной Европе и Восточной Азии.

В России, в свою очередь, программа развития водородной энергетики находится в стадии разработки [8]. Также о стимулировании производства водорода в России, развитии низкоуглеродных технологий для его производства и задачах увеличения экспорта (до 0,2 млн. тонн к 2024 г. и до 2 млн. тонн к 2035 г.) заявлено в Энергетической стратегии Российской Федерации до 2035 года [9]. Пока же из конкретных крупных водородных проектов в России пока можно назвать только проект Сахалинского водородного кластера [10].

Таблица 1.

Планы роста использования водорода согласно водородной Дорожной карте ЕС

Показатель	2015	2030		2050	
			Business as usual	Ambitious	Business as usual
Общий спрос на энергию, ТВт-ч	14 100	11 500		9 300	
Сценарий	-	Business as usual	Ambitious	Business as usual	Ambitious
Доля водорода, %	2%	4%	6%	8%	24%
Количество водорода, ТВт-ч	325	481	665	780	2 251
Эквивалент в тоннах	8 млн.	12 млн.	16 млн.	19 млн.	55 млн.
<i>в том числе по секторам:</i>					
Существующие промышленные производства	325	427	427	391	391
Новые промышленные производства	-	11	62	1	257
Промышленная энергетика	-	11	8	53	237
Тепло и электроэнергия для зданий	-	11	33	207	579
Транспорт	-	11	70	85	675
Генерация электроэнергии, аккумуляция (буферизация)	-	11	65	43	112

Таким образом, в ближайшие десятилетия речь идёт о наращивании рынка водорода на десятки миллионов тонн в год. При этом, прогнозы рынка резко различаются.

По сравнительно консервативным оценкам IRENA, Shell, ARENA, годовой объём мирового рынка водорода составит 500-2000 ТВт-ч к 2050 г. [3].

Отметим, что это означает увеличение доли водорода в мировом энергобалансе [11] всего до 0,25%-1,0%. Это означает также рост мирового производства водорода на 12-50 млн. тонн в год, или на 20%-80% относительно нынешнего уровня, что ниже даже отдельно взятого амбициозного европейского сценария. В то же время, более смелые прогнозы по мировому рынку в 5-10 раз выше – до 15 000 ТВт-ч (400 млн. тонн), или 7%-8% в мировом энергобалансе, и выше.

Более того, по некоторым оценкам, до 24% мирового потребления энергии к 2050 году будет удовлетворяться за счёт водорода [12] (что равносильно производству около 40 000 ТВт-ч, или 1 млрд. тонн водорода). Однако, в настоящее время отсутствует ответ на вопрос о наличии ресурсов для столь мощного наращивания, тем более, если речь идёт о производстве исключительно «зелёного» водорода за счёт ВИЭ. К этому мы ещё вернёмся.

Большой разброс в оценках неизбежен, исходя из того, что в планах развития водородной экономики пока недостаточно конкретики, представленные цифры носят, в большей степени, декларативный характер.

Проблемы использования и наращивания производства водорода

Планы резкого увеличения производства водорода, прежде всего – в Западной Европе и Японии, и их мотивация (декарбонизация экономики) вызывают вопросы.

Основная проблема в том, что водород не является первичным энергоносителем [13], а его производство само по себе является энергозатратным и требует наличия развитой энергетической инфраструктуры и вовлечения больших энергетических ресурсов.

Способ производства водорода, считающийся экологически чистым – электролиз воды, требует примерно 40-50 МВт-ч электроэнергии на 1 тонну водорода, тогда, как теплотворная способность 1 тонны водорода ниже 40 МВт-ч (около 36 МВт) даже при 100%-ном КПД. Таким образом, затраты энергии на производство водорода при электролизе выше энергетической ценности получаемого водорода.

При этом, вряд ли водород, даже полученный электролизом, может считаться «зелёным», если электроэнергия для его производства вырабатывается на ископаемом топливе. Экологический смысл его производство имеет только на основе ВИЭ.

Амбициозные планы ЕС предполагают рост годового потребления водорода к 2050 году до 50 млн. тонн. Для производства такого количества водорода посредством электролиза воды потребуются не менее 2000 ТВт-ч электроэнергии. В 2019 году производство электроэнергии в странах ЕС составило менее 4000 ТВт-ч [14], из которых на ВИЭ, включая гидроэнергию, пришлось около 1500 ТВт-ч, или 38%. Таким образом, для производства заявленного объёма водорода потребовалось бы задействовать более 50% всей производимой в настоящее время электроэнергии, а всей выработки электроэнергии за счёт ВИЭ было бы недостаточно.

То же верно и в отношении Японии. Производство способом электролиза 10 млн. тонн водорода требует более 400 ТВтч электроэнергии. В 2019 году в Японии было всего произведено 1040 ТВтч, в том числе за счёт ВИЭ (включая ГЭС) – около 200 ТВтч, или около 20%. Заявленное производство водорода, в таком случае, требует 40% всей производимой в стране электроэнергии и в 2 раза превышает всё производство электроэнергии за счёт ВИЭ.

Таким образом, заявленные амбициозные планы, во-первых, не имеют ресурсной базы; во-вторых, означали бы не декарбонизацию, а обратный процесс – рост выбросов углерода из-за роста производства электроэнергии, необходимой для получения водорода, из невозобновляемых источников.

Если же рассматривать в качестве варианта импорт водорода этими странами, то в этом случае карбонизация просто «сбрасывается» в страны – экспортёры, а ЕС и Япония сохраняют или даже усиливают свою зависимость от импорта энергоносителей.

Другая группа проблем и нерешённых вопросов имеет технологический характер. Она была детально рассмотрена, в частности, в [15, 16].

Технологические проблемы связаны, в значительной степени, с физическими свойствами водорода - при большой теплоотдаче на массу, он обладает низкой плотностью: 0,09 кг/м³, что в 8 раз ниже, чем у природного газа (0,75 кг/м³); таким образом, теплоотдача на объём у водорода в 2,5-3 раза ниже, чем у природного газа. При этом, водород также в высокой степени взрывоопасный газ. Всё это создаёт большие сложности с хранением и транспортировкой водорода.

Существующая газовая инфраструктура не подходит для транспортировки и хранения водорода [15]. Создание же собственно водородной инфраструктуры сопряжено с большими затратами. В частности, только строительство водородной газотранспортной сети в Европе (протяжённостью более 20 тыс. км) оценивается в величину 27-64 млрд. евро [17], а 3-4-кратный рост инфраструктуры хранения водорода в мире потребует до 2050 г. объёма инвестиций более, чем в \$600 млрд [18].

Общие затраты на производство водорода методом электролиза – 2-6 €/кг [19], или 5-15 евроцентов/кВтч в пересчёте на энергетический эквивалент при КПД, равном 100%. По данным IEA, стоимость производства «зелёного» водорода из возобновляемых источников энергии в 2018 г. составляла \$3,0-7,5/кг [20]. Таким образом, затраты на производство 1 млн. тонн водорода при текущих ценах составят более €2 млрд., на 50 млн. тонн – более €200 млрд. в год. При этом не учитывается стоимость хранения и транспортировки водорода.

Кроме того, водородный транспорт в перспективе рассматривается как конкурент электротранспорту. Однако, как показали недавние исследования, проведённые Scania [21], водородные двигатели проигрывают электрическим как с точки зрения стоимости, так и по другим показателям.

Наконец, не вполне решённым остаётся вопрос и об экологических последствиях масштабного использования водорода, в том числе – при неизбежных утечках некоторого количества. В частности, высказываются опасения, не исключённые на данный момент, по поводу возможного негативного воздействия водорода на стратосферу [22].

Исходя из этого, представления о масштабном увеличении производства водорода для целей декарбонизации экономики выглядят необоснованными.

Возможные реальные причины роста интереса к водороду

Возможно, что рост интереса к водороду связан не с экологическими, а какими-либо другими, хотя и реже называемыми, причинами.

Прежде всего, водород может рассматриваться как аккумулятор энергии. Рост доли ВИЭ в энергопотреблении увеличивает нестабильность энергосистемы и повышенную потребность в аккумуляции. Водород может рассматриваться в качестве способа решения данной проблемы. Иными словами, развитие водородной экономики должно идти в одной связке с возобновляемой и, возможно, атомной энергетикой.

ВИЭ – база для нового технологического прорыва.

В 2014 г. отказаться от российской нефти было невозможно.

В 2021 г. избыточное предложение нефти – 8%. Доля российской нефти – 11 % от потребности.

В США, Японии и Западной Европе идёт снижение энергопотребления. Так, по данным [14], в странах ЕС (включая Великобританию), пик потребления энергии пришёлся на 2006 г. – 21,9 тыс. ТВт-ч, после чего оно постепенно снижается – до 20,5 тыс. ТВт-ч в 2019 г.; потребление электроэнергии – соответственно, с 3,7 тыс. ТВт-ч в 2008 г. до 3,5 тыс. ТВт-ч в 2019 г. В Японии общее потребление энергии снизилось с 6,2 тыс. ТВтч в 2005 году до 5,2 тыс. ТВтч в 2019 г.; электроэнергии – с 1,2 тыс. ТВт-ч в 2008 г. до 1,04 тыс. ТВт-ч в 2019 г. В США годовое потребление энергии с 2000 г. варьируется в диапазоне 25-27 тыс. ТВт-ч с пиком в 2007 году – 26,9 тыс. ТВт-ч; электроэнергии – с 2007 г. колеблется вокруг уровня около 4,4 тыс. ТВт-ч. Вероятно дальнейшее уменьшение производства и потребления энергии в западных странах.

Это можно связать как с успехами в энергосбережении, так и с изменениями экономической структуры – смещением энергоёмких производств в другие регионы, и общими экономическими проблемами. Следствием этого может стать образование избытка генерирующих мощностей, требующих загрузки. Кроме того, создание новой зоны роста - производства водорода, может рассматриваться как стимул экономического развития и средство преодоления экономической стагнации, возможно, в связке с какими-либо другими направлениями технологического развития.

Наконец, водород в перспективе рассматривается как биржевой товар, что означает использование его в качестве нового глобального финансового инструмента.

В то же время, данный ряд причин вряд ли может в полной мере объяснить амбициозные планы и максимальные прогнозы увеличения производства водорода. Также в переходе к «водородной экономике» не просматривается явного положительного экономического и экологического эффекта для общества в целом, что рождает дополнительные вопросы.

Исходя из этого, наиболее реалистичными представляются умеренные, консервативные прогнозы роста производства водорода в мире, представленные выше.

Выводы

Водород в качестве потенциального энергоносителя обладает определёнными физическими и экологическими преимуществами, а продвижение идей и планов развития «водородной экономики» чаще всего объясняют экологическими сооб-

ражениями – необходимостью декарбонизации экономики. В настоящее время в ряде регионов, прежде всего, в Западной Европе и Японии, продекларированы масштабные планы увеличения производства водорода, при реализации амбициозных сценариев – на порядок, а доля водорода в энергобалансе должна к середине текущего столетия вырасти до 20% и более.

В то же время, водород не является первичным энергоносителем, а, напротив, требует высоких затрат энергии при производстве, превосходящих энергетическую ценность получаемого водорода, что само по себе означает не декарбонизацию, а обратный процесс – рост выбросов в окружающую среду. Более того, для производства водорода в заявленных объемах в Западной Европе и Японии недостаточно энергетических мощностей.

Помимо этого, высоких затрат потребует создание инфраструктуры хранения, транспортировки и использования водорода, а функционирование этой системы может быть сопряжено с пока не просчитанными негативными экологическими эффектами.

Исходя из этого, можно предположить, что реальные причины продвижения водорода отличаются от чаще всего декларируемых и связаны, прежде всего, с необходимостью аккумулирования энергии, в более широком плане – оживления экономики западных стран и, возможно, другими мотивами, пока не до конца понятными и требующими дальнейших исследований. На данный момент наиболее адекватными представляются консервативные прогнозы увеличения производства водорода в мире к середине XXI века – в пределах 20%-80% относительно нынешнего уровня.

Литература

1. Hydrogen Decarbonization Pathways // Hydrogen Council. URL: <https://clck.ru/TyGQE>, дата обращения 26.03.2021.
2. Invest in the Green Economy: Hydrogen Stocks to Watch. URL: <https://capital.com/hydrogen-stocks>, дата обращения – 26.03.2021.
3. Митрова Т., Мельников Ю., Чугунов Д. Водородная экономика – путь к низкоуглеродному развитию // Центр энергетики Московской школы управления Сколково, 2019.
4. Andersen, Otto. Unintended Consequences of Renewable Energy. Problems to be Solved // Springer Science & Business Media, 2013.
5. Hydrogen Roadmap Europe. Report. 2019. URL: <https://clck.ru/TyGSC>, дата обращения – 26.03.2021.
6. Hydrogen Law and Regulation in Japan URL: <https://clck.ru/TyGU6>, дата обращения – 26.03.2021.
7. Hydrogen Insights. McKinsey & Company. February 2021.
8. План мероприятий «Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года» // Распоряжение Правительства Российской Федерации от 12 октября 2020 года №2634-р.
9. Энергетическая стратегия Российской Федерации до 2035 года // Распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 года № 1523-р.
10. Водородный кластер планируют создать на Сахалине URL: <https://clck.ru/TyGWG>, дата обращения – 26.03.2021.

11. Дегтярев К.С. Динамика мирового энергопотребления в XX–XXI вв. и прогноз до 2100 года // *Окружающая среда и энергосбережение*, №2/2020, стр. 35-48.
12. Водородная энергетика России и Европы: перспективы рынка на \$700 млрд. URL: <https://clck.ru/TyGZw>, дата обращения – 26.03.2021.
13. Борзенко В.И. Водородная энергетика – состояние и перспективы // *Окружающая среда и энергосбережение*, №3/2020, с.13-23.
14. BP Statistical Review of World Energy. 2020. URL: <https://clck.ru/TyGb5>, дата обращения 26.03.2021.
15. Литвиненко В.С., Цветков П.С., Двойников М.В., Буслаев Г.В. (2020) Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики. Записки Горного Института. Том 244. С. 428-438.
16. Литвиненко Владимир: Водород не может быть ресурсом глобальной энергетике из-за физических законов окружающего нас мира. URL: <https://clck.ru/TyGcU>, дата обращения 26.03.2021.
17. Газотранспортные компании ЕС представили план водородных сетей протяжённостью 23 тыс. километров // *Региональная энергетика и энергосбережение*, 20.07.2020. URL: <https://clck.ru/TyGdX> дата обращения 26.03.2021.
18. Bloomberg NEF. Hydrogen Economy Offers Promising Path to Decarbonization URL: <https://clck.ru/TyGez> дата обращения 26.03.2021.
19. Ball, M., Weeda, M. The hydrogen economy: Vision or reality URL: <https://clck.ru/TyGgA> дата обращения 26.03.2021.
20. The Future of Hydrogen. IEA. Technology report, June-2019 URL: <https://clck.ru/TyGhd>, дата обращения 26.03.2021.
21. Scania Ditches Fuel Cell Trucks To Focus On Full Electric . 30/01/2021 URL: <https://clck.ru/TyGiz/>, дата обращения 26.03.2021.
22. Tracey K. Tromp, *et al.* Potential Environmental Impact of a Hydrogen Economy on the Stratosphere *Science* 300, 1740 (2003); DOI: 10.1126/science.1085169.

ОТХОДЫ РАСТЕНИЕВОДСТВА КАК РЕСУРСНАЯ БАЗА РАЗВИТИЯ БИОЭНЕРГЕТИКИ В РЕГИОНАХ ЮГА РОССИИ

АНДРЕЕНКО Т.И., КИСЕЛЕВА С.В., РАФИКОВА Ю.Ю.

Аннотация. В работе представлены результаты расчетов энергопотенциала отходов растениеводства для муниципальных образований Краснодарского края. Анализ проводился для основных сельскохозяйственных культур: зерновые, подсолнечник, кукуруза. Результаты показывают значительную величину потенциала края по сравнению с другими сельскохозяйственными регионами Юга России. Пространственное распределение позволяет определить локализацию наиболее перспективных районов для использования отходов растениеводства в целях производства энергии.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, биоэнергетика, растительная биомасса, агробиомасса, отходы растениеводства.

Введение

По данным Всемирной биоэнергетической ассоциации (The World Bioenergy Association - WBA) биоэнергетика – крупнейший поставщик возобновляемой энергии в мире [1]. Общепланетарное использование биоэнергии достигло почти 60 ЭДж, что составляет 10% от общего объема производства энергии в мире. Однако планы ведущих мировых биоэнергетических ассоциаций ещё масштабнее: так, ориентиром для развития биоэнергетики в Европе до 2030 г. является Грацкая Декларация (2017 г.), одной из основных целей которой является сокращение вдвое использования ископаемых топлив до 2030 г. и замещение его энергией из биомассы [2].

На практике реализацию этих целей в ЕС осуществляют ряд программ исследований и инноваций, самой крупной из которых является программа «Горизонт 2020», на реализацию которой в 2014–2020 гг. выделено около 80 млрд. евро [3]. В 2016 г. закончился проект этой программы Euro Pruning, в 2019 г. завершился проект uP_running, а в январе 2019 г. стартовал действующий и в настоящее время проект Agro Bio Heat [4]. Цель проектов – обеспечение широкого использования растительных отходов сельского хозяйства для производства энергии в Европейском Союзе. В рамках проектов проведены оценки объемов растительных остатков, включая отходы агропромышленного комплекса, обрезки многолетних растений (садов, оливковых рощ и виноградников), отходы переработки сельскохозяйственного производства (оливковые косточки, ореховая скорлупа и др.), которые в больших объемах накапливаются в сельских районах. Разрабатываются эффективные логистические схемы коротких и надёжных поставок биомассы и использования её как топлива. Логистические решения включают в себя сбор урожая, транспортировку и хранение сельскохозяйственных отходов. Ожидается, что энергетическое использование агробиомассы окажет положительное социальное воздействие на регионы, а именно, обеспечит создание дополнительных рабочих мест и предотвращение оттока молодёжи из сельской местности. Наконец, проекты при-

званы способствовать распространению доступных современных технических решений отопительных систем, которые с высокой эффективностью используют агробиомассу вместо традиционного топлива, снижая тем самым уровень вредных выбросов и улучшая экологическую обстановку регионов.

В настоящее время технологии сжигания соломы и других растительных остатков с целью выработки тепла и электроэнергии достигли коммерческого уровня и достаточно широко используются в европейских странах [5]. На российском рынке также присутствует широкий диапазон отечественных энергетических комплексов, использующих биотопливо: древесные отходы, древесные гранулы, лозу хмеля и винограда, солому, шелуху семечек подсолнечника и т.п. [6, 7]. Продолжаются исследования термохимических процессов преобразования биомассы в энергию. В частности, интерес представляет создание газогенераторных бытовых плит на биомассе, которые, благодаря высокой энергоэффективности и экологичности, существенно превосходят по качествам традиционные печи прямого сжигания биомассы [8].

Технико-экономический анализ технологий сжигания отходов растениеводства в странах с уже существующим опытом использования показал, что при формировании себестоимости энергии из биомассы решающую роль играют теплотворная способность исходного сырья, эффективность энергоустановок, капитальные затраты и эксплуатационные расходы [9]. Опыт реализованных биоэнергетических проектов свидетельствует о том, что при отсутствии необходимости транспортировать топливо (при переработке его в энергию на месте возникновения отходов) стоимость энергии существенно снижается.

Наиболее перспективными для внедрения технологий возобновляемой энергетики в России представляются южные регионы. Необходимость и целесообразность использования в них альтернативных источников энергии анализировалась в ряде работ [10-13]. Однако большая часть исследований посвящена оценке потенциала энергии солнца и ветра на Юге России. В то же время эти регионы характеризуются высоким уровнем агропромышленного производства, который сопровождается образованием значительных объёмов органических отходов. Большая плотность населения и значительный рекреационный потенциал этих территорий определяют актуальность задачи эффективной утилизации отходов как для решения экологических, так и энергетических проблем. Для принятия решений относительно переработки органических отходов требуется методика комплексного анализа территории, выявление особенностей энергопотребления и факторов, ограничивающих создание объектов биоэнергетики. Но прежде всего для определения перспектив развития биоэнергетики необходима оценка её сырьевой базы – объёмов и энергосодержания агробиомассы, которой располагает регион для производства энергии и тепла.

В связи с этим в представленной работе проведена оценка энергетического потенциала основных видов отходов растениеводства Краснодарского края. Проведено сравнение результатов с ранее выполненными аналогичными оценками для Республик Крым и Дагестан, для Волгоградской области.

Материалы и методы.

Использованные в данном исследовании методы проведения оценок были ранее изложены в [14] и развиты в работах авторов [15, 16]. Расчёты проведены по отходам отдельных видов сельскохозяйственных культур. Это связано с тем, что различные виды отходов отличаются нормами образования и удельным энергосодержанием. Для определения энергии, заключённой в биомассе отходов, используются значения массы отходов и их удельное энергосодержание (или низшая теплота сгорания) соответствующих видов биомассы. Масса ежегодно образующихся органических отходов растениеводства вида i (M_i) рассчитывалась с использованием статистических данных о годовом урожае N_i и коэффициентов соотношения отходов и полезной части растения – L_i (Табл. 1):

$$M_i = N_i * L_i, \quad (1)$$

На основе определённой таким образом массы отходов энергетический потенциал рассчитывался как произведение массы отходов на их удельное энергосодержание (K_i):

$$Q_i = M_i * K_i \quad (2)$$

Таблица 1.

Коэффициенты для расчёта массы отходов растениеводства и их энергосодержания.

Вид исходной биомассы	Коэффициент соотношения отходов и полезной части растения, кг/кг	Удельное энергосодержание отходов, Ккал/кг
Отходы растениеводства, в том числе		
Зерновые культуры	1,0	3500 (для сухой соломы)
Кукуруза на зерно (стебли)	1,2	3270 (для воздушно-сухих отходов)
Рапс озимый и яровой	1,8	3660
Соя	1,3	3800
Подсолнечник на зерно:	3,5	3200
- стебли	0,18	3750
- лузга		
Картофель	0,33	2000 (для сухой ботвы)
Овощи	0,33	2000

Для расчетов были использованы официальные данные Федеральной службы государственной статистики (Росстата), а именно, ежегодные данные по валовому сбору урожая сельскохозяйственных культур. Полученные оценки биоэнергетического потенциала представлены в таблице 2.

Результаты и обсуждение

Ранее нами были проведены оценки биоэнергетического потенциала широкого круга отходов сельскохозяйственного производства южных регионов РФ – Волгоградская область, Республики Крым и Дагестан [17-19]. Сопоставление суммарного валового потенциала показывает, что по отходам зерновых (солома), подсолнечника (лузга, стебли, корзинки) и кукурузы Краснодарский край значительно опережает другие регионы Юга России. (Табл. 2).

Основным видом отходов растениеводства рассмотренных регионов является солома зерновых культур. Объясняется это специализацией сельского хозяйства Юга России. Для большей части этой территории страны основной проблемой для сельскохозяйственного производства является дефицит влагообеспечения, и поэтому зерновое хозяйство всегда было и остаётся важнейшей отраслью агропромышленного комплекса. В структуре посевных площадей зерновых культур этих регионов доминируют озимые культуры пшеница и ячмень, которые развиваются за счёт зимне-весенних запасов влаги и успевают сформировать урожай до наступления жаркой и сухой погоды. В то же время расчёты показывают, что внутри регионов наблюдается значительная территориальная неоднородность распределения этих ресурсов. Особенности внутрирегионального распределения ресурсов биоэнергетики в Волгоградской области, в Республиках Дагестан и Крым проанализированы нами ранее [17-19]. Значения валового энергетического потенциала отходов зерновых (энергосодержания соломы), подсолнечника и кукурузы в районах Краснодарского края приведены в таблице 3.

Таблица 2.

Интегральные показатели энергетического потенциала отходов производства зерновых, подсолнечника и кукурузы

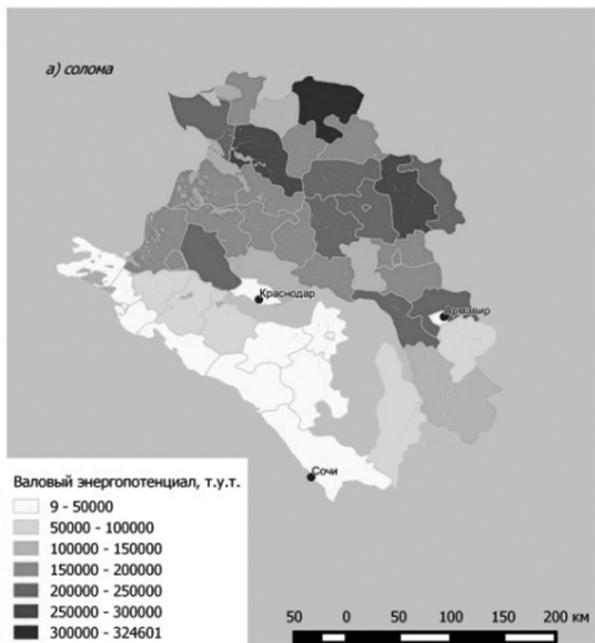
Тип культуры Субъект	Энергосодержание отходов зерновых, тысяч т у.т./год	Энергосодержание отходов подсол- нечника, тысяч т у. т./год	Энергосодержание отходов кукурузы, тысяч т у. т. /год
Краснодарский край (статистические данные за 2017г.)	5996	1899	1950
Республика Крым (2016 г.)	448	262	3
Волгоградская область (2020г.)	2187	1 887	126
Республика Да- гестан (2017 г.)	107	2*	2*

* - данные 2018 г.

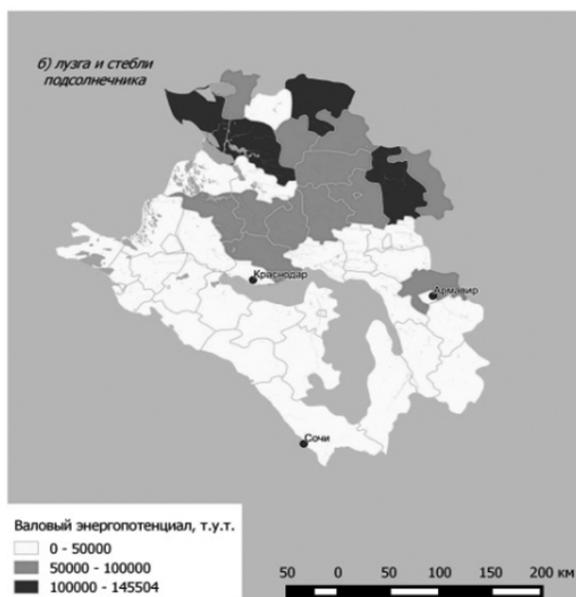
Таблица 3.

Суммарный валовой энергетический потенциал отходов производства зерновых культур, подсолнечника и кукурузы в муниципальных образованиях Краснодарского края (2017 г.)

№	Муниципальные районы	Энергосодержание отходов растениеводства, тысяч т у.т./год				Кукуруза
		Солома зерновых	Подсолнечник, стебли	Подсолнечник, лузга	Подсолнечник, всего	
1	Абинский	61,6	13,5	0,8	14,3	5,6
2	Апшеронский	0,5	0,0	0,0	0,0	0,7
3	Белоглинский	209,9	74,2	4,5	78,8	41,8
4	Белореченский	46,6	16,9	1,0	18,0	16,5
5	Брюховецкий	167,3	42,9	2,6	45,6	46,8
6	Выселковский	224,4	56,1	3,4	59,6	66,1
7	Гулькевичский	170,7	29,5	1,8	31,3	97,4
8	Динской	127,1	47,3	2,9	50,3	47,5
9	Ейский	232,9	107,8	6,5	114,5	38,9
10	Кавказский	168,3	45,6	2,7	48,4	88,9
11	Калининский	174,1	48,8	2,9	51,8	42,7
12	Каневской	298,3	116,9	7,0	124,2	64,4
13	Кореновский	181,6	61,0	3,7	64,8	53,1
14	Красноармейский	213,5	31,8	1,9	33,8	21,3
15	Крыловский	184,5	78,3	4,7	83,2	50,5
16	Крымский	50,8	20,8	1,3	22,1	14,0
17	Курганинский	218,4	46,9	2,8	49,9	106,9
18	Кушёвский	324,6	126,6	7,6	134,5	92,6
19	Лабинский	134,6	9,9	0,6	10,6	87,4
20	Ленинградский	194,8	52,9	3,2	56,2	48,7
21	Мостовский	55,4	10,1	0,6	10,7	43,7
22	Новокубанский	238,3	70,8	4,3	75,2	104,3
23	Новопокровский	277,2	136,9	8,3	145,5	140,1
24	Отрадненский	149,7	27,8	1,7	29,5	98,3
25	Павловский	227,7	76,8	4,6	81,7	56,5
26	Приморско-Ахтарский	165,1	46,3	2,8	49,2	34,2
27	Северский	62,3	18,9	1,1	20,1	14,7
28	Славянский	177,7	15,2	0,9	16,1	6,1
29	Староминский	141,8	30,9	1,9	32,9	31,4
30	Тбилисский	138,5	44,2	2,7	47,0	69,5
31	Темрюкский	31,3	5,4	0,3	5,7	7,7
32	Тимашёвский	189,4	56,3	3,4	59,8	59,3
33	Тихорецкий	249,4	65,7	4,0	69,8	128,6
34	Туапсинский	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2
35	Успенский	74,2	14,5	0,9	15,4	27,9
36	Усть-Лабинский	162,8	45,4	2,7	48,3	44,6
37	Щербиновский	179,5	68,1	4,1	72,4	30,8
38	г. Краснодар	40,1	15,1	0,9	16,0	8,2
39	г. Новороссийск	1,3	0,6	0,0	0,7	0,0
40	г. Геленджик	0,1	0,2	0,0	0,2	0,0
41	г. Горячий Ключ	2,8	1,5	0,1	1,6	0,4
42	г. Сочи	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
43	г. Армавир	22,1	5,6	0,3	5,9	8,3
44	г. Анапа	24,6	6,8	0,4	7,2	3,3
	Всего	5995,7	1790,9	107,9	1898,8	1950,1



а)



б)

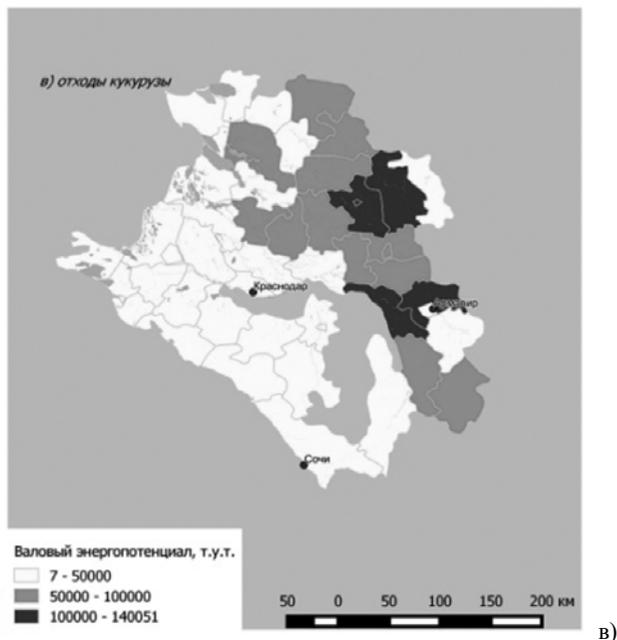


Рис.1. Территориальное распределение энергопотенциала растительных отходов в Краснодарском крае (а - отходы зерновых (солома), б – отходы подсолнечника (лузга и стебли), в – отходы кукурузы).

Около половины районов Краснодарского края имеют урожай зерновых более 4 млн. центнеров в год, что соответствует энергосодержанию отходов (соломы) свыше 170 тыс. т у.т./год для каждого из этих районов (Таблица 3). Из них 7 районов собирают более 5 млн. центнеров в год и 2 района – более 6 млн., что обеспечивает валовый энергопотенциал отходов более 213 тыс. т у.т./год и 298 тыс. т у.т./год соответственно. При расчете технического потенциала учитываются – помимо энергетических – другие направления использования отходов (в животноводстве, для повышения плодородия пашни и т.п.). Однако даже с учетом этого неэнергетического использования отходов, оставшиеся ресурсы достаточны для масштабного использования их в производстве тепловой и электрической энергии.

Территориальное распределение энергопотенциала растительных отходов в Краснодарском крае представлено на рис. 1. В соответствии с агроклиматическими условиями и типом почв наибольшим энергетическим потенциалом отходов зерновых обладают районы расположенные на севере и в центральной части края (рис. 1а). Что касается других, значимых по объему ежегодного образования, растительных отходов (отходы производства подсолнечника и кукурузы), они сосредоточены в основном в северных и северо-восточных районах края. Количество районов с высоким биоэнергетическим потенциалом этих видов органических отходов более ограничено (по сравнению с зерновыми), соответственно, их энергетический потенциал меньше (рис. 1б, в).

Заключение

Биоэнергетика с использованием отходов растениеводства является активно развивающейся отраслью производства тепловой и электрической энергии за рубежом. Значительные объемы продукции растениеводства в регионах Юга России также требуют изучения потенциала использования этого энергетического ресурса. Краснодарский край является лидером по производству растениеводческой продукции. В связи с этим валовый потенциал отходов зерновых здесь составляет 5 996 тысяч т у. т./год, отходов подсолнечника – 1 899 тысяч т у.т./год и кукурузы 1 950 тысяч т у.т./год. Эти объемы биомассы отходов превышают аналогичные показатели для других крупнейших аграрных регионов Юга России (Волгоградская область, Республики Дагестан и Крым). Использование отходов растениеводства целесообразно для получения, в первую очередь, тепловой энергии для нужд сельскохозяйственных предприятий при условии минимальных затрат на транспортировку, т.е. в местах формирования этого ресурса.

Литература

1. Производство энергии из биотоплива – крупнейший возобновляемый источник в мире. [Электронный ресурс] <http://www.infobio.ru/news/3954.html> (Дата обращения - 24.06.17).
2. «Грацкая Декларация» <http://www.aebiom.org/wp-content/uploads/2017/01/Declaration-of-Graz-2017> [Электронный ресурс](Дата обращения -10.04.19)
3. «Горизонт 2020» (Horizon 2020) или Восьмая рамочная программа Европейского Союза по развитию научных исследований и технологий (РП8) https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%BE%D1%80%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D1%82_2020 [Электронный ресурс] (Дата обращения -01.04.19)
4. Проекты, с которыми связан проект uP_running <https://www.up-running.eu/related-projects> [Электронный ресурс] (Дата обращения -10.04.19)
5. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А. Перспективы использования сельскохозяйственных отходов для производства энергии на Украине. -Аналитическая записка БАУ. - №7.- 2014 г.
6. ООО «Группа компаний БиоТерм» <http://kotelpelets.ru/store/show/kostrzewa-maxi-bio-spin-50>[Электронный ресурс] (Дата обращения -10.12.18)
7. ООО «Ковровские котлы» <http://www.termowood.ru/en/?yclid=576229163454204530> [Электронный ресурс] (Дата обращения -10.12.18)
8. Клюс В.П., Клюс С.В., Жовмир Н.М., Дидковская А.Г. Газогенераторные плиты на биомассе. // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). – 2018. - №25-30. – с.60-72.
9. Caplar R and Kulicic P.A technical and economic analysis of three large scale biomass combustion plants in the UK.// Applied EnergyProc.Int. Conf. on Nuclear Physics (Munich). – Amsterdam: North-Holland/American Elsevier, 1973. -Vol.1. – p. 517.
10. АмерхановР.А., КириченкоА.С., КасьяновР.С. и др. Возможностииспользования возобновляемых источников энергии Краснодарского края. // Альтернативная энергетика и экология. – 2015. - №13-14. – с.12-25.
11. Амерханов Р.А., Авджян Н.С. Электроснабжение сельскохозяйственных потребителей Краснодарского края за счёт возобновляемых источников энергии. // Вестник аграрной науки Дона. - 2017. - №4 (40).-с.34-38.

12. Юдаев И.В. Опыт использования возобновляемых источников энергии на сельских территориях и в рекреационных зонах в регионах Южного Федерального округа. // Вестник аграрной науки Дона. -2015. - №1(29).-с.82-92.
13. Мельникова А.А., Рафикова Ю.Ю. Методика оценки условий внедрения объектов солнечной энергетики // Альтернативная энергетика и экология. – 2016. - №15-18 (203 -206). – с.12-23.
14. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям) / Под редакцией Безруких П.П.-М.: «ИАЦ Энергия», 2007.- 272 с.
15. Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России: науч. издание / под ред. Киселёвой С.В. - М.:РХТУ им. Д.И.Менделеева, 2015.-160 с.
16. Андреено Т.И., Киселёва С.В., Шакун В.П. К оценке энергетического потенциала отходов растениеводства: зерновое хозяйство // Альтернативная энергетика и экология.- 2014. -№ 12. - с. 84–95.
17. Андреено Т.И., Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю. Комплексный анализ распределения ресурсов биоэнергетики для территории Волгоградской области// Альтернативная энергетика и экология. -2017. -№07-09 (219-221).-с.49-59.
18. Андреено Т.И., Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю. Оценка энергетического потенциала отходов растениеводства Крымского федерального округа // Инновации в сельском хозяйстве. -2016. -№5(20).-с.449-455.
19. Andreenko T., Rafikova Y., Tulegenova A. Technical potential of crop production wastes as energy resource for agricultural regions of russia // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — no. 564. — P. 012136–1–012135–6. [DOI]

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ БИОТОПЛИВА ИЗ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЯМИ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО

СЖИЖЕНИЯ

ЧЕРНОВА Н.И., КИСЕЛЕВА С.В., ЗАЛИХАНОВ А.М.

Аннотация. Микроводоросли (МКВ) в качестве сырья для производства биотоплива остаются актуальным объектом исследований среди других видов биомассы. Среди технологий производства биотоплива из биомассы МКВ перспективным является гидротермальное сжижение (НТЛ), поскольку оно позволяет перерабатывать влажную биомассу МКВ и превращать все углеродсодержащие компоненты (липиды, углеводы, белки) в топливо. Однако, процесс гидротермального сжижения приводит к образованию побочной водной фазы, которая имеет ограниченную энергетическую ценность и нуждается в утилизации. Предложено рассмотреть возможность использования водной фазы после НТЛ(НТЛ-водной фазы), а также муниципальных сточных вод для выращивания МКВ в сочетании с производством биотоплива. Такая стратегия является многообещающей, поскольку снижает затраты питательных веществ (удобрений) и пресной воды для культивирования МКВ, а также выбросов CO₂ при производстве биотоплива. Осуществлен скрининг штаммов МКВ, способных к эффективному росту на сточных водах и на побочной НТЛ-водной фазе для повышения

энергоэффективности получения биотоплива технологиями гидротермального сжижения.

Штаммы микроводорослей, способные расти в сточных водах (*Arthrospira platensis Bios(P)*), *Chlorella ellipsoidea Chl-el*) и в разбавленной водной фазе после НТЛ (*Galdieria sulphuraria G-1*, *Chlorella vulgaris Chv-20/11-Ps*, *Arthrospira platensis Bios(P)*) были отобраны из коллекции НИЛВИЭ МГУ имени М. В. Ломоносова в результате экспериментов. В статье показана степень утилизации питательных веществ микроводорослями из сточных вод и из НТЛ-водной фазы. Из биомассы артроспиры, выращенной на сточных водах, была получена совместно с сотрудниками ОИВТ РАН технологией НТЛ бионефть и другие продукты и оценен их выход.

Ключевые слова: микроводоросли, биотопливо, гидротермальное сжижение, побочная водная фаза, сточные воды, утилизация.

Введение

Биоэнергетика остается крупнейшей отраслью возобновляемой энергетики, а микроводоросли являются перспективным объектом исследований среди других видов биомассы, масштабы использования МКВ в энергетических целях возрастают [1]. С другой стороны, рост мирового производства энергии и урбанизация, следствием которых являются высокие темпы образования коммунальных отходов и сточных вод, требует разработки комплексных технологий, позволяющих утилизировать отходы с максимально полным их использованием. Утилизация органических отходов с производством энергии различными технологиями является одним из методов решения этой комплексной проблемы.

В представленной работе исследуются способы утилизации микроводорослями питательных веществ из сточных вод и из побочных жидких отходов производства биотоплива из МКВ технологией гидротермального сжижения (НТЛ). МКВ для переработки жидких отходов выбраны поскольку:

- сточные воды имеют сложный состав, очистка которых от азота и фосфора и иных биогенных элементов, а также от тяжелых металлов с использованием биологических объектов оптимальна и рентабельна;

- водная фаза после гидротермального сжижения представляет собой побочный продукт, который имеет ограниченную энергетическую ценность и ее необходимо утилизировать. НТЛ-водной фазы содержит питательные вещества, необходимые для выращивания водорослей, но в количествах, на порядки превышающих стандартные.

- МКВ рассматриваются как перспективное сырье для производства биотоплива третьего поколения, поскольку имеют более высокие темпы роста, чем наземная биомасса, и при этом не конкурируют с производством продуктов питания и кормов;

- выращивание МКВ на сточных водах и в НТЛ-водной фазы сокращает использование пресной воды, питательных веществ (удобрений), что в целом приводит к удешевлению получаемого из них биотоплива. Кроме того, стоимость топлива из водорослей может быть снижена за счет сопутствующих продуктов с высокой добавленной стоимостью, таких как пищевые и кормовые добавки, фармацевтические и косметические продукты.

Разработка технологий очистки сточных вод с использованием МКВ является достаточно актуальной задачей [3-5]. В качестве моделей используют реальные или искусственные сточные воды с различными показателями ХПК и БПК, а также концентрации соединений азота, фосфора, и растворенного углерода. Эффективность потребления этих веществ микроводорослями оценивается скоростью и общим количеством поглощенных из сточных вод азота (в форме NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , общий азот), фосфора (PO_4^{3-} , общий фосфор), растворенного и общего углерода и др. [6]. При этом учитывается, что помимо органических и неорганических химических веществ, в сточных водах также присутствуют бактерии и простейшие, которые конкурируют за питательные вещества с МКВ и даже поедают их. По результатам экспериментов проводят отбор штаммов МКВ, демонстрирующих значительную скорость роста и, соответственно, поглощение биогенных элементов и наиболее устойчивых к воздействию токсичных компонентов сточных вод [7]. В ряде исследований ставится также задача совершенствования способов культивирования МКВ на сточных водах [8], исследования результативности использования консорциумов микроводорослей и бактериальных организмов [5,9], анализа возможности культивирования МКВ на сточных водах в открытых культиваторах в широком диапазоне климатических условий [3,10]

Водная фаза после гидротермального сжижения образуется в качестве побочного продукта в большом количестве (20-50 %) из-за использования высоко влажной биомассы и имеет ограниченную энергетическую ценность, но содержит значительное количество питательных веществ, пригодных для выращивания МКВ, поэтому водная фаза требует повторного использования [11-15].

К важнейшим достоинствам биотоплива, вырабатываемого из МКВ, относится сокращение выбросов в окружающую среду загрязняющих веществ: при сжигании биотоплива из МКВ в атмосферу выделяется на 98% меньше серосодержащих соединений и на 50% меньше твердых частиц, чем при сжигании топлива на основе ископаемого сырья. Как и другие виды биомассы, МКВ как сырье для производства биотоплива и энергии являются "CO₂-нейтральными". Кроме того, технологии производства биомассы МКВ в открытых и закрытых системах могут быть оптимизированы под аккумуляцию и улавливание диоксида углерода в биомассе МКВ с последующим переводом ее в геологически стабильные формы.

Для получения моторного биотоплива в современном мире используется множество технологий. Биомасса микроводорослей может быть переработана в широкую линейку биотоплив: биоэтанол, биобутанол, биодизель, бионефть, водород и др. Традиционной технологией является переэтерификация липидов микроводорослей в биодизель. Однако, очевидными недостатками этого метода являются высокие энергетические затраты на отделение биомассы МКВ от культуральной жидкости и сушку, а также использование небезопасных органических растворителей (таких как метанол) на экстракцию липидов из биомассы МКВ. Кроме того, при производстве биодизеля в топливо преобразуется только липидная часть, тогда как оставшаяся (большая часть биомассы МКВ), включающая белки и углеводы, не используется для получения жидкого биотоплива.

Технологии термохимической конверсии в значительной степени лишены этих недостатков, они проводятся путем нагревания и разложения биомассы в присутствии или отсутствии воздуха (кислорода). Видами термохимической кон-

версии являются прямое сжигание (основной продукт - электрическая энергия), газификация (синтез-газ), пиролиз (синтез-газ, бионефть, биоуголь), и гидротермальное сжижение (бионефть, синтез-газ, биоуголь). В последние годы достаточно активно развиваются технологии пиролиза и гидротермального сжижения биомассы МКВ. При пиролизе МКВ для получения твердых, жидких и горючих газообразных продуктов биомасса подвергается нагреву до температур 400 – 600°C, но в некоторых случаях температура может достигать и 800°C. Менее изучен режим пиролиза МКВ, направленный на получение горючих газов с высоким содержанием водорода и метана и высокой теплотворной способностью. Поскольку клетки МКВ малы по размеру, а сухая биомасса МКВ сыпуча, не требуется дополнительного измельчения, как для других видов биомассы. Однако для эффективного пиролиза биомасса МКВ должна содержать минимальное количество влаги, что значительно повышает стоимость реализации технологии. В процессе переработки биомассы методом НТЛ не требуется предварительной сушки сырья: МКВ могут подаваться в реактор во влажном состоянии, например, в виде водной суспензии. Кроме того, при получении топлива методом НТЛ вклад в выход бионефти вносят не только липиды, но также углеводы и белки, что повышает суммарный выход продукта.

Получение биомассы выращиванием МКВ на муниципальных сточных водах, ее конверсия методом НТЛ в биотопливо с последующей утилизацией побочной водной фазы для частичного замыкания цикла производства бионефти по питательным веществам целью уменьшения экологической нагрузки на окружающую среду является предметом данного исследования.

Материалы и методы исследований

При проведении экспериментов были использованы штаммы микроводорослей с высокой скоростью роста и способные отзываться на изменяющиеся условия внешней среды (уменьшение/увеличение концентрации основных биогенных элементов, наличие токсичных веществ в культуральной жидкости и др.) из коллекции НИЛ ВИЭ МГУ:

– для рециклинга сточных вод штаммы *Arthrospira platensis rsemsu Bios(P)*, *Gloeotila pulchra rsemsu Pz-6*, *Galdieria sulphuraria rsemsu G-1*, *Chlorella ellipsoidea rsemsu Chl-el*;

– для рециклинга водной фазы после НТЛ штаммы *A. platensis rsemsu Bios(P)*, *A. platensis rsemsu 1/02*, *A. platensis rsemsu 1/02-T*, *G. sulphuraria rsemsu G-1*, *C. vulgaris rsemsu Chv-20/11-Ps*.

Все указанные штаммы МКВ, кроме культуры *Arthrospira platensis rsemsu Bios(P)*, являются альгологически чистыми и поддерживаются в коллекции НИЛ ВИЭ на стерильных питательных средах (*C. ellipsoidea* и *C. Vulgaris* на среде Тамия; *G. Sulphuraria* на среде Аллен; *G. Pulchra* на среде BG-11) [16]. Культура *A. platensis* выращивается в НИЛ ВИЭ на среде Заррука [17] в двух плоскостных культиваторах открытого типа объемом 500 л каждый методом полунепрерывного культивирования более 30 лет и представлена устойчивым консорциумом МКВ *A. platensis* с гетеротрофными бактериями-ассоциантами, которые были идентифицированы нами как представители родов *Pseudomonas* и *Bacillus*. Последние способны ассимилировать растворенное органическое вещество и токсичные элементы и способствовать лучшей очистке муниципальных сточных вод.

В экспериментах использовались растворы водной фазы, полученные в процессе НТЛбиомассы МКВ *A. platensis rsemsu Bios (P)*, при различных температурах 270, 300 и 330 °С (всего было определено 58 показателей технологической воды). Анализ этих растворов показал, что в химическом составе водной фазы в большом количестве содержатся все питательные вещества, необходимые для выращивания биомассы МКВ. Однако, только несколько химических соединений (карбонаты, нитриты, сульфаты) в составе трех полученных растворов водной фазы существенно отличаются в различных режимах НТЛ. При этом водная фаза, полученная в результате НТЛ при 270 °С, имеет наиболее благоприятный состав для культивирования МКВ из-за меньших количеств аммония. По содержанию гидрокарбонатов (55 г/л) этот раствор от НТЛ более подходит для выращивания артротрипы. Поэтому в дальнейшем выращивание МКВ проводилось именно в этом растворе водной фазы, полученном при НТЛ биомассы артротрипы при 270 °С.

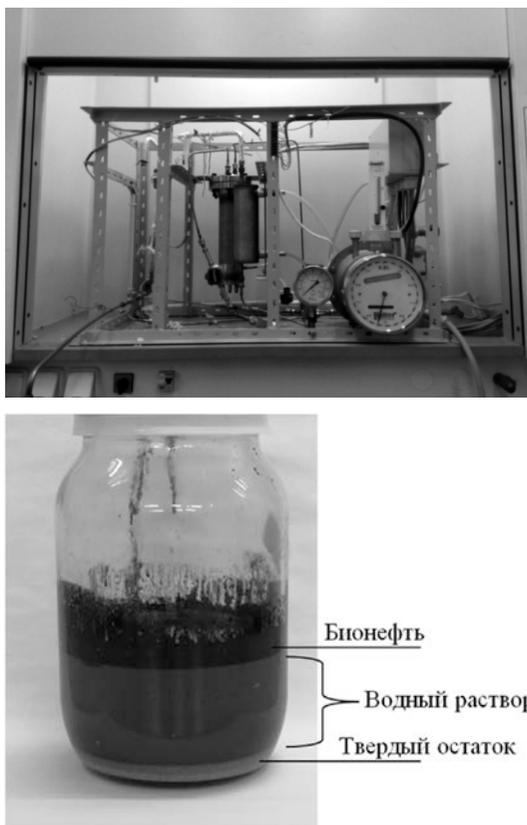


Рис. 1. Экспериментальная установка для гидротермального сжижения микроводорослей и продукты, полученные после НТЛ из МКВ (бионефть, водный раствор и твердый остаток)

В качестве модели сточных вод использовались муниципальные сточные воды г.Москвы. Культивирование МКВ на сточных водах и растворе водной фазы после НТЛбиомассы артроспирры проводилось в колбах Эрленмейера объемом 250 -500 мл, начальная концентрация МКВ составляла порядка 0,16 г/л по сухому весу. Культивирование проводилось в неразбавленных пробах водной фазы и сточной воды, а также в разбавленных водопроводной водой указанных пробах (интервалы разбавления водной фазы – 150...500 раз, а сочной воды – 3...10 раз).Контролем служил рост биомассы отобранных штаммов МКВ на стандартных питательных средах, указанных выше. Каждый эксперимент проводился в трех повторностях, рост биомассы контролировался колориметрически. Контрольные и опытные колбы выращивали на качалках (вращение 120 об/мин; T=33°C; освещение 25-30 $\mu\text{E}/\text{M}^2/\text{сек}$ тепличными лампами ЛРЛФ круглосучточно). Контроль за поглощением биогенных элементов осуществлялся посредством химических анализов стандартных биогенных элементов в культуральной жидкости на разных этапах выращивания МКВ. Состояние культур МКВ визуально контролировалось на разных этапах экспериментов путем микроскопирования проб культуральной жидкости (Микроскопы «ЛОМО Микмед-2» и «Axioplan 2 Imaging» с камерой «AxioCamM5m» и модульной системой обработки и анализа изображений «AxioVision 3.1.» фирмы CarlZeiss).

Гидротермальное сжижение биомассы МКВ проводилось на установке (рис.1), ранее описанной в работе [18]. Были проведены эксперименты по получению бионефти технологией НТЛиз микроводорослей при T=270 °C, 300 °C и 330 °C.

Выходы бионефти, газообразных продуктов, твердого остатка и водного раствора составили 34-46%, 12-18%, 12-18% и 10-24 % соответственно. Были определены молекулярные формулы веществ в составе конечных продуктов. Установлено, что в биотопливе из МА доминируют соединения, содержащие один и два атома азота, а также присутствуют классы ON₂, N₃. Бионефть, полученная из водорослей с большим содержанием липидов и углеводов близка по составу к традиционной нефти [19]. Водный раствор после НТЛ использовался для культивирования микроводорослей и проверки возможности его рециркуляции.

Результаты и обсуждение

3.1 Характеристика состава муниципальных сточных вод

Из-за осеннего периода с большим уровнем осадков пробы муниципальной сточной воды оказались существенно разбавлены (таблица 1). Концентрация биогенных элементов (NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-}) низкая – 110, 2,4 и 15 мг/л соответственно. Показатели ХПК (окисляемость бихроматная) 140 мг/О/дм³ и БПК₅=85 мгО₂/дм³ свидетельствуют о том, что в пробе содержится незначительное количество растворенной органики. По значению водородного показателя (рН=8,2) сточные воды относятся к щелочным. Количество нефтепродуктов (2,7 мг/дм³) и суммарных ароматических веществ (0,668 мг/дм³) превышает средние показатели для этого класса сточных вод. Сопоставление состава сточных вод с классическим составом культуральных сред для роста МКВ показывает, что в сточных водах содержатся все необходимые для роста и развития МКВ микроэлементы. Для анализа типичности использованной сточной воды нами было проведено сопоставление содержания основных биогенных соединений в сточных водах по литературным данным. При этом были учтены работы, аналогичные

по направленности, т.е. посвященные исследованию роста МКВ на сточной воде. Сопоставление показало, что использованные в исследовании сточные воды являются типовыми, но с заниженным показателем ХПК, и завышенным содержанием аммонийного азота.

Таблица 1.
Концентрация значимых для культивирования микроводорослей соединений в пробах муниципальной сточной воды г.Москвы

Показатель качества, единицы измерения	Значение показателя	Показатель качества, единицы измерения	Значение показателя
Показатели химического состава воды:			
Водородный показатель (рН), ед. рН	8,2	Гидрокарбонаты, мг/дм ³	820
ХПК (окисляемость бихроматная), мгО/дм ³	140	Карбонаты, мг/дм ³	<6
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	85	Аммоний, мг/дм ³	110
Нитраты, мг/дм ³	2,4	Фосфаты, мг/дм ³	15
Калий, мг/дм ³	20	Магний, мг/дм ³	14

3.2 Характеристики роста микроводорослей на сточных водах

Три клоновые альгологически чистые культуры *A. platensis* плохо росли на слабо разбавленных сточных водах, и уже на 5-7 сутки культуры погибали. Наоборот, культура *A. platensis* Bios(P) с бактериями-ассоциантами обнаружила хороший рост на сточной воде, разбавленной даже в 2 раза. Поэтому опыты с культурой *A. platensis* Bios(P) с бактериями-ассоциантами проводились на 2-3-кратно разбавленной сточной воде. Как видно на рис.2, рост культур в опыте не только не отстает от контроля, но в период 7–12 сутки рост культуры на сточной воде с разбавлением 2х даже опережает контроль.

На 19-е сутки эксперимента плотность культур в обоих вариантах достигла тех же значений, что и в предыдущей стадии эксперимента. В дальнейшем выращивание культуры было продолжено до 47 суток с добавлением таких же порций сточной воды. В этих условиях рост и развитие МКВ происходили примерно с постоянной скоростью. После 47 суток рост культуры МКВ *A. platensis* Bios(P) замедлялся и выходил на плато, но без периодического отбора выросшей биомассы из культуральной среды значительного прироста достичь не удается. По-видимому, при плотности биомассы более 1 г/л по сухому веществу культура достигает той максимальной плотности, при которой лимитируются освещенность, питательные элементы и накапливаются экзаметаболиты, отрицательно влияющие на рост и развитие клеток (рис. 3).

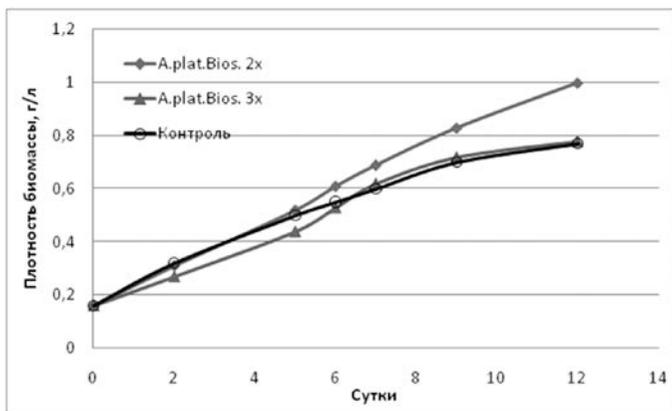


Рис. 2. Динамика плотности биомассы *A. platensis* в сточных водах с 2х и 3х разбавлением

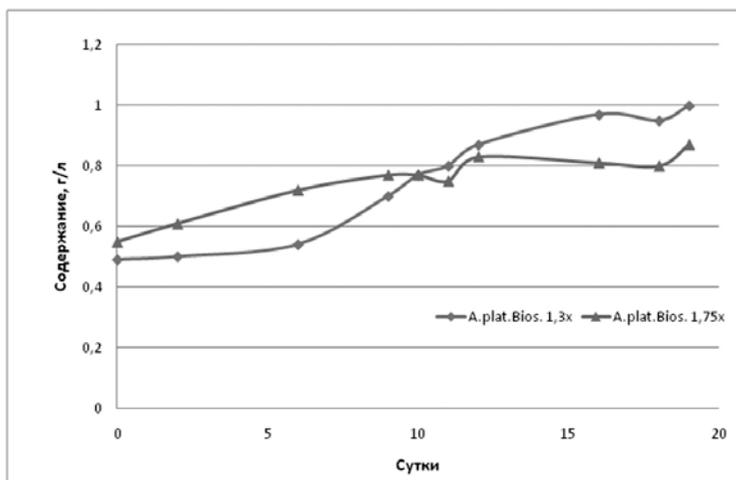


Рис. 3. Продолжение эксперимента: рост клеток *A. platensis* в сточных водах с добавлением дополнительной порции сточных вод после 12 суток роста

Аналогичные эксперименты с периодическим добавлением сточной воды и элементов питательных сред были проведены с другими штаммами МКВ (*C.ellipsoidea*, *G.pulchra* и *G. sulphuraria*). Реакция различных микроводорослей на периодические добавления сточной воды и биогенных элементов была штаммоспецифичной. Так, на сточной воде без добавления питательных веществ в первые 12 суток хлорелла в отличие от других штаммов демонстрировала значительный рост, в то время как микроводоросли гальдиерия и глеотила не давали прироста биомассы, хотя клетки их оставались в жизнеспособном состоянии (Рис. 4).

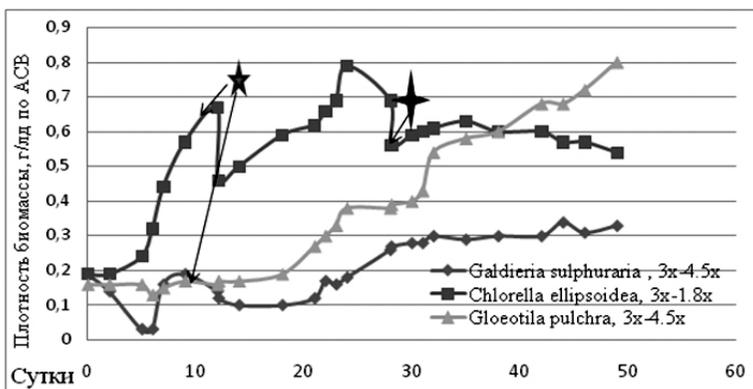


Рис. 4. Динамика плотности биомассы МКВ *C.ellipsoidea*, *G.pulchra* и *G.sulphuraria* при культивировании в сточной воде. В легенде указаны начальное и конечное разбавление сточной воды.

★ – добавка 50 мл сточной воды для хлореллы, добавка 50 мл $\frac{1}{4}$ питательной среды BG-11 для глеотилы, добавка 50 мл $\frac{1}{4}$ питательной среды Алленда для галдиерии. ⚡ – добавка 34 мл $\frac{1}{4}$ питательной среды Тамия для хлореллы.

Добавки порций сточной воды на 12 сутки экспериментов в опытные варианты с хлореллой вызвали значительный рост клеток хлореллы до достижения их максимальной плотности 0,8 г/л по сухому веществу на 20-е сутки. Следующая добавка среды Тамия (25% по объему) стабилизировала рост клеток хлореллы на уровне 0,6 г/л по сухому веществу в течение дальнейших 20 суток. *Gloeotila* увеличила биомассу в 5 раз на 47-е сутки роста, адаптировавшись к условиям роста на сточной воде. Для экстремофильной водоросли *Galdieria* условия роста оказались неприемлемыми (рис.4). Таким образом, для эффективного выращивания конкретных МКВ на сточной воде нужен поиск специфических ключевых факторов для их роста и развития.

3.3. Эффективность очистки сточных вод с использованием микроводорослей

Неорганический азот и фосфор особенно трудно удалить из сточных вод. Как показывает сравнительный анализ основных химических показателей сточной воды до и после выращивания на ней МКВ (Табл. 2), *A. platensis* Bios (P) способна к эффективному росту на слабо разбавленных сточных водах, но при обязательном условии создания для роста и развития клеток артроспиры щелочных условий в питательной среде добавлением пищевой соды в количестве не менее 6 г/л. Клетки *A. platensis* Bios (P) полностью потребовали из сточной воды фосфор в виде ортофосфатов, азот в виде аммония и нитратов, концентрация которых снизилась в 4-30 раз, в 58-73 раза и в 24 раза соответственно.

В экспериментах с *C.ellipsoidea* из – за низкой скорости роста клеток в начале эксперимента и истощения питательных элементов из сточной воды производилась фиксированная добавка на 27 сутки эксперимента питательной среды Тамия с

содержанием соли нитрата калия 5 г/л, что увеличило содержание нитратов в питательной среде до 807,7 мг/л. По окончании эксперимента (47 суток) нитраты были ассимилированы клетками хлореллы более чем на 70%, а фосфаты и аммоний ассимилировались полностью.

G.pulchra адаптировалась к условиям роста к 25 суткам, в результате за 47 суток выращивания на разбавленной сточной воде с добавлением на промежуточных этапах ¼ среды BG-11 клетками было ассимилировано порядка 67% основных биогенных элементов из сточной воды. *G.sulphuraria*не адаптировалась к культивированию на сточной воде. После выращивания МКВ на сточной воде значительно уменьшились показатели БПК₅, что свидетельствует о сокращении количества легкорастворимой органики в сточной воде.

Таблица 2.

Характеристики сточной воды до и после выращивания в ней МКВ (длительность выращивания 47 суток)

Показатель качества, единицы измерения	Результат измерения				Относит. погрешность, %
	Исходная сточная вода	<i>A. platensis-Bios-2x-1,2x</i>	<i>A. platensis-Bios-3x-1,5x</i>	<i>C. ellipsoidea3x-1,8x</i>	
ХПК (бихроматная), мгО/дм ³	140	140	120	140	15
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	85	68	53	72	13
Фосфаты, мг/дм ³	15	<0,5	4	0,95	10
Нитраты, мг/дм ³	2,4	<0,5	<0,1	235	20
Аммоний, мг/дм ³	110	1,9	1,5	1,3	12

3.4. Эффективность утилизации водной фазы после НТЛ с использованием микроводорослей

Как указывалось выше, при производстве биотоплива из МКВ методом гидротермального сжижения, образуется значительное количество водной фазы как побочного продукта, не имеющего энергетического значения. Поэтому исследование возможности замыкания процесса производства биотоплива, а именно выращивания МКВ с максимальным использованием побочной водной фазы является актуальным. Нами была изучена возможность утилизации питательных веществ из водной фазы после НТЛ водорослей, полученной в процессе культивирования *A. platensisBios*. Содержание питательных веществ в НТЛ-водной фазына порядка выше, чем в стандартных питательных средах, необходимых для выращивания МКВ. Это биогенные катионы: аммония (14300 мг/ дм³), калия (4500 мг/ дм³), магния (до 50 мг/ дм³), натрия (3800 мг/ дм³), кальция (до 50 мг/ дм³), железа (до 5 мг/ дм³), кремния (20 мг/ дм³); биогенные анионы: ортофосфатов (5200 мг/

дм³), сульфатов (530 мг/ дм³), нитратов (до 50 мг/ дм³), гидрокарбонатов (5490 мг/ дм³), карбонатов (7200 мг/ дм³), хлоридов (600 мг/ дм³). Кроме того, в водном растворе присутствует масса микроэлементов, жизненно необходимым для роста и развития микроводорослей: марганец, медь, вольфрам, кобальт, хром, молибден, никель, ванадий, цинк, бор, титан.

Помимо, перечисленных выше минеральных элементов в большом количестве содержатся общий азот, в основном представленный катионами аммония в очень большом количестве (от 14,3 г/л в НТЛ-водной фазы при 270°C). Содержание азота в значительной степени зависит от содержания белка в МКВ, причем более половины азота из МКВ переносится в водную фазу во время гидротермального сжигания (известно, что микроводоросли артроспира содержат белок в рекордных количествах – до 65%). Высокое значение рН в НТЛ-водной фазы, связано с высоким содержанием аммиака, образующегося при гидролизе белка и дезаминировании. Органический углерод представлен, в основном, в виде короткоцепочечных органических кислот (уксусной, пропионовой и др.). Причем в большом количестве содержатся ацетаты (37,0 г/л). Ацетат может выступать в качестве субстрата для миксотрофного и гетеротрофного роста МКВ, способствуя увеличению продуктивности некоторых штаммов.

Водная фаза без разбавления ингибирует рост МКВ, что связано с присутствием большого количества токсичных соединений (фенолов, циклических соединений азота, тяжелых металлов, ионов аммония). Для предотвращения токсического действия необходимо интенсивное разведение НТЛ-водной фазы разбавленной питательной средой. Экспериментально отобраны штаммы МКВ, которые могут расти в течение длительного времени (более месяца) на разбавленной НТЛ-водной фазы: *G. sulphuraria*, *C. vulgaris* и *A. platensis Bios (P)*. Было показано, что рост *G. sulphuraria* в первые 25 дней культивирования на разбавленной в 500 раз водной фазе превышал рост клеток на питательных средах, что подтверждает способность *Galdieria* к миксотрофии. У хлореллы также наблюдался устойчивый рост, но он был ниже контрольного. Консорциумы *A. platensis Bios* с ассоциированными бактериями показали устойчивый рост при меньшем разбавлении водной фазы после НТЛ, а именно – в 300–400 раз. Но выращивание этого консорциума требует добавления ионов бикарбоната для создания более благоприятных условий для роста и развития артроспира [19]. Таким образом, в результате данных исследований была доказана возможность утилизации кандидатными штаммами МКВ питательных веществ из НТЛ-водной фазы для частичного замыкания по питательным веществам цикла производства бионефти.

Заключение

Экспериментально подобраны способы культивирования МКВ на муниципальных сточных водах и в водной фазе после гидротермального сжигания биомассы. Была проанализирована эффективность очистки сточных вод и НТЛ-водной фазы. Были отобраны две перспективные культуры МКВ (*Arthrospiraplantensis Bios (P)* и *Chlorella ellipsoidea Chl-el*), способные эффективно расти на сточных водах разного разбавления длительное время. Показано, что консорциум МКВ *A. platensis Bios (P)* с бактериями-ассоциантами может эффективно расти на сточных водах, с разбавлением в 5 раз и ассимилировать биогенные элементы в течение 8 суток. При более высоких разбавлениях из-за недостатка пита-

тельных веществ рост клеток прекращался на 7 сутки. Добавление NaHCO_3 в сточную воду в количестве 6 г/л создавало благоприятные условия для роста и развития МКВ артроспиры (рН>8,5; обеспечение культуры необходимыми для роста анионами HCO_3^-). При разбавлении сточных вод в 1,2-1,5 раза с добавлением NaHCO_3 эффективный рост данного консорциума МКВ с бактериями-ассоциантами наблюдался в течение 47 суток, в результате чего концентрация ионов азота и фосфора в сточных водах уменьшалась до следовых значений. Кроме того, уменьшалось количество легкорастворимой органики (БПК₅) с 85 до 68 ± 53 мгО₂/дм³, что свидетельствует о способности МКВ переходить на миксотрофный рост с потреблением короткоцепочечной органики.

C. ellipsoideana сточной воде без добавления питательных веществ в первые 12 суток демонстрировала значительный рост биомассы (увеличение плотности биомассы в 3,5 раза). Добавление на 12 сутки опыта порции сточной воды, ¼ среды Тамия, как и в случае артроспиры, привело к значительному росту клеток хлореллы до достижения их максимальной плотности 0,8 г/л по сухому веществу.

Установлено, что для более эффективной очистки сточных вод путем выращивания МКВ необходим подбор специфических ключевых факторов для продуктивного роста биомассы. Длительность проведения экспериментов (47 суток) позволили выявить адаптационные способности некоторых МКВ к сточным водам в качестве среды выращивания и получить альго-бактериальные культуры, способную к «избыточному» поглощению биогенных элементов.

Экспериментально отобраны штаммы МКВ, которые могут расти длительный период времени в разбавленном НТЛ-водной фазы – *G. sulphuraria*, *C. vulgaris* и *A. platensis Bios(P)*. Наиболее активный рост также продемонстрировал консорциум *A. platensis Bios(P)* с гетеротрофными бактериями-ассоциантами, которые хорошо росли на менее разбавленной НТЛ-водной фазы (300х – 400х). *G. Sulphuraria* также хорошо росла более месяца в водном растворе, но разбавленном в 500 раз за счет перехода клеток на миксотрофное питание.

Полученные результаты подтверждают, что основанная на микроводорослях технология очистки сточных вод и утилизации водной фазы после НТЛ является технически выполнимой и перспективной и способствует частичному замыканию цикла производства бионефти по питательным веществам и уменьшает экологическую нагрузку на окружающую среду.

Литература

1. YujieSu, KaihuiSong, PeidongZhanetal. Progress of microalgae biofuel's commercialization // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 74 (2017) 402–411. Yujie, Su. Progress of microalgae biofuel's commercialization / Su Yujie [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 74. – P. 402–411.
2. Chernova N.I. Renewable energy technologies: enlargement of biofuels list and co-products from microalgae / N. I. Chernova, S. V. Kiseleva, M. S. Vlaskin, Y. Y. Rafikova // MATEC Web of Conferences. – 2017. – No. 112. – P. 1–6.
3. Mikael Jämsä, Fiona Lynch, Anita Santana-Sánchez et al. Nutrient removal and biodiesel feedstock potential of green alga UHCC00027 grown in municipal wastewater under Nordic conditions // Algal Research 26 (2017) 65–73.

4. Hao Rui, Yu Zhen, Li Jinchun, Gao Min, Ma Weiling, Zhu Yi* Comparative study on cultivation of microalgae for nutrient removal and lipid production in different artificial wastewaters// *Int J Agric & Biol Eng.* January, 2017. Vol. 10 No.1. p. 107-113.
5. Tejido-Nuñez Y., Aymericha E., Sanchoa L., Refardt D. Treatment of aquaculture effluent with *Chlorella vulgaris* and *Tetrademus obliquus*: The effect of pretreatment on microalgae growth and nutrient removal efficiency. *Ecological Engineering* 136 (2019) 1–9.
6. Posadas E., Alcantara C., Garcia-Encina P.A. et al. Microalgae cultivation in wastewater/ *Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts: From Feedstock Cultivation to End Products*. Ed. Raul Muñoz, Cristina Gonzalez-Fernandez, Woodhead Publishing, 2017. P.67-92.
7. Sheng-Yi Chiu, Chien-Ya Kao, Tsai-Yu Chen et al. Cultivation of microalgal *Chlorella* for biomass and lipid production using wastewater as nutrient resource// *Biore-source Technology* 184 (2015) 179–189
8. Han T, Lu H F, Ma S S, Zhang Y H. et al. Progress in microalgae cultivation photobioreactors and applications in wastewater treatment: A review. *Int J Agric & Biol. Eng.* 2017; 10(1): 1–29.
9. Sriram S. and R. Seenivasan *Microalgae Cultivation in Wastewater for Nutrient Removal. J. Algal Biomass Utl.* 2012, 3 (2): 9- 13
10. Chernova Nadezhda, Sofya Kiseleva, Mikhail Vlaskin, Yulia Rafikova. Estimation of microalgae resource potential for bio-oil production and sustainable rural development in the climatic conditions of Russia (the Republic of Dagestan). *MATEC Web of Conferences*, № 178, c. 09011-1-6
11. Leng L, Li J, Wen Z and Zhou W 2018 *Biores. Technol.* 256 529–42
12. Alba L G, Torri C, Fabbri D, Kersten S R A and Brillman D W F 2013 *Chem. Eng. J.* 228 214- 23
13. Biller P, Madsen R B, Klemmer M, Becker J, Iversen B B and Glasius M 2016 *Biores. Technol.* 220 190-9
14. Zhou Y, Schideman L, Yu G and Zhang Y 2013 *Energ. & Environm. Sc.* 6(12) 3765-79
15. Bagnoud-Velasquez M, Schmid-Staiger U, Peng G, Vogel F and Ludwig C 2015 *Alg. Res.* 8 76- 82
16. Каталог культур микроводорослей в коллекциях СССР. М.: ИФР РАН, 1991. С.53-55
17. Zarrouk, C. Contribution a l'etude d' une cyanophycee / C. Zarrouk. – Influence de diverse facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthese de *Spirulina maxima* (Setch et Gardner) Geitler: University of Paris, France, 1966.
18. Vlaskin, M.S., Grigorenko, A.V., Chernova, N.I. et al. Bio-oil Production by Hydrothermal Liquefaction of Wet Biomass of Microalgae in a Plant with Heat Recovery (December 11, 2018). International Conference on New Horizons in Green Chemistry & Technology (ICGCT) 2018. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3299212>
19. Chernova N.I., Kiseleva S.V., M S Vlaskin et al. Hydrothermal liquefaction of microalgae for biofuel production: the recycling of nutrients from an aqueous solution after HTL // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2019. — no. 564. — P. 012101–1–012101–6.

СИФОННЫЕ ВОДОЗАБОРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ В ВОДОЕМАХ-ОХЛАДИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

*СОЛОВЬЕВ А.А., ЗАЛИХАНОВ А.М., СОЛОВЬЕВ Д.А., ЧЕКАРЕВ К.В.***Аннотация**

Выполнен анализ условий эффективного снижения температуры выходящей из водоема воды с использованием щелевого водозаборника, работающего по принципу гидравлического сифона. Предложена техническая реализация щелевого водозаборника. Проведено экспериментальное моделирование и выполнены расчеты влияния расхода на глубину охлаждения оборотной воды в лабораторном бассейне с сифонным щелевым водозаборником. В заключении содержится вывод об эффективности использования сифонных щелевых водозаборников в системах охлаждения оборотной воды электростанций.

Ключевые слова: водоемы-охладители, водозаборные сооружения, термогидравлическое моделирование, эффективность охлаждения оборотной воды.

Необходимым условием работы электростанций с термодинамическим циклом производства электрической энергии является охлаждение конденсаторов турбин. Для отвода низкопотенциального тепла атомных и тепловых электростанций широко используются водоемы – охладители с градирнями, функционирующими по схеме оборотного водоснабжения [1, 2, 3]. Исследованиями последних лет установлено, что в летний период года не удается достигать необходимого охладительного эффекта циркуляционной воды, от которого зависит фактическая мощность электростанции [4, 5]. Причина в снижении испарительного охлаждения с водной поверхности, на которой, как правило, одновременно располагаются водовыпускные и водозаборные сооружения [6]. Для преодоления эффекта испарительного недоохлаждения в жаркие и влажные периоды года в работе ставится задача обосновать такой выбор конструктивно компоновочных параметров водозаборных сооружений, который позволяет получать эффективное снижение температуры охлажденной циркуляционной воды, определяющей вакуум в конденсаторах и фактическую мощность электростанций. В качестве средства для решения этой задачи нами был использован метод термогидравлического моделирования с лабораторной моделью водоема – охладителя дополненного сифонным водозабором с щелевым затвором [7].

Для охлаждения циркуляционной воды в водоеме-охладителе традиционно используется способ, в котором впуск теплой воды, ее охлаждение за счет естественных природных процессов и забор воды выполняется из верхнего поверхностного слоя водохранилища. Охлаждение воды внутри водоема происходит путем теплопередачи с поверхностного и придонного слоя. Выхолаживание свободной поверхности водоема осуществляется за счет передачи тепла окружающему воздуху в результате испарения воды. В придонном слое вода охлаждается за счет теплообмена с дном водоема. В процессе охлаждения воды в водоеме-охладителе возникает стратификация, при которой холодная вода оказывается в придонном слое, а теплая вода в поверхностном слое. Поскольку водовыпуск и водозабор осуществляется с поверхностного слоя водоема-охладителя, для большего понижения температуры воды в этом слое, стремятся увеличить время контакта теплого поверх-

ностного слоя воды с наружным воздухом. С этой целью строят струенаправляющие дамбы, увеличивающие путь транзитной струи от места входа до места забора воды. Необходимого для штатной работы конденсаторов турбин охлаждения циркуляционной воды за счет пространственной интенсификации теплообмена с воздухом и испарения при высокой температуре и большой влажности воздуха, как правило, в этом случае не достигается.

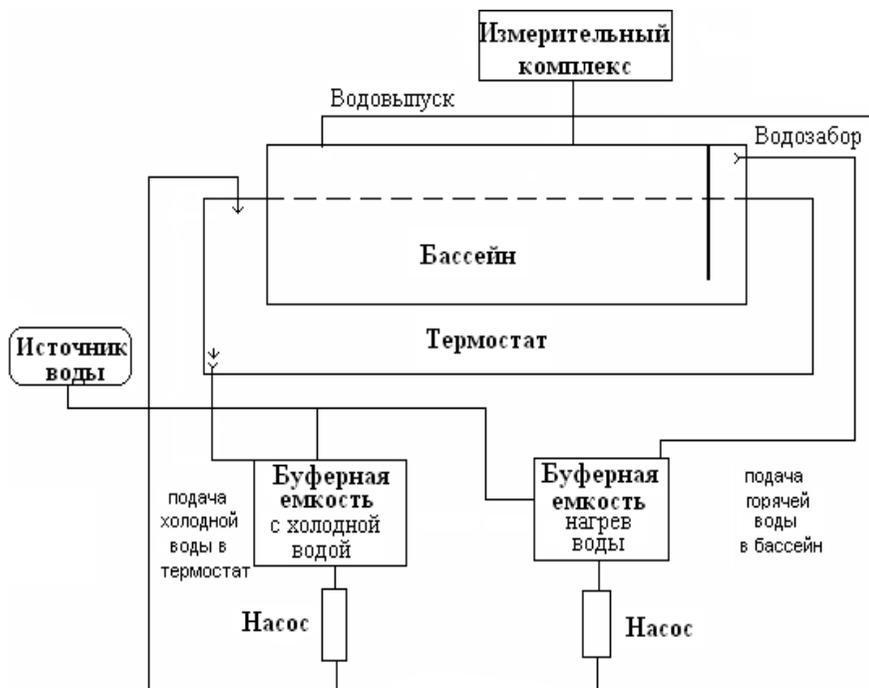


Рис 1. Блок-схема экспериментальной установки для исследования процессов теплообмена в физической модели водоема-охладителя.

Интенсификация степени охлаждения оборотной воды может быть получена за счет конструктивного заглубления уровня отбора воды в водозаборном сооружении. Для этого необходимо отгородить зону забора воды от остального объема водоема перегородкой. Верхний край перегородки должен быть расположен выше уровня воды, а нижний край размещаться вблизи дна водоема, образуя просвет между перегородкой и дном, через который из придонного слоя в зону водозабора сможет поступать только холодная вода. Таким образом, водозаборное сооружение в этой конструкции представляет собой сифон с щелевым затвором, регулирующей объем придонной воды отбираемой водозаборным сооружением [7].

Для оценок эффективности охлаждающих функций конструкции сифонного водозабора были проведены экспериментальные исследования процессов тепло-

обмена в модельном водоеме с запуском на его водную поверхность горячей и оборотом с глубинных слоев охлажденной воды. Установка (рис. 1) включала в себя: контур горячей воды – для моделирования процесса подачи и охлаждения воды в водоёме; контур холодной воды – для имитации придонного охлаждения водоема; контрольно-измерительный комплекс.

Замкнутый контур холодной воды состоит из: термостата (ёмкости, имитирующей температуру подстилающей поверхности бассейна-охладителя); буферной ёмкости с холодной водой; насоса для подачи холодной воды в термостат; трубопроводов с кранами.

В контрольно-измерительный комплекс входят следующие компоненты: датчики температуры; устройство сбора данных E 14-140 L-card с программным обеспечением; компьютер. Параметры модельного бассейна выбирались в относительном масштабе подобным натурному наливному водохранилищу на основе озера Лесное в пойме реки Дон [8] (таблица 1).

Таблица 1.

Характерные параметры натурального водохранилища и модельного бассейна

Параметры	Натурный водоем	Модельный бассейн
площадь водного зеркала, м ²	4 900 000	1,5
объём воды, м ³	32 000 000	0,15
максимальная длина, м	3 500	1,5
максимальная ширина, м	1 900	1,0
площадь водного зеркала, м ²	3 890 000	1,0
средний расход сбрасываемой воды м ³ /с	50	0,0005
средняя глубина, м	6,5	0,1
температура горячей воды, °С	40	40
температура воды на выходе, °С	33	18
температура глубинной воды, °С	10	10

Модель водоема-охладителя объемом (1,0x0,8x0,12) м³, располагалась в термостатирующем бассейне объемом (1,2x1,0x0,15) м³ (рис.2). Между стенками бассейнов имелся зазор в 0,1м. Образующееся между стенками бассейнов пространство заполнялось водой с заданной температурой, которая поддерживалась в процессе экспериментов постоянной. Эта вода предназначалась для имитации влияния дна и берегов водоема-охладителя на процесс передачи к воде, заполняющей модельный бассейн. Циркуляция воды в бассейне-термостате осуществлялась насосом, включенным в контур теплообменника. Необходимый уровень воды в обоих

бассейнах поддерживался с помощью сливных шлангов перемещение открытых концов, которых по вертикали регулировалось, а начало каждого шланга имело соединение с дном соответствующего бассейна.

Модельный бассейн заполнялся горячей водой, которая поступала в него для охлаждения. Для соответствия орографии стенок модельного бассейна с очертаниями берегов реального водоема-охладителя, внутренняя часть бассейна была ограничена вкладкой из оргстекла в заданном масштабе, повторяющей береговую линию натурального водохранилища (рис.2). Подача воды в модельный бассейн-охладитель осуществлялась через щелевой затвор в перегородке. Перемещение затвора в вертикальном направлении регулировалось, для имитации поступления воды из основной части бассейна в отгороженный сифонный отсек. Источник горячей воды, которая подавалась в модельный бассейн для охлаждения, находился в накопительной емкости. Температура воды в накопительной емкости поддерживалась терморегулятором, обеспечивающим включение и отключение нагревательного элемента. Подача воды из накопительной емкости в водовыпуск спуск осуществлялась шлангом, соединенным с насосом.

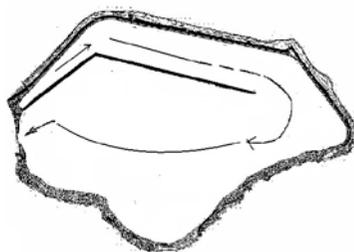


Рис. 2. Лабораторная модель бассейна-охладителя с орографической вкладкой и сифоном с щелевым затвором (слева); контур границ натурального водохранилища (справа).

Отбор воды охлаждаемой в модельном бассейне осуществлялся через щелевой водозаборник с регулируемой высотой придонного щелевого отверстия. Водозаборник закреплялся на вертикальной стойке, которая позволяла перемещать его по вертикали. При этом воду можно было забирать с разных горизонтов малого бассейна, в котором устанавливалась температурная стратификация по глубине. Вода через проем в затворе под действием гидростатического напора заполняла сифонный отсек бассейна. В этой части бассейна с помощью температурных датчиков измерялась температура охлаждаемой воды, которая направлялась на выходной водоспуск. Величина гидростатического напора регулировалась положением открытого конца сливного шланга, соединенного с сифонной емкостью бассейна.

Расходы воды поступающей и отбираемой с модельного бассейна регулировались так, чтобы приток горячей воды соответствовал стоку охлаждаемой воды выходящей из сифонной емкости.

Для измерения температурных профилей по вертикали в разных частях малого бассейна термометрической линейке устанавливались температурные датчики, которые перемещались по горизонтали. Информация, от датчиков, измеряющих температуру, передавалась для дальнейшей обработки и накопления на компьютер. Помимо передвижной термометрической линейки в малом бассейне были установлены пять стационарных термометрических линеек. Они позволяли отслеживать значения температуры на разных уровнях по глубине на всем пути перемещения воды от входа до водоспуска.

В экспериментах с лабораторной моделью водоема-охладителя исследовалось влияние температурной стратификации на степень снижения температуры оборотной воды выходящей из водоема при водозаборе из сифонного отсека с щелевым затвором. Основная серия опытов выполнялась в условиях постоянного поступления и опорожнения модельного бассейна-охладителя и стационарным охлаждением воды в термостатирующем бассейне. Объем воды в бассейне-охладителя обеспечивался постоянным при сохранении глубины воды 0,1 м. Температура заполнения бассейна водой оставалась, как и в прежней серии опытов, равной неизменной 40°C. Скорости подачи и забора воды в бассейн сохранялись равными при расходах $Q_{\text{вход}} = Q_{\text{выход}} = 0,1$ л/с. В термостате вода имела температуру 10° С. Щель затвора в сифоне в процессе опытов изменялась, принимая значения от 0,01 м; до 0,1 м. В процессе экспериментов измерялась температура $T_{\text{вход}}$ на торце шланга подачи воды на поверхность бассейна-охладителя, $T_{\text{выход}}$ на шланге забора воды из сифонного отсека. А также температур расположенных в различных частях бассейна: T_1, T_2 , в бассейне-охладителе на поверхности воды в зоне струнаправляющего канала, T_3 в конце канала далее по всей площади бассейна T_4, T_5, T_6 , в том числе перед сифонным отсеком T_7, T_8, T_9 , и внутри отсека у водозаборного слива T_{10} (рис. 3).

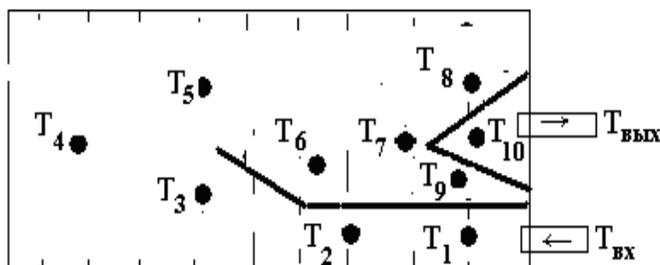


Рис. 3. Схема расположения датчиков температуры в лабораторном бассейне - охладителе с сифонным водозабором.

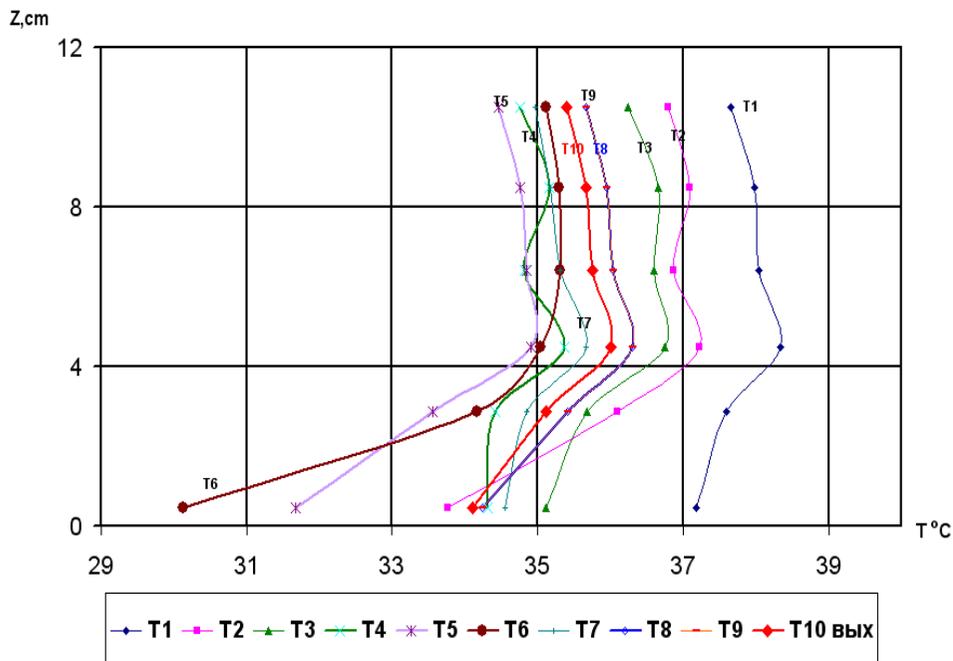


Рис.4. Вертикальные профили температур в различных участках модельного бассейна с горячей, стоячей водой.

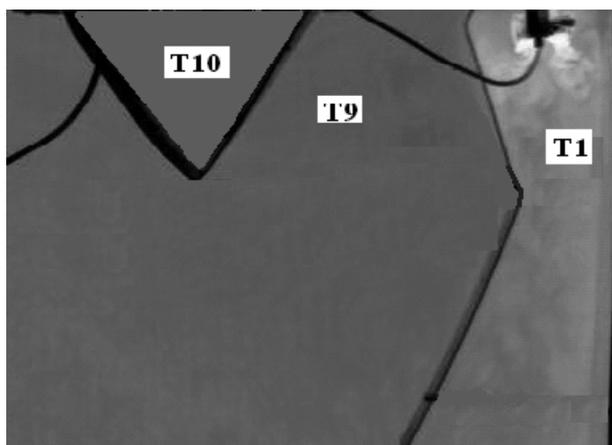


Рис.5. Тепловизионный снимок температурного поля в бассейне с горячей стоячей водой. Окраска светлым тоном соответствует более высокой температуре

В местах расположения обозначенных температурных датчиков тизмерялись также значения температур на различных глубинах. В процессе всех измерений в различные моменты времени фиксировались временные изменения температура воды $T(t)$ в термостатирующей емкости. Измерения проводились дискретно со скважностью через 10с в интервале 5 минут. Картина теплосодержания поверхностного слоя водного зеркала бассейна регистрировалась тепловизором.

В результате обработки данных опытных измерений были получены следующие результаты. При полностью открытом щелевом затворе в статическом состоянии воды бассейна профили температуры по вертикали в местах, обозначенных на рис. 3 свидетельствуют о практически единообразной форме распределения температуры с глубиной (рис. 4). Отмечается некоторая степень неравномерности теплообмена на границе вода-воздух. Участки, удаленные от входа воды в бассейн охлаждались в большей степени за счет более интенсивного испарения и бокового отъема тепла термостатом. При этом внутри сифона и вне его температура практически была одинаковой. Температуры на уровне водоспуска и водозабора отличались незначительно в пределах погрешности измерений. Температурное поле, зафиксированное тепловизором (рис.5) подтверждало этот вывод.

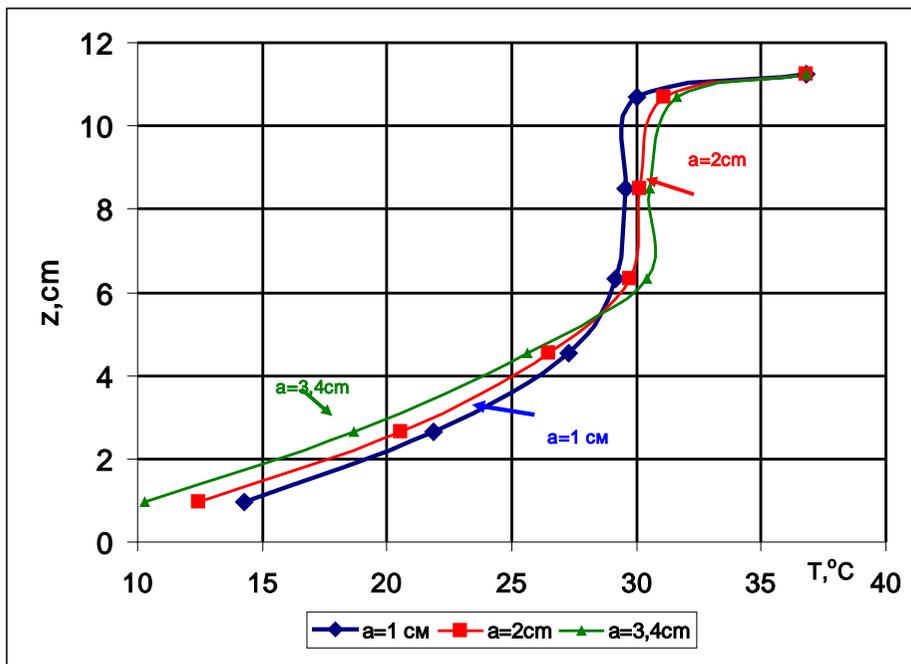


Рис. 6. Вертикальные профили температур внутри сифонного отсека под местом расположения водозаборного шланга при различных высотах открытия щелевого затвора.

В опытах с различной высотой подъема щелевого затвора, открывающего подход к водозабору охлажденной воды, профили температуры с глубиной заметно отличались на участках движения горячей воды в струенаправляющем канале, при подходе к сифону и внутри самого сифона, откуда забиралась охлажденная вода. Представленные на рис 6 вертикальные профили температур иллюстрируют степень различия температурных полей с горячей и холодной водой и размеров деятельного слоя термоклина с разными щелевыми проемами затвора.

Об эффективности забора охлажденной воды с нижних горизонтов бассейна через ограничительный проем щелевого затвора сифонного отсека свидетельствуют итоговые результаты экспериментального моделирования (рис.7).

Наибольшее охлаждение достигается на относительно небольших проемах в щелевом затворе. До нижней границы термоклина эффект снижения температуры оборотной воды устойчиво проявляется. Выполненные в соответствии с уравнением теплового баланса расчеты по методике [9, 10] как следует из рис. 7 находятся в удовлетворительном соответствии с данными наблюдений и подтверждают полученный вывод относительно предельных глубин, выше которых нецелесообразно производить отбор воды из бассейна-охладителя.

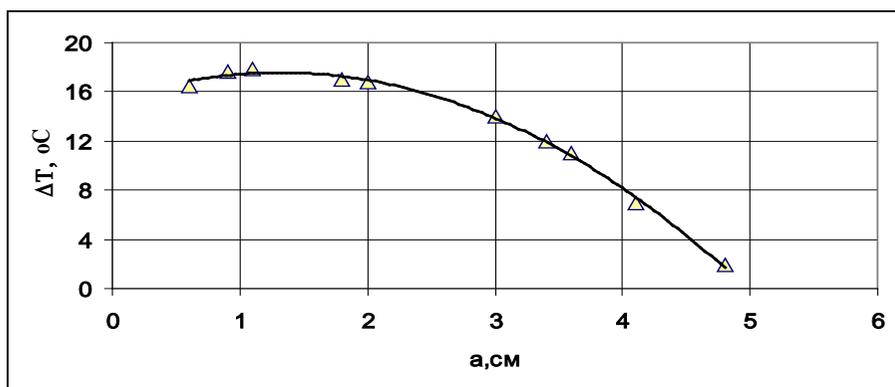


Рис. 7. Зависимость глубины охлаждения оборотной воды от высоты щелевого затвора в сифонном отсеке бассейна-охладителя.

Заключение

Снижение температуры оборотной воды, поступающей в водохранилище для охлаждения по сравнению со штатным режимом, обеспечивает дополнительную выработку электрической энергии. Модельные эксперименты с водоемом-охладителем показали, что предлагаемый вариант регулирования температуры заборной воды с использованием гидротехнических затворов в сифонных отсеках, установленных в выходной части водохранилищ создает реальные условия для оптимизации температурного режима. Использование забора воды с глубинных слоев в случае модельных экспериментов позволяет достигать эффекта охлаждения до нескольких градусов, что дает основание для достижения роста генерации энергии в летнее время года без потерь, связанных с недоохлаждением из-за стратифицированного расслоения воды отбираемой с поверхности водохранилища.

Литература

1. Берман Л.Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды. Л.:1949, С.63-70.
2. Hao-Tzu Lin, Jong-Rong Wang, Kai-Chun Huang, Chunkuan Shih, Show-Chyuan Chiang, Chia-Chuan Liu Issues and future direction of thermal-hydraulics research and development in nuclear power reactors// Nuclear Engineering and Design, 2013, Vol. 264 P. 3-23
3. Sokolov A.S. Effect of hydraulic structures location on cooling capacity of cooling ponds. // Izvestia, В. Е. Vedeneev VNIIG. 2000. Vol. 236. P. 190-195.
4. Прянишников Ф. Д., Бейнер Н. В., Бейнер П. С. Анализ организации движения потока в водоемах охладителях АЭС// Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ, №1, 2014, С.82-88
5. Saha P., Aksan N., Andersen J., Yan J., Simoneau J.P., Leung L., Bertrand F, Aoto K., Kamide H. Issues and future direction of thermal-hydraulics research and development in nuclear power reactors// Nuclear Engineering and Design.2013, Vol. 264, 2013, P. 3-23
6. Антонова Л. Н., Канюк Г. И., Михайский Д. В., Омельченко Л. Н., Фокина А. Р. Натурное исследование водоемов-охладителей // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012, Т. 6, Вып. № 8 (60), С.42-46.
7. Соловьев А.А. Нигматулин Р.И., Чекарев К.В., Малых Ю.Б. Способ охлаждения циркуляционной воды в пруде-охладителе // Патент РФ №2541480, 13.02.2015.
8. Терентьев Н.Н., Шиманский Б.М. Эксплуатация водохранилищ-охладителей электростанций. – М.: ОРГРЭС, 1970.
9. Макаров И. И. Моделирование гидротермических процессов водохранилищ-охладителей ТЭС и АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1986.- 184 с.,
10. Методические указания по технологическим расчетам водоемов-охладителей, РД 153-34.2-21.144-2003, ОАО «ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева», СПб.: 2004.- 55 с.

О ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ МЕХАНИЗМЕ ОБРАЗОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВИХРЯ

А. НЕЧАЕВ, А. СОЛОВЬЕВ

Аннотация. Атмосферный вихрь – один из наиболее очевидных и одновременно с этим наименее изученных, как теоретически, так и экспериментально, природных носителей ветровой энергии. Будучи при этом классическим объектом возобновляемой энергетики, он не мог не вызывать интереса у А.А. Соловьева. Года три назад мы начали вместе с ним готовить первую теоретическую работу, нащупывать пути к объяснению загадочных закономерностей ураганов и торнадо. Надо было видеть, как загорались глаза у Александра Алексеевича, когда мы обсуждали наши предположения! Сделали соответствующую работу, но в последний момент решили опубликовать другую, несколько измененную, в одном европейском журнале. Она вышла в декабре 2019 года. Недавно, у себя в компьютере я нашел тот первоначальный, неопубликованный вариант на русском языке. И я считаю своим долгом предложить его для публикации в этом издании в знак памяти о замечательном ученом Александре Алексеевиче Соловьеве.

Атмосферный вихрь, как природное явление, давно известен. Наиболее грозные его разновидности – такие как торнадо и ураганы – знакомы многим жителям нашей планеты слишком хорошо, так как несут им беды и неприятности. Современные способы фото- и видео-фиксации содержат колоссальную информацию об атмосферных вихрях от самых крохотных и безобидных пылевых «дьяволов» до смертельных торнадо, уничтожающих все на своем пути, и ураганов, заливающих дождем громадные территории. Немало научных работ в сфере метеорологии и физики атмосферы посвящено вихрям, эмпирические закономерности их поведения достаточно хорошо установлены и описаны [1]. Что касается теоретических работ, то наиболее цитируемые из них [2-4] уподобляют атмосферный вихрь тепловой машине Карно, выводя условие его формирования из термодинамических соотношений и интегральных законов сохранения энергии, массы, момента количества движения. Между тем, атмосферный вихрь – принципиально незамкнутая гидродинамическая система, к которой законы сохранения не всегда применимы. В любом случае, физически ясный и простой механизм формирования атмосферного вихря, к сожалению, отсутствует.

Желание найти и понять некий «универсальный» механизм формирования атмосферного вихря крепнет, когда становится очевидным, что практически все природные вихри, независимо от их масштаба, имеют немало общих свойств. К основным относятся следующие:

1. Нижняя часть оси атмосферного вихря, вокруг которой вращается воздух, находится всегда в минимуме атмосферного давления;
2. Воздух в вихре движется по восходящей спирали, снизу вверх;
3. Интенсификация вихря сопровождается ускорением вращения воздуха и падением давления в центре;

4. Зарождение природного вихря может происходить в относительно спокойной атмосфере.

5. Атмосферный вихрь формируется в земной атмосфере, которая является баротропной: плотность воздуха в ней зависит от давления и обычно уменьшается с высотой.

В данной работе мы попытаемся предложить и проанализировать некие гидродинамические факторы, способные привести к формированию в земной атмосфере устойчивых зон пониженного давления, внутри и вокруг которых происходит восходящее движение воздуха.

Продедаем вначале мысленный эксперимент, описанный в работе [5]. Вообразим трубу с расширением и текущую по трубе жидкость, которая в месте расширения меняет свою плотность с ρ_1 на ρ_2 : $\rho_2 < \rho_1$. Расширение выбрано специальным образом так, чтобы обеспечить постоянство скорости V , исходя из условия сохранения массы: $\rho v S = const$, где S - сечение трубы.

Таким образом, сечение трубы как бы «отслеживает» плотность жидкости, сохраняя скорость течения постоянной, поскольку $\rho S = const$.

Запишем уравнение Бернулли для одномерного течения жидкости вдоль линии тока с координатой S . Будем исходить из обобщенной формы второго закона Ньютона для жидкости с переменной плотностью (в отсутствие массовых сил):

$$\frac{D(\rho v)}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial s} - F_{fr}(v), \quad (1)$$

где p - давление внутри жидкости, v - линейная скорость ($v = \frac{\partial s}{\partial t}$), F_{fr} - сила трения, действующая на частицу жидкости. Давление на концах трубы p_0 и p_2 поддерживается постоянным. Раскрывая знак дифференциала и переходя к стационарному состоянию ($\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} = 0$), мы можем записать:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial s} v = -\frac{\partial p}{\partial s} - F_{fr}(v) \quad (2)$$

Для первого участка длиной L_1 , где давление падает от p_0 до p_1 , а скорость нарастает от 0 до v и $\rho = \rho_1 = const$, интегрирование (2) по s дает стандартное уравнение Бернулли с трением:

$$p_0 - p_1 = \frac{\rho_1 v^2}{2} + \bar{F}_{fr1}(v)L_1, \quad (3)$$

где $\bar{F}_{fr1}(v)L_1 = \int_0^1 F_{fr1}(v) ds$ - интегральные затраты на трение на первом участ-

ке. Соответственно на втором участке длиной L_2 , где плотность уменьшается, а скорость остается постоянной, имеем:

$$p_1 - p_2 = (\rho_2 - \rho_1)v^2 + \bar{F}_{fr2}(v)L_2 \quad (4)$$

Из (4) сразу следует, что провала давления не будет ($p_1 \geq p_2$), если трение на втором участке достаточно велико. Из уравнений (3) и (4) получаем оценку «дна» падения давления p_1

$$p_1 = \frac{p_0 + p_2}{2} - \left(\frac{3\rho_1}{2} - \rho_2\right)\frac{v^2}{2} + \frac{1}{2}(\bar{F}_{fr1}L_1 - \bar{F}_{fr2}L_2) \quad (5)$$

Таким образом, для потока жидкости с переменной плотностью можно ожидать появления зоны пониженного давления в тех местах, где плотность начинает уменьшаться. Это падение давления тем больше, чем больше разность плотностей и скорость течения жидкости.

Если пренебречь силами трения, то можно показать, что описанная нами система обладает неустойчивостью с положительной обратной связью между скоростью течения и провалом давления. Действительно, из уравнений (3) и (4) следует, что увеличение провала давления на втором участке (то есть уменьшение давления p_1) ведет к увеличению скорости течения на первом участке в соответствии с (3), а рост скорости должен уменьшить p_1 в соответствии с (4) и т.д. Очевидное условие, необходимое для этого, таково: $(\rho_1 - \rho_2)v^2 > \frac{\rho_1 v^2}{2}$ или

$$\rho_2 < \frac{\rho_1}{2}. \quad (6)$$

Однако, скорость не будет увеличиваться бесконечно, и давление p_1 не упадет до нуля. Этому помешают силы трения, которыми мы для наглядности пренебрегли. Действительно, силы трения F_{fr} увеличиваются с ростом скорости и, как следует из (4), трение на втором участке будет уменьшать провал давления, что должно стабилизировать ситуацию. Знание зависимостей $F_{fr}(v)$, позволяет решить уравнения (3) и (4) и получить однозначную величину скорости течения v и давления p_1 при заданных ρ_1, ρ_2 .

Критерий неустойчивости (6) кажется чересчур простым, однако в реальности он должен быть скорректирован, поскольку в нем заложено постоянство скорости и при его выводе не учитывались силы трения. Однако, принципиальная сторона механизма неустойчивости не исчезает, поскольку к провалу давления ведет фундаментальное уменьшение количества движения ρv из-за уменьшения плотности, и оно должно быть скомпенсировано силами давления в соответствии с законами гидродинамики.

Прежде чем применить результаты, полученные нами выше, к свободной атмосфере, кратко обсудим возможные механизмы восходящих движений воздуха. Хорошо известно, что вертикальные потоки воздуха, как восходящие, так и нисходящие, являются одной из главных движущих сил формирования погоды и климата на Земле. Интенсивный и локальный подъем влажного воздуха способствует образованию грозных фронтов, линий шквалов и смерчевых облаков. Существенно более слабые, но продолжительные и масштабные восходящие движения воздуха в кластерах над теплым океаном заканчиваются при определенных условиях формированием тропических штормов и ураганов.

Существует очевидная, но не всегда осознаваемая особенность поведения объемов воздуха, находящихся внутри атмосферы. Вес этих объемов сбалансирован выталкивающей силой, и при равенстве температур они находятся в безразличном равновесии. Прандтль в своей знаменитой работе [6] писал об избыточном давлении, возникающем в жидкости вследствие ее движения. Это давление «...распределяется в жидкости так, как если бы она была невесомой и обладала только инертной массой... Каждая частица весомой жидкости как бы висит в потоке под действием поддерживающих сил окружающих частиц». Любая, малейшая, сила, приложенная к объему в вертикальном направлении (неважно – вверх или вниз), приводит его в движение так же, как если бы эта сила была приложена горизонтально. Гравитационная сила сбалансирована вертикальным градиентом гидростатического давления, и воздушный шарик, наполненный комнатным воздухом, в равной степени легко движется как в сторону, так и к потолку.

Поэтому, рассматривая движение воздуха, направленное вертикально вверх, можно «забыть» о весе воздуха, так как он скомпенсирован архимедовой силой, и полагать, что изначальное давление на всех высотах «условно» одинаково и равно некоторому опорному \bar{p} . А начало движения вызвано первичным избыточным давлением. Для нас важно, что существует некая сила, способная заставить воздух двигаться вверх, в зону, где плотность воздуха значительно меньше. Источником подобной силы может стать торможение воздушных потоков вследствие различных причин. При уменьшении скорости потока V до нуля в зоне столкновения с неподвижной поверхностью в так называемой критической точке давление увеличивается на величину $\rho v^2 / 2$. Это избыточное давление либо останавливает поток, либо заставляет его изменить свое направление в соответствии с окружающими условиями. В свободной атмосфере подобная ситуация может возникнуть, например, если сталкиваются встречные потоки. В этом случае неизбежно взаимное торможение обоих потоков с образованием зоны избыточного давления, которое вынуждает воздух двигаться в вертикальном направлении. Столкновение встречных потоков имеет место и в случае движения воздушных масс внутрь зоны пониженного давления, которая может образоваться вблизи поверхности Земли вследствие гидростатических причин. Так, например, характерный провал давления в центре торнадо обуславливает мощные центростремительные потоки, которые взаимно тормозятся и легко уходят вверх, поскольку для них это единственное свободное направление, а вес воздуха, как отмечалось выше, подъему не мешает.

Провал давления в потоке жидкости при ее течении в трубе в нашем мысленном эксперименте был обусловлен искусственным уменьшением плотности и со-

ответствующим расширением трубы для сохранения постоянной скорости течения. Нам представляется, что в земной атмосфере существует аналогичный механизм естественного происхождения: это конденсация водяного пара в потоке поднимающегося воздуха. Действительно, при конденсации водяного пара выделяется тепло, которое определяется скрытой теплотой конденсации и влажностью воздуха. Если это тепло превосходит адиабатическое охлаждение воздуха (10 градусов на 1км подъема), то частица воздуха приобретает нагрев ΔT , который в соответствии с уравнением состояния газа, уменьшает ее плотность на величину

$$\Delta \rho = -\frac{p \Delta T}{RT^2}, \text{ где } p - \text{давление на данной высоте, } T - \text{температура воздуха, } R -$$

универсальная газовая постоянная. Если плотность воздуха в струе уменьшается, то пропорционально увеличивается объем и сечение воздушной струи (струя расширяется), что может приводить к постоянству скорости воздуха в струе аналогично рассмотренному выше мысленному эксперименту. В подтверждение данного предположения можно упомянуть известный факт сохранения до очень больших высот почти постоянных значений тангенциальной скорости воздушных струй, поднимающихся в стене глаза урагана [7].

Таким образом, струя влажного воздуха (если она поднимается на большую высоту и движется под напором, а не вследствие плавучести) может вести себя аналогично потоку жидкости в нашей расширяющейся трубе (рис.1), причем точка 0 обозначает место где струя под действием избыточного давления поворачивает вверх (p_0 - соответствует величине избыточного давления), точка 1 – это уровень конденсации в атмосфере, где начинается уменьшение плотности воздуха, точка 2 – высота, на которой заканчивается подъем струи. Провал давления в соответствии с нашим механизмом должен наблюдаться на уровне конденсации, когда плотность воздуха в верхней части струи становится меньше, чем плотность приземного воздуха.

Таким образом, с гидродинамической точки зрения, формирование атмосферного вихря может произойти, когда созданы условия для напорного подъема воздушной массы (струи) в верхние слои атмосферы, где плотность воздуха уменьшается в соответствии с уравнением состояния. Конденсация водяного пара приводит к дополнительному уменьшению плотности. Интенсификацию вихря можно ожидать, когда плотность воздуха струи при ее подъеме снизится как минимум вдвое.

Приняв теоретические результаты за ориентир, попытаемся дать интерпретацию некоторых эмпирических данных по реальным атмосферным вихрям. Для этого используем упрощенную отсутствием трения формулу (4), связывающую провал давления в вихре Δp с перепадом плотности воздуха в струе и с ее скоростью V :

$$\Delta p = v^2 \Delta \rho \tag{7}$$

где $\Delta \rho$ - разница между плотностью воздуха на входе в вихрь и там, где струя прекращает свое существование.

Проще всего объяснить формирование смерчей во время крупных лесных пожаров или вулканических извержений. Действительно, столб раскаленного воздуха с температурой выше 600 К (при такой температуре плотность воздуха

уменьшается в 2 раза) удовлетворяет критерию (6) и создает под собой первичный провал гидростатического давления (пусть небольшой), который «втягивает» внутрь столба холодный и «плотный» окружающий воздух, фактически моделируя условия нашего мысленного эксперимента.

Происхождение пылевого «дьявола» тоже может быть обусловлено нагревом воздуха. В пустынных районах, где «дьяволы» обычно образуются, локальный нагрев приземного воздуха до температур 50-60 °С – обычное дело. Если воздух с такой температурой образовал слой, висящий или плывущий над землей, то в нем плотность воздуха будет на $\Delta\rho = \rho \frac{\Delta T}{T} \approx 0,2 \text{ kg/m}^3$ меньше, чем плотность окружающего воздуха.

Если ветровая струя со скоростью 10-20 м/с попадает в такой «горячий» слой, то на «холодном» конце струи будет в соответствии с (7) провал давления 0,2 – 0,8 мБ, что типично для небольших «дьяволов».

В мощных ураганах струи влажного воздуха поднимаются по спирали на высоты 10-12 км, сохраняя очень высокую скорость, до 50-60 м/с. Разница $\Delta\rho$ при этом может достигать 0,8-1,0 кг/м³. Например, у урагана Инез (1966) зарегистрированная максимальная скорость ветра v_m была равна 80 м/с [7]. Формула (7) дает нам оценку провала давления в стене глаза (а не в центре глаза урагана) - там, где начинается свой подъем воздушная струя: 51-64 мБ. Чтобы оценить провал давления в центре глаза урагана, к указанной величине следует добавить величину $\rho v_m^2 / 2$. Именно настолько падает давление в центре вращающегося воздушного «диска»: «твердотельное» вращение глаза урагана с угловой скоростью v_m / R_m , (где R_m - радиус максимального ветра) хорошо установлено. Следовательно, средний суммарный провал давления в центре урагана Инез составит около 92 мБ (плотность воздуха в области РМВ принята равной 1,1 кг/м³), что практически точно соответствует реально зафиксированному минимальному давлению в 927 мБ (927+92=1019 мБ) [7].

С самого начала целенаправленных исследований тропических циклонов перед учеными стояла задача получить соотношение между максимальными скоростями ветра и минимальным значением атмосферного давления. Это соотношение было установлено, главным образом, эмпирическим путем в виде степенной зависимости $v_m = C(\Delta p)^n$, где $n < 1$ [8,9]. Наиболее удачной в настоящее время считается формула, приписываемая Willoughby [10]:

$$v_m = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{1}{\rho} (p_\infty - p_c)} \quad (8)$$

где p_∞ и p_c - давление за пределами урагана и в его центре соответственно.

Наши теоретические предположения дают следующую формулу:

$$(\rho_1 - \rho_2)v_m^2 + \rho_1 v_m^2 / 2 = p_\infty - p_c, \quad (9)$$

Которая практически совпадает с (8), если принять $\rho_2 \ll \rho_1$, что характерно для ураганов, у которых воздушные струи поднимаются на высоту не менее 10 км.

Торнадо – одна из наиболее впечатляющих разновидностей атмосферного вихря. Оно, в отличие от урагана, доступно наблюдению невооруженным глазом. Провалы давления и скорость ветра в мощных торнадо, как правило, превышают аналогичные параметры для ураганов. И здесь в связи с предложенным механизмом возникают новые вопросы, на которые пока нет ответа. Во-первых, на передний план выходит воздушная среда, где должен действовать закон идеального газа, связывающий давление газа и его плотность. Если воздушная струя соединила области с разной плотностью воздуха и в ней произошло падение давления, то в этом месте должна уменьшиться плотность воздуха. Соответственно, появляется дополнительный механизм положительной обратной связи, который может усилить процесс падения давления в воздушной среде. Возможно, этим можно объяснить известное опускание воронки торнадо к земле и распространение вращения на приземную область. Во-вторых, зарождение торнадо и подобных ему водяных смерчей начинается с подъема воздуха внутри центрального ядра [11]. Этот факт хорошо согласуется с нашей теорией, потому что струя в центральном ядре эффективно соединяет слои атмосферы с разной плотностью воздуха. Единая гидродинамическая струя позволяет объяснить часто наблюдаемую причудливую форму торнадо, его изогнутый тонкий «хобот», касающийся земли и вращающийся с большой скоростью. Для нашего механизма не нужна вертикальность. Он не гидростатический. Струя, то есть линия тока, может иметь любую форму: важно, чтобы она не имела разрывов и чтобы соединяла область с высокой плотностью воздуха (поверхность Земли) с областью, где плотность воздуха мала (верхние слои атмосферы).

В различных экспериментальных моделях, имитирующих торнадоподобный вихрь (многочисленных на youtube.com), используется вертикальная воздушная тяга с помощью вентилятора, либо центростремительное нагнетание воздуха с помощью вентиляторов, расположенных по окружности (генерация так называемых огненных торнадо). Появление вихрей в относительно спокойной атмосфере было обнаружено в экспериментальной работе [12] еще в 1973 году. В этом эксперименте нагрев горизонтальной поверхности за счет фотографических ламп накаливания создавал вертикальный конвекционный поток, в который сбоку втягивался воздух, охлажденный с помощью сухого льда. В возникавших вихрях, визуализированных парами сухого льда, очевидно, имелись потоки с резким перепадом плотности воздуха при его переходе из холодной зоны сухого льда в зону нагрева лампами накаливания.

Литература

1. SuperstormEncyclopedia: Tornadoes, SevereThunderstorms, Hurricanes, TropicalStorms, Typhoons, Cyclones ... Progressive Management, 2011
2. K.A.Emanuel. An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady-state maintenance. *J. Atmos.Sci.* 1986; 43:585-604
3. N.O.Renno, M.L.Barkett, and M.P.Larkin. A simple thermodynamical theory for dust devils. *J. Atmos.Sci.* 1998; 55:3244-3252
4. N.O.Renno, H.B.Bluestein. A simple theory for waterspouts. . *J. Atmos.Sci.* 2001; 58:927-932

5. A.M.Nechayev. On the Bernoulli Equation in the Free Atmosphere and Mechanism of Long-lived Vortex Formation. *Physical Science International Journal*, 2016; 11(4): 1-6
6. L.Prandtl. *Essentials of Fluid Dynamics*. Blackie & Son, London, 1952.
7. H.F.Hawkins, S.M.Imbembo. The Structure of a Small, Intense Hurricane – Inez 1966. *Monthly Weather Review*, 1976; 104:418-442
8. G.Holland. A revised Hurricane Pressure-Wind Model. *Monthly Weather Review*, 2007, 136: 3432-3436
9. J.Knaff, R.Zehr. Reexamination of Tropical Cyclone Wind-Pressure Relationships. *Weather and Forecasting*, 2007, v.22: p.71-88
10. C.Landsea. Hurricane Structure: Theory and Diagnosis. *World meteorological Organization Workshop*, 6 march, 2017
11. V.H.Leverson, P.C.Sinclair, J.H.Golden. Waterspout Wind, Temperature and Pressure Structure Deduced from Aircraft Measurements. *Monthly Weather Review*, 1977; 105:725-733
12. T.Yamazaki. A Laboratory Experiment on Composite Tornado-like Vortices Formed by the Interaction of Horizontal Shear and Vertical Instability. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University, Japan, Ser.VII, Vol.IV, n2, 1973*

ПАРУСНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

ЧЕКАРЕВ К.В., ЗАЛИХАНОВ А.М., ДЕГТЯРЕВ К.С.

Аннотация. Установки, преобразующие кинетическую энергию ветра в электричество, в том числе плавающие ветровые установки, из-за низкой плотности воздуха имеют большие размеры. Предложен вариант парусной энергетической установки, преобразующей энергию ветрового потока в энергию водного потока, который используется для производства электричества, что позволяет уменьшить размеры преобразователя энергии. Создан макет парусной энергетической установки, выполненный в виде катамарана, симметричного относительно носа и кормы, который совершает циклические движения по дуге окружности в заданном угловом интервале с точками поворота, симметричными относительно направления ветра. Лабораторные исследования показали принципиальную возможность создания подобной энергетической установки, однако для ее реализации необходимо решить ряд задач. Некоторые из этих задач были решены в ходе серии экспериментов, в частности, была рассмотрена проблема увеличения скорости катамарана за счет увеличения площади парусов и уменьшения веса катамарана. Была также создана система автоматического определения на траектории катамарана точек изменения направления движения, а также система автоматического изменения положения парусов катамарана. Для реализации предлагаемой парусной энергетической установки была предложена усовершенствованная конструкция, позволяющая их сборку и эксплуатацию. Результаты проведенных экспериментов по исследованию возможности реализации парусных энергетических установок представлено в данной статье.

Введение

Ветроэнергетика является одной из самых быстро развивающихся отраслей возобновляемой энергетики. По оценкам The Global Wind Energy Council (GWEC) мощность ветровых установок в 2019 году увеличилась на 60,4 ГВт, или на 19% по сравнению с 2018 годом [1]. Десятая часть этого роста - 6,1 ГВт, - приходится на оффшорные ветровые установки. Общая установленная мощность ветроэнергетики в мире составляет 651 ГВт, а установленная мощность оффшорных станций достигла 29 ГВт. Одной из причин, ограничивающей рост оффшорных станций является их зависимость от глубины моря. Установка оффшорных станций становится слишком дорогой на глубинах свыше 50 метров. Для уменьшения этой зависимости разработаны плавающие ветровые установки. Первая плавающая ветровая установка была запущена у берегов Норвегии в 2009 году, затем плавающие ветровые установки были построены во многих странах [2, 3].

Во всех действующих установках преобразование энергии ветрового потока в электричество осуществляется с помощью ветрового колеса, соединенного с электрогенератором, которые устанавливаются на высокой мачте. Из-за низкой плотности воздуха диаметр ветрового колеса и высота мачт ветровых установок превышает 100 метров. На плавающих ветровых установках, для обеспечения их устойчивости мачты, устанавливаются на платформе, оборудованной вертикальными колоннами со статическим и динамическим балластом, что приводит к удорожанию конструкции.

Был предложен вариант установки, позволяющей уменьшить размер преобразователя энергии плавающей энергетической установки [4]. Решить данную задачу помогает факт нахождения плавающей установки в двух средах - воздушной и водной, плотность которой примерно в тысячу раз больше воздушной. Если кинетическую энергию воздушного потока преобразовать в кинетическую энергию водного потока, то размеры преобразователя этой энергии можно существенно уменьшить. Такое преобразование можно осуществить с помощью парусной энергетической установки. Предложенный вариант установки содержит парусный катамаран, к корпусам которого снизу прикреплен гидрогенератор, выполненный в виде винта и электрогенератора. При движении катамарана возникает обтекающий его корпус водный поток, который вращает винт и соединенный с ним электрогенератор. Для передачи вырабатываемой энергии потребителю гидрогенератор соединяется с помощью электрического кабеля с бумом, закрепленным на морском дне в том месте, куда проведены электрический кабель от потребителя вырабатываемой гидрогенератором электроэнергии. Траектория движения катамарана вокруг буя может быть представлена в виде равностороннего треугольника, одна из сторон которого перпендикулярна направлению ветра. Предполагается определять траекторию движения катамарана автоматически, однако при сильном ветре организация такого движения является сложной задачей. Автоматическое управление следует сделать максимально простым и обеспечивающим надежность работы установки.

Было высказано предположение, что надежное автоматическое управление можно реализовать, если траекторию движения катамарана организовать так, чтобы он совершал циклические движения по дуге окружности в заданном угловом интервале с точками поворота, расположенными симметрично относительно направления ветра. В этом случае управление его движением сводилось бы к автома-

тическому определению точек на траектории для изменения направления движения катамарана и автоматическому изменению положения парусов. Однако для такого движения катамаран должен иметь специальную конструкцию, а именно, он должен быть симметричным относительно носа и кормы. Для проверки возможности реализации предлагаемой конструкции была создана экспериментальная установка, на которой были проведены исследования [5]. Эксперименты показали принципиальную возможность создания парусной энергетической установки в виде симметричного относительно носа и кормы катамарана, однако для ее реализации необходимо решить ряд задач, в частности, задачу увеличения скорости. При увеличении скорости увеличивается скорость водного потока, вращающего крыльчатку установленного на парусном судне гидрогенератора, что приводит к повышению электрической мощности, вырабатываемой гидрогенератором.

Кроме проблемы увеличения скорости парусных энергетических установок, для их реализации была исследована возможность создания систем автоматического управления их движением по дуговой траектории, а также разработана конструкция, упрощающая сборку и эксплуатацию парусных энергетических установок. Возможные варианты решения этих проблем исследовались на макетах парусных энергетических установок на специально созданной экспериментальной установке.

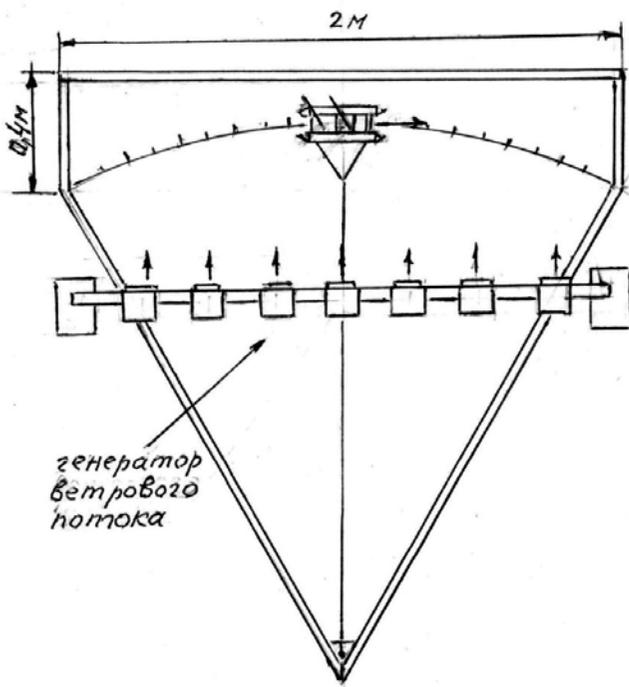


Рис. 1. Схема экспериментального бассейна.

Экспериментальная установка и методика проведения исследований

Экспериментальная установка включала экспериментальный бассейн, в котором проводились исследования, генератор ветрового потока и различные варианты макетов парусной энергетической установки разного водоизмещения и с разной площадью парусов.

Экспериментальный бассейн, схема которого приведена на рис. 1, выполнен в виде равностороннего треугольника с длиной стороны 2 метра.

Одна из его сторон представляет прямоугольник, ширина которого составляла 40 см. Высота стенок бассейна была равна 8 см. В качестве герметического материала при заполнении бассейна водой использовалась полиэтиленовая пленка толщиной 200 микрон. На дне экспериментального бассейна в области прямоугольника под пленкой находились листы бумаги, на которых была нарисована траектория движения катамарана, представляющую дугу окружности радиусом два метра с центром в дальнем от прямоугольника углу бассейна. В этом углу располагалась крепежное устройство для лески, толщиной 0,3 мм, имитирующей кабель-трос, присоединяющий в реальном масштабе гидрогенератор катамарана к месту крепления на морском дне, куда подведен кабель от потребителя вырабатываемой гидрогенератором электроэнергии.

Над экспериментальным бассейном располагался генератор ветрового потока. Он был выполнен в виде системы вытяжных вентиляторов в количестве 8 штук, расположенных на рейке длиной 2 метра на расстоянии 22 см друг от друга. Концы рейки закреплены на стойках высотой 22 см. Конструкция генератора ветрового потока была разработана на основе полученной трехмерной картины ветрового поля отдельного вентилятора, представленной на рис. 2.

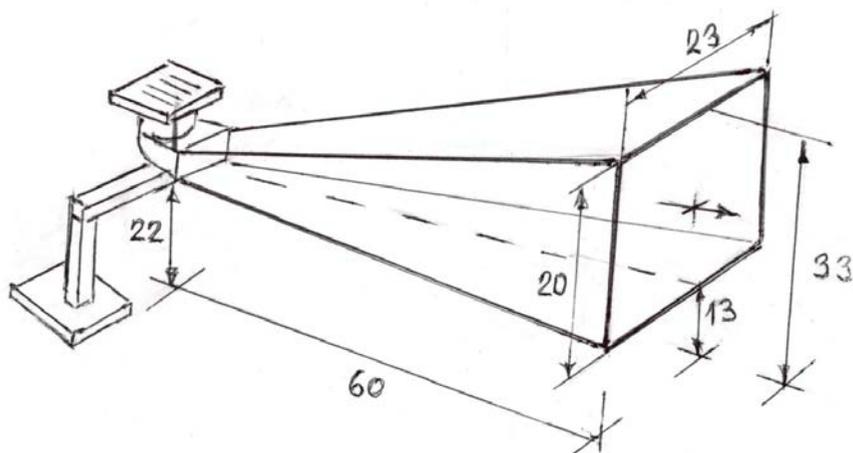


Рис. 2. Трехмерная картина ветрового поля вытяжного вентилятора.

Высота стоек генератора ветрового потока определялась так, чтобы на расстоянии 60 см от выходных отверстий генератора ветрового потока нижняя граница ветрового потока совпадала с нижней кромкой парусов катамарана при его

движении по дуговой траектории. Скорость ветра на этом расстоянии равнялась 3,6 м/с.

Результаты экспериментов и их обсуждение.

Для решения проблем, связанных с возможностью реализации парусных энергетических установок, было проведено три серии экспериментов

Первая серия экспериментов.

В первой серии экспериментов определялись пути увеличения скорости парусных энергетических установок.

Макеты парусной энергетической установки были выполнены в виде симметричной относительно носа и кормы конструкции катамарана. Корпуса катамаранов первого и второго варианта выполнены из пластикового короба прямоугольного сечения со сторонами 2,5 см и 4 см. Длина корпусов катамарана без конусов на его концах составляла 30 см, ширина 14,5 см. На катамаране 1 было установлено две мачты, а на катамаране 2 три мачты. К каждой из мачт был прикреплен кривой парус площадью 215 см², сделанный из лавсановой пленки с металлическим покрытием. Площадь парусов катамаранов 1 и 2 составляла, соответственно, 430 см² и 645 см², а их водоизмещение было равно 420 см³.

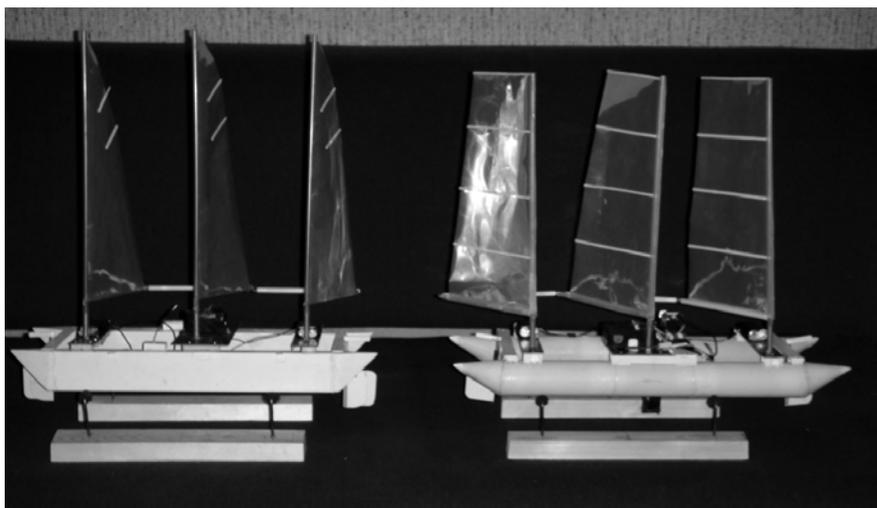


Рис.3. Изображения второго и третьего варианта макета парусной энергетической установки: катамаран 2 слева, катамаран 3 справа.

Корпуса катамаранов третьего и четвертого варианта макета парусной энергетической установки были выполнены из легкой пластиковой трубки диаметром 3,6 см. Длина его корпусов без конусов на его концах составляла 32 см, расстояние между центрами корпусов 14 см. На катамаране 3 было установлено три мачты, а на катамаране 4 – четыре мачты. К каждой из мачт были прикреплены паруса площадью 294 см². Форма парусов на катамаранах 3 и 4 отличалась от формы па-

русов на катамаранах 1 и 2 а их площадь составляла, соответственно, 882 см^2 и 1176 см^2 . Водоизмещение катамаранов 3 и 4 было равно 280 см^3 . Изображения второго и третьего варианта макета парусной энергетической установки представлены на рис. 3.

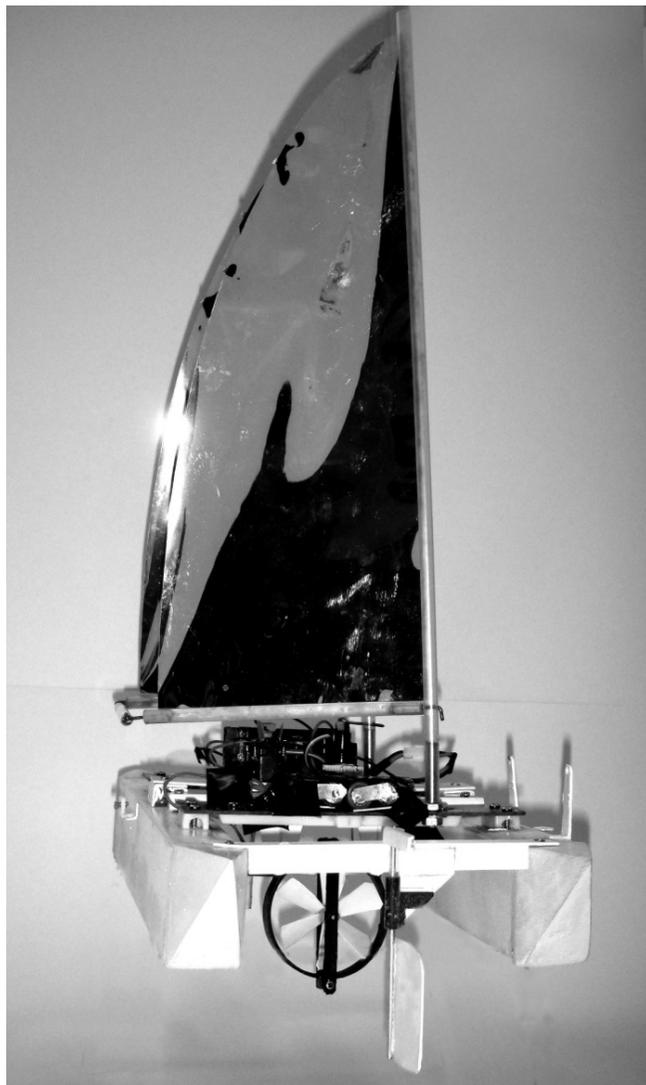


Рис. 4. Схема крепления крыльчатки гидрогенератора к корпусам катамарана.

На всех типах катамаранов было установлено поворотное устройство, с помощью которого мачты, и прикрепленные к ним паруса могли одновременно поворачиваться на угол приблизительно 90 градусов. Поворот осуществляется дистанционно по сигналу с пульта управления. На каждом конце катамарана посередине имелось рулевое устройство с изменяемым углом поворота пера руля. Снизу к корпусам катамаранов крепилась крыльчатка гидрогенератора диаметром 4,6 см, как показано на Рис. 4.

В начале эксперимента катамаран соединялся с удерживающей леской и включался генератор ветрового потока, после чего катамаран устанавливался на траекторию и начинал двигаться. В точках поворота дистанционно с помощью пульта управления подавался сигнал изменения положения парусов, и катамаран начинал двигаться в обратную сторону. В ходе экспериментов движение катамарана снималось на камеру, установленную на высоте 1.5 м над траекторией движения катамарана. По полученным записям движения катамарана по траектории строились графики движения катамарана в зависимости от времени, по которым определялась его скорость.

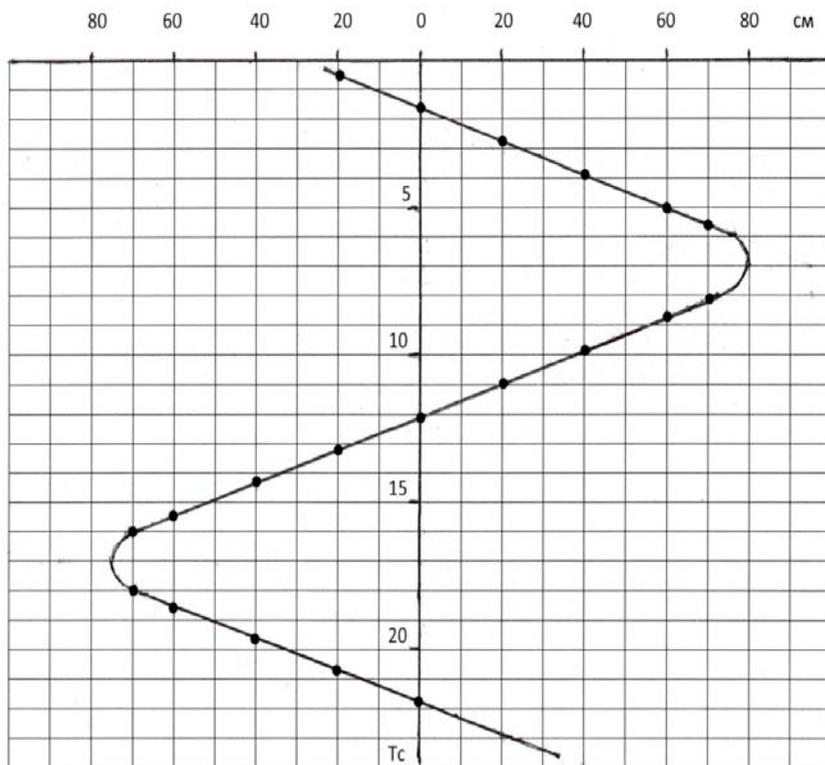


Рис. 5. График движения катамарана 3 с гидрогенератором.

Для того, чтобы выяснить, какое влияние оказывает гидрогенератор на скорость движения катамаранов, проводилось исследование движений катамаранов с гидрогенератором и без гидрогенератора. По полученным записям строились графики движения катамаранов в зависимости от времени, по которым определялась их скорость. График движения катамарана 3 с гидрогенератором представлен на Рис. 5.

Данные о средней скорости движения катамаранов в экспериментах представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Данные о средней скорости катамаранов при движении с гидрогенератором и без гидрогенератора.

Тип катамарана	катамаран 1	катамаран 2	катамаран 3	катамаран 4
Скорость см/с с гидрогенератором	7,7	13,8	18,2	21,0
Скорость см/с без гидрогенератора	12,5	17,5	23,8	27,1
Соотношение скоростей	1.6	1,3	1,3	1,3

Приведенные в таблице 1 скорости катамаранов можно представить в виде функциональной зависимости, введенной на основе учета сил, определяющих скорость его движения. Скорость движения катамаранов определяется силой взаимодействия воздушного потока с установленными на катамаране парусами, и силой взаимодействия водного потока с корпусами катамарана. Катамаран движется по дуговой траектории в некотором угловом интервале с точками поворота, расположенными симметрично относительно направления ветра. В некотором угловом интервале положение парусов по отношению к направлению ветра меняется не сильно, поэтому силу ветра, действующую на катамаран и его скорость можно считать постоянными. При равномерном движении силы воздействия на катамаран воздушного и водного потоков равны и направлены в противоположные стороны. Сила воздушного потока F_1 пропорциональна площади парусов Q , а сила воздействия водного потока пропорциональна произведению квадрата скорости катамарана V^2 на площадь сечения S , перпендикулярную водному потоку, которую образуют корпус катамаранов. Равенство сил можно выразить следующим образом

$$k_1 Q = k_2 V^2 S \text{ откуда}$$

$$V = A\sqrt{D} \text{ где } D = Q/S$$

Соотношение $D = Q/S$ показывает, какая величина площади катамарана приходится на единицу площади сечения, препятствующему его движению со стороны водного потока. Размерность A см/с, для силы ветра 3,6 м/с $A = 2,3$ см/с.

При движении катамарана без гидрогенератора площадь сечения S_1 равна миделевому сечению, которое находится из соотношения

$$L \times S_1 = V_b$$

где L – длина корпусов катамарана

V_a – объем вытесненной катамараном воды, равный весу катамарана (объемное водоизмещение)

При движении катамарана с гидрогенератором для нахождения сечения S_2 нужно к площади сечения S_1 прибавить площадь сечения гидрогенератора или опделить значение S_2 экспериментально. Это можно сделать учитывая, что при движении катамарана с гидрогенератором и без гидрогенератора с одной и той же площадью парусов, силы сопротивления в обоих случаях равны, но отличаются произведением площади сечения сопротивления на квадрат скорости, т.е.

$$S_1 V_1^2 = S_2 V_2^2 \text{ откуда } S_2 = S_1 (V_1/V_2)^2$$

где соотношение V_1/V_2 можно получить из экспериментов и использовать в расчетах.

В таблицах 2 и 3 приводятся данные, позволяющие представить скорость движения катамаранов как функцию соотношения D при их движении по траектории с гидрогенератором и без гидрогенератора.

Таблица 2.

Данные о катамаранах при их движении по траектории без гидрогенератора.

Тип катамарана	катамаран 1	катамаран 2	катамаран 3	катамаран 4
Площадь парусов Q , см ²	430	645	882	1176
Водоизмещение, см ³	420	420	280	280
Площадь сечения S_1 , см ²	14	14	8,75	8,75
Соотношение $D = Q/S_1$	31	46	101	134
Скорость без Гидрогенератора, см/с	12,5	17,5	23,8	27,1

Таблица 3.

Данные о катамаранах при их движении по траектории с гидрогенератором

Тип катамарана	катамаран 1	катамаран 2	катамаран 3	катамаран 4
Площадь парусов Q , см ²	430	645	882	1176
Водоизмещение, см ³	420	420	280	280
Площадь сечения S_2 , см ²	35,8	23,6	14,7	14,7
Соотношение $D = Q/S_2$	12	27	60	80
Скорость с гидрогенератором, см/с	7,7	13,8	18,2	21,0

Приведенные в таблицах 2 и 3 данные о скоростях катамаранов всех типов при их движении с гидрогенератором и без гидрогенератора представлены на Рис. 6 на графике функции $V = A\sqrt{D}$, где $D=Q/S$, Q - площадь парусов, а S - площадь сечения сопротивления водного потока. Размерность коэффициента A см/с, для скорости ветра 3,6 м/с $A=2,3$ см/с.

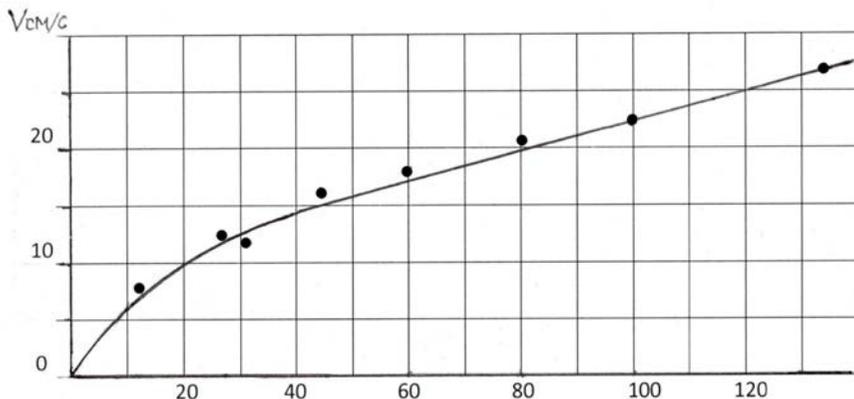


Рис.6. График скоростей всех типов катамаранов при их движении с гидрогенератором и без генератора как функция D .

Проведенные эксперименты показали, что можно повысить скорость движения катамарана за счет увеличения площади парусов и за счет уменьшения веса катамарана, и таким образом повысить мощность парусной энергетической установки. С помощью функции зависимости скорости катамарана от соотношения площади парусов к площади сечения сопротивления движению катамарана можно, при проведении экспериментов, создавать макеты катамаранов с заданными скоростными свойствами, определяя площадь парусов, вес и длину корпусов катамарана. Результаты экспериментов могут использоваться для решения задачи повышения мощности парусных энергетических установок в реальном масштабе.

Для реализации предложенной парусной энергетической установки необходимо также решить задачу автоматического управления его движение по траектории. Решение этой задачи было осуществлено во второй серии экспериментов которые проводились по той же методике.

Вторая серия экспериментов.

Макет парусной энергетической установки с автоматической системой управления движением представлен на рис. 7.

Корпуса катамарана были сделаны из легкой пластиковой трубки диаметром 3,6 см. Длина корпусов катамарана составляла 32 см без учета конусов, расположенных на концах корпусов катамарана, ширина между центрами корпусов составляла 14 см. На катамаране было установлено 4 мачты, к каждой из которых был прикреплен парус площадью 294 см^2 , сделанный из лавсановой пленки с металлическим напылением. Мачты были соединены с поворотным устройством, с

помощью которого, при подаче на него напряжения, мачты и прикрепленные к ним паруса поворачивались на угол приблизительно 90 градусов.

Автоматическое определение на траектории точек изменения направления движения катамарана по его угловому положению относительно направления ветра можно осуществить на том основании, что при движении по дуговой траектории катамаран разворачиваются на угол, равный его угловому смещения по траектории. Автоматическое регулирование можно организовать, если на катамаране поставить флюгер, с помощью которого можно было бы формировать электрический сигнал для изменения положения парусов при заданном угле разворота катамарана относительно направления ветра. Для реализации данной системы управления была разработана конструкция флюгера, представленная на рис. 8.

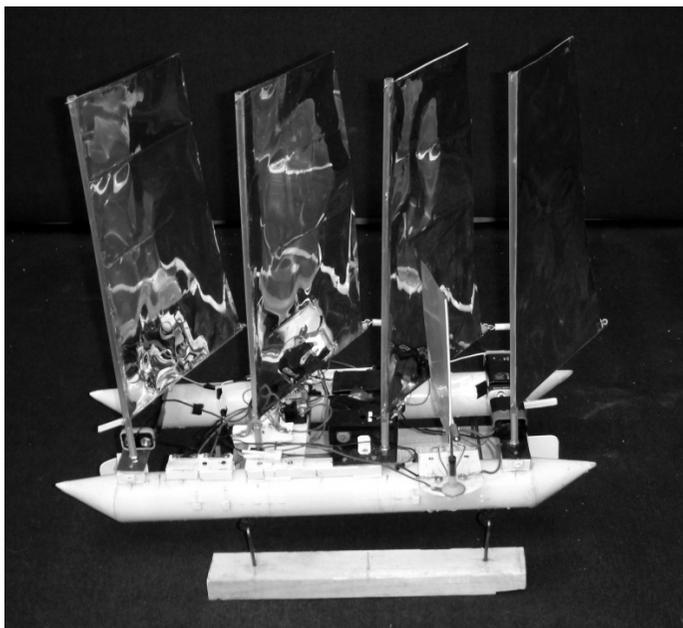


Рис. 7. Макет парусной энергетической установки с автоматической системой управления.

Флюгер был сделан из тонкой жесткой пленки, закрепленной внизу на медной проволоке, которая соединялась с медной контактной полоской, расположенной на нижней кромке флюгера. Медная проволока была вставлена в вертикальную трубку, в результате флюгер мог легко поворачиваться. Размеры флюгера подбирались экспериментально так, чтобы обеспечить его чувствительность к изменениям углового положения катамарана относительно направления ветра. С каждой стороны флюгер находились контактная стойка, выполненная из медной проволоки. При развороте катамарана на заданный угол относительно направления

ветра контактная стойка и медная полоска на флюгере образовывали замкнутый контакт. Предполагалось, что через данный контакт на поворотное устройство можно подавалось напряжение для изменения положения парусов. Были проведены эксперименты по проверке работоспособности предложенной системы управления. Эксперименты показали, что данная система не работает по следующей причине. Ветровой поток, создается в экспериментальной установке с помощью ветровых вентиляторов. Флюгер при указании направления ветра в таком потоке совершает резкие колебания. При развороте катамарана на заданный угол из-за резких колебаний флюгера невозможно обеспечить длительный контакт между медной пластинкой на флюгере и контактной стойкой для подачи рабочего напряжения на поворотное устройство. Из-за малой длительности подачи напряжения на поворотное устройство изменение положения парусов полностью не осуществлялась. Попытки найти способ уменьшить колебания флюгера не увенчались успехом.

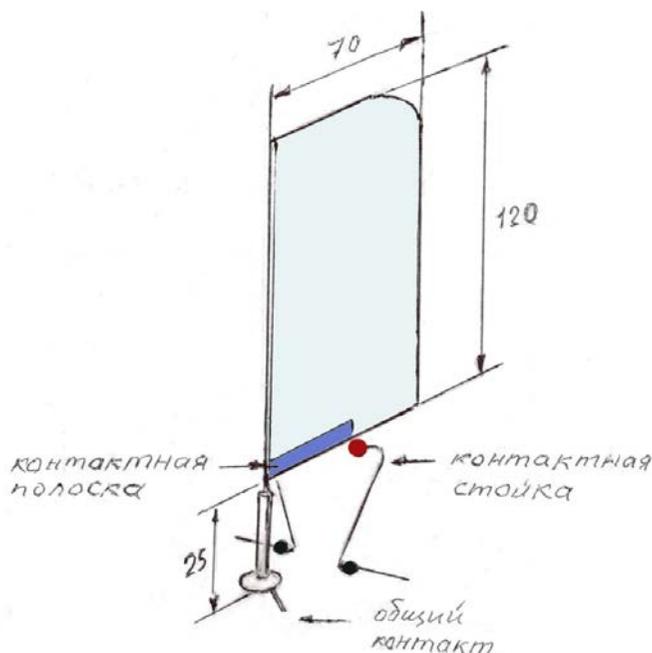


Рис. 8. Схема установленного на катамаране флюгера.

Способ изменения положения парусов в данной ситуации был найдена после того, как была реализована идея использовать флюгерный контакт как триггер для формирования постоянного рабочего напряжения, подающегося на поворотное устройство. Для реализации предложенной системы был введен сервопривод с фиксированным углом поворота, который срабатывал от быстрого контакта флюгера и подавал постоянное напряжение на поворотное устройство. Но после его срабатывания напряжение, поступающее на поворотное устройство, отключалось.

Это осуществлялось путем введения двух нормально замкнутых контактов, расположенных около одной и мачт. При повороте этой мачты соответствующий контакт отключал напряжение, подаваемое на поворотное устройство.

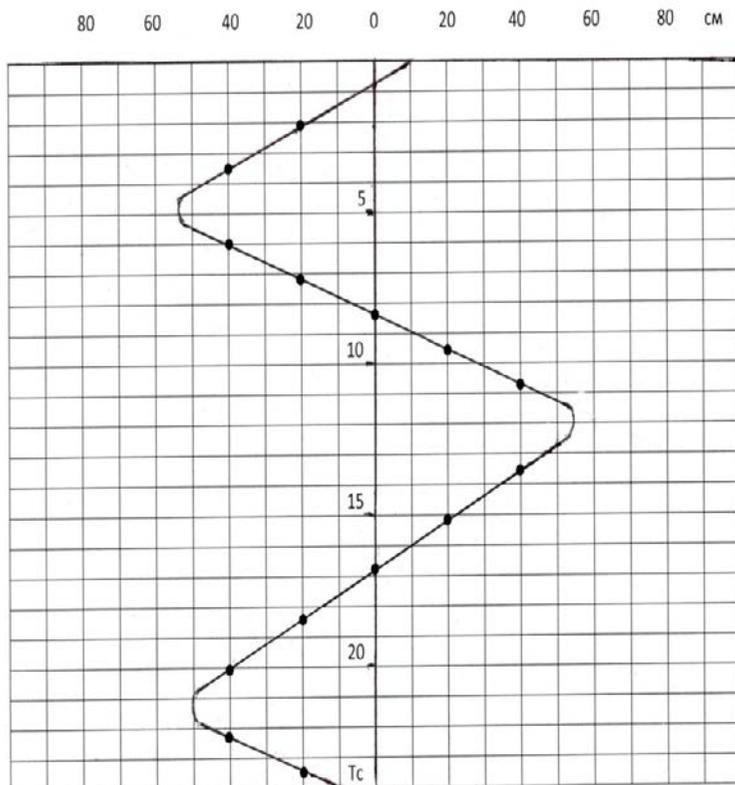


Рис.9. График движения катамарана с автоматической системой управления с гидрогенератором.

С созданными системами автоматического управления движением катамарана были проведены эксперименты по проверке работоспособности созданных систем. Эксперименты проводились при движении катамарана без гидрогенератора и с гидрогенератором. На рис. 9 представлен график движения катамарана с автоматическим управлением при движении с гидрогенератором. Как видно из графика, система автоматического управления движением катамарана работала нормально.

Средняя скорость движения катамарана без гидрогенератора составляла 22,1 см/с. Это значение скорости близко к расчетному равному 21,5 см/с, которое было получено следующим образом.

При проведении экспериментов с макетами катамаранов с разной площадью парусов и разным водоизмещением было установлено, что скорость катамарана

может быть выражена через параметр $D = Q/S$, где Q – площадь парусов катамарана, а S – площадь поперечного сечения водного потока, который взаимодействует с корпусами катамарана. Найденная зависимость скорости катамарана V от параметра D выражается формулой:

$$V = 2,3 \sqrt{D} \text{ см/с}$$

Для катамарана с автоматической системой управления входящие в формулу параметры имеют следующие значения:

- Площадь парусов катамарана Q ; $Q = 294 \text{ см}^2 \times 4 = 1176 \text{ см}^2$

- Площадь поперечного сечения водного потока S , может быть найдена из соотношения $L/S = V_b$, где L – длина корпусов катамарана, а V_b – объемное водоизмещение катамарана $V_b = 430 \text{ см}^2$, отсюда $S = 13,4 \text{ см}^2$.

Подставляя эти значения для Q и S в формулу зависимости скорости катамарана от параметра D , получаем следующее расчетное значение для скорости катамарана без гидрогенератора:

$$V = 2,3 \sqrt{D} \text{ см/с} = 2,3 \sqrt{88} \text{ см/с} = 21,5 \text{ см/с}$$

В экспериментах с катамаранами разного типа было найдено, что скорость движения катамарана с гидрогенератором меньше скорости движения катамарана без гидрогенератора в 1,3 раза, отсюда расчетная скорость катамарана с гидрогенератором равна $V_r = 16,5 \text{ см/с}$. Полученное экспериментальное значение скорости катамарана с гидрогенератором равно $V_r = 17 \text{ см/с}$, что близко к расчетному значению.

Эксперименты с автоматической системой управления показали принципиальную возможность управления движением катамарана в зависимости от его положения по отношению к направлению ветра. Предложенная система автоматического управления движением катамарана может быть реализована на парусных энергетических установках.

Третья серия экспериментов.

В этой серии экспериментов проводились исследования по оптимизации конструкции катамарана с целью ее упрощения.

На Рис. 10 приводится макет парусной энергетической установки усовершенствованной конструкции.

Корпуса катамарана были сделаны из легкой пластиковой трубки диаметром 3,6 см и имели разную длину. Длина одного корпуса составляла 44 см, длина второго корпуса равнялась 25 см, а ширина между центрами корпусов составляла 14 см. На длинном корпусе было установлено 5 мачт, к каждой из которых был прикреплен парус площадью 294 см², сделанный из лавсановой пленки с металлическим покрытием. Мачты вставлялись в вертикальные направляющие патрубки, смонтированные в корпус катамарана на расстоянии 9,5 см друг от друга. Мачты были соединены с поворотным устройством, с помощью которого, при подаче на него напряжения, мачты и прикрепленные к ним паруса поворачивались на угол приблизительно 90 градусов. На корпусе катамарана меньшей длины располагались симметрично относительно его центра два руля на расстоянии 22 см, угол поворота которых можно было менять. Поворотные стержни рулей, были вставлены в вертикальные направляющие трубки, закрепленные в корпусе катамарана. Снизу к корпусам катамарана прикреплен макет гидрогенератора с крыльчаткой диаметром 46 мм. Объемное водоизмещение макета катамарана составляло 400 см³.

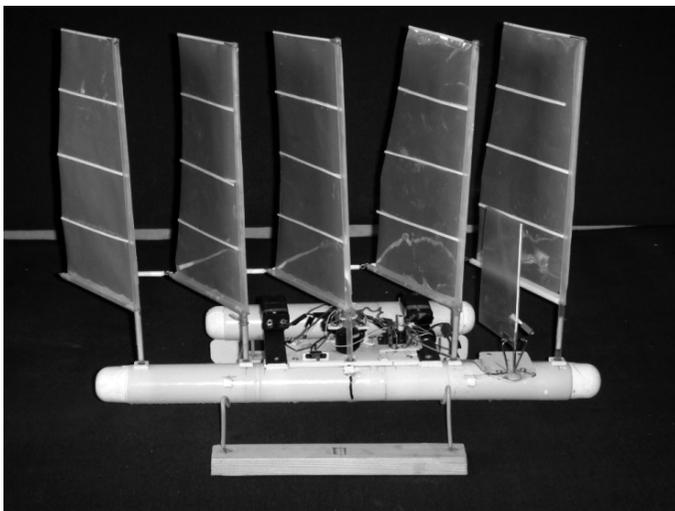


Рис. 10. Макет парусной энергетической установки усовершенствованной конструкции.

Катамаран был снабжен такой же системой автоматического определения на траектории точек изменения направления движения как и в серии 2.

Проведенные эксперименты показали хорошую работоспособность предложенной конструкции катамарана. Иллюстрацией этому может служить график движения катамарана по дуговой траектории с автоматической системой управления, представленный на рис 11.

Как видно из графика система автоматического управления движением катамарана работала нормально: изменение направления движения катамарана, которое определялось по положению катамарана относительно направления ветра, происходит приблизительно в одних и тех же точках траектории. Средняя скорость движения катамарана составляла 27,8 см/с. Это значение скорости близко к расчетной, равной 27,1 см/с, которая была получена следующим образом.

В первой серии исследований при проведении экспериментов с макетами катамаранов с разной площадью парусов и разным водоизмещением, было установлено, что скорость катамарана может быть выражена через параметр $D = Q/S$, где Q - площадь парусов катамарана, а S - площади поперечного сечения водного потока S , который взаимодействует с корпусами катамарана. Найденная зависимость скорости катамарана от параметра D выражается формулой

$$V = 2,3 \sqrt{D} \text{ см/с.}$$

Для предлагаемой конструкции катамарана входящие в формулу параметры имеют следующие значения:

- Площадь парусов Q ; $Q = 294 \text{ см}^2 \times 5 = 1470 \text{ см}^2$
- Площадь поперечного сечения водного потока S , взаимодействующего с корпусами катамарана, находится из следующего соотношения $L/2 \times S = V_{\text{к}}$,

где L – суммарная длина корпусов катамарана $L = 75$ см, а V_k – объемное водоизмещение катамарана $V_k = 400$ см³, отсюда $S = 10,6$ см².

Подставляя эти значения для Q и S в формулу зависимости скорости катамарана от параметра $D = Q/S$ получаем следующее значение скорости:

$$V = 2,3\sqrt{D} \text{ см/с} = 2,3\sqrt{138} \text{ см/с} = 27,1 \text{ см/с}$$

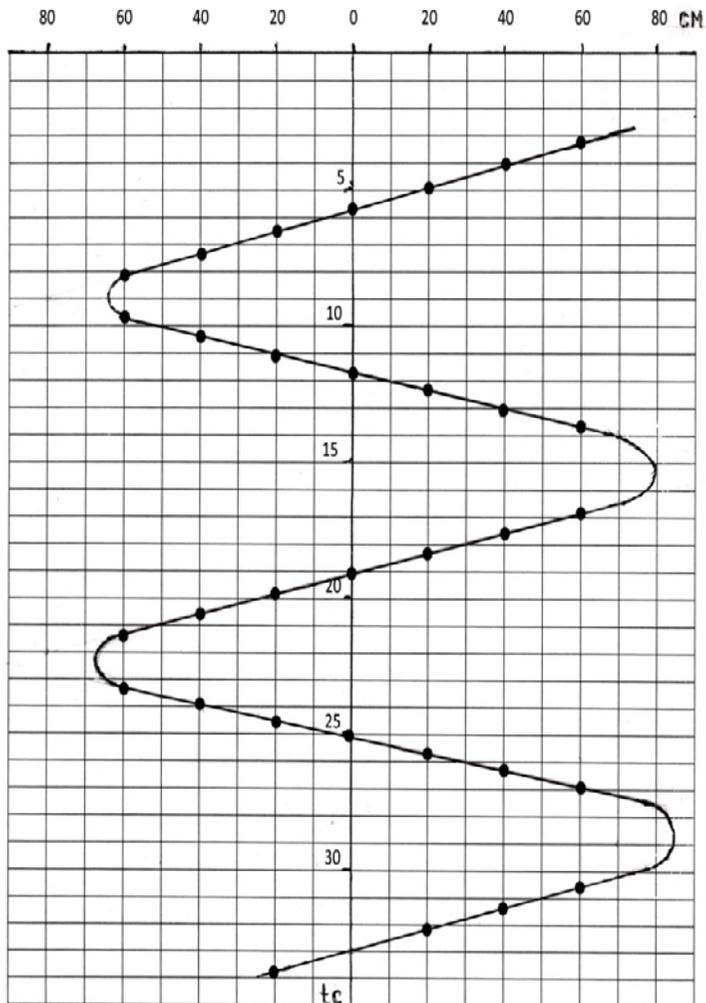


Рис.11. График движения катамарана усовершенствованной конструкции с автоматической системой управления.

В экспериментах с катамаранами разного типа было установлено, что скорость движения катамарана с гидрогенератором меньше скорости движения катамарана без гидрогенератора в 1,3 раза. Отсюда, расчетная скорость катамарана предлагаемой конструкции с гидрогенератором должна быть $V_r = 20,8 \text{ см/с}$. Экспериментально найденная скорость для катамаран с гидрогенератором оказалась равной $V_r = 19,4 \text{ см/с}$, что близко к значению расчетной.

Хорошие экспериментальные данные были получены в результате организации оптимального движения катамарана по дуговой траектории. С самого начала проведения экспериментов с движением катамарана по дуговой траектории возникла проблема: каким способом организовать такое движение. Первая возможность – организовать движение по дуговой траектории за счет положения рулей. Принципиально это возможно, но надежность такого способа организации движения низкая, поскольку перемещение катамарана зависит от начального положения катамарана по отношению к траектории движения, а при изменении положения парусов оно меняется, и катамаран может двигаться не в заданном направлении. Более надежным способом является организация движения по дуговой траектории за счет натяжения удерживающей связи, имитатором которой в эксперименте служила леска. Для организации такого движения нужно сделать так, чтобы во время движения катамарана леска была натянута. Это можно сделать с помощью рулей, установив их в такое положение, чтобы при движении катамаран разворачивался по ветру. Однако уже первые эксперименты показали, что в этом случае катамаран движется по дуговой траектории так, что он оказывается повернутым на некоторый угол к траектории, как это показано на рис. 12.

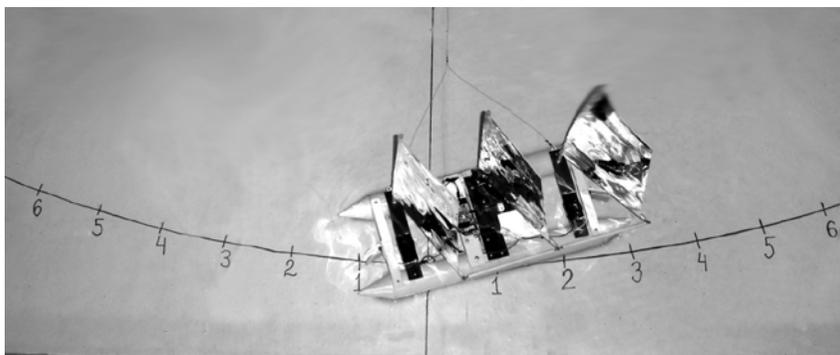


Рис. 12. Движение катамарана по дуговой траектории с развернутым корпусом.

Экспериментально было найдено, что оптимальное положение рулей для того, чтобы катамаран двигался по траектории без разворота, является положение в котором рули направлены вдоль оси корпуса катамарана. При таком положении рулей леска оказывается натянутой, а моменты аэродинамических и гидродинамических сил оказываются скомпенсированными, и катамаран движется по траектории без разворота, что уменьшает силу сопротивления движения катамарана со стороны водной среды и увеличивает скорость катамарана.

Выводы

Результаты, полученные при проведении экспериментов с катамараном усовершенствованной конструкции, показывают, что предложенная конструкция катамарана может быть использована при реализации парусной энергетической установки. Конструкция позволяет легко собирать корпус в нужном месте и легко их разбирать, когда необходимость в производстве электроэнергии отпадает. Проведенные эксперименты являются заключительными в серии экспериментов, целью которых было определить возможность реализации парусной энергетической установки на основе конструкции катамарана, симметричной относительно носа и кормы. Проведенные эксперименты показали работоспособность такой конструкции. Была определена траектория, по которой должен двигаться катамаран при любом направлении ветра. Были опробованы способы повышения скорости катамарана за счет увеличения площади парусов также, а также за счет уменьшения водоизмещения катамарана. Была разработана система автоматического управления движением катамарана по этой траектории, которая определяет точки изменения движения катамарана по его положения относительно направления ветра.

В последующих экспериментах необходимо выяснить технические возможности таких систем, в частности, определить какую электрическую мощность можно получать с помощью таких систем и возможности ее увеличения, дать экономическую оценку стоимости таких систем, определить область их применения, и множество других задач.

Литература

1. Global Wind Report 2019.
2. Ersta.ru/news/greenenergy/184.html
3. Power-technology.com/projects/windfloat-atlantic-project
4. Патент РФ № 2 722 760. Парусная установка, преобразующая энергию потоков двух сред.
5. Чекарев К.В. и др. Парусная энергетическая установка, преобразующая энергию потоков двух сред // Окружающая среда и энергетика. №3, 2020, С. 39-46. <http://jeees.ru/2021/05/06/>

ОБ АВТОРАХ

Андреевко Татьяна Ивановна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Берёзкин Михаил Юрьевич – кандидат географических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Бушуев Виталий Васильевич – доктор технических наук, профессор, действительный член Инженерной академии и РАЕН, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, почетный энергетик СССР, главный научный сотрудник ОИВТ РАН.

Габдерахманова Татьяна Сергеевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОИВТ РАН.

Грибков Сергей Владимирович – кандидат технических наук, ученый секретарь Комитета ВИЭ РосСНИО, академик Российской инженерной академии им. Н.Е. Жуковского.

Дегтярев Кирилл Станиславович – кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Зайченко Виктор Михайлович – доктор технических наук, старший научный сотрудник ОИВТ РАН.

Залиханов Алим Михайлович – кандидат географических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Киселева Софья Валентиновна – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Нефедова Людмила Вениаминовна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Нигматулин Раис Искандерович (1946–2014) – доктор технических наук, профессор Московского авиационного института, заведующий лабораторией Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН.

Нигматулин Роберт Искандерович – академик Российской академии наук, доктор физико-математических наук, лауреат Государственной премии СССР, научный руководитель Института океанологии им. П.П. Ширинова РАН.

Нечаев Андрей Мартэнович – кандидат технических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Показеев Константин Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики моря и вод суши физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Рафикова Юлия Юрьевна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Синюгин Олег Анатольевич – кандидат экономических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Соловьев Александр Алексеевич (1943–2020) – доктор физико-математических наук, профессор, действительный член Российской инженерной академии, главный научный сотрудник, заведующий научно-исследовательской лабораторией возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Соловьев Дмитрий Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института океанологии им. П.П. Ширинова РАН и Объединённого института высоких температур РАН (по совм.)

Чекарев Константин Владимирович – инженер первой категории научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Чернова Надежда Ивановна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Шилова Любовь Андреевна – кандидат технических наук, доцент кафедры ИСТАС Национального исследовательского Московского государственного строительного университета.

Научное издание

**ГЕОГРАФИЯ
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ
ИСТОЧНИКОВ
ЭНЕРГИИ**

Коллективная монография

Под редакцией М.Ю. Берёзкина, С.В. Киселевой

Подписано в печать: 19.09.2021 г.
Формат 60x84/16 бумага офсетная
Печать офсетная. Печ.л. 11,7
Тираж 500 экз.
Заказ № 576.
Издательский дом "Энергия"
125009, г. Москва, Дегтярный пер., д.9
тел.+7(495)229-4241 доб.224