

УДК 620.98

## О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В СОСТАВЕ АВТОНОМНЫХ ВЕТРОДИЗЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ\*

*С.В. Киселева<sup>1,2</sup>, А.Б. Тарасенко<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет  
д. 1, Ленинские горы, Москва, 119991, Россия  
тел.: +7 (495) 939-42-57; e-mail: k\_sophia\_v@mail.ru

<sup>2</sup>ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН  
стр. 2, д. 13, ул. Ижорская, Москва, 125412, Россия  
тел.: +7 (495) 484-23-74

doi: 10.15518/isjaee.2018.19-21.023-033

Заключение совета рецензентов: 06.07.18 Заключение совета экспертов: 09.07.18 Принято к публикации: 12.07.18

Рассмотрены особенности работы ветродизельных установок при высокой частоте вариаций скорости ветра. На примере реального графика нагрузки п. Усть-Воямполка в Камчатском крае, параметров отечественных дизель-генераторных установок и суперконденсаторных систем, а также ветроэлектрогенераторов китайского производства, хорошо зарекомендовавших себя в условиях работы в российском Заполярье, проанализированы различные варианты компоновки ветродизельного комплекса. Оценки сделаны на основе балансовой модели и двух алгоритмов расчета, которые отличаются детализацией исходных данных о ветровом режиме (периодичность данных 3 часа и 2 секунды соответственно). Предполагается, что оптимизация состава энергетического комплекса может проводиться путем секционирования дизель-генераторной установки и использования суперконденсаторной батареи для компенсации переменной выработки ветроэлектрогенераторов. Показано, что при характерных ветровых условиях заданной местности и суточных графиках нагрузки потребителя оптимальная емкость суперконденсаторной батареи в составе ветродизельной установки составляет 324 Втч. При этом наращивание емкости суперконденсатора не ведёт к снижению расхода топлива. Сравнение технико-экономических характеристик суперконденсаторов и аккумуляторов с аналогичной энергоемкостью дает основание полагать, что суперконденсаторный модуль может иметь преимущество перед аккумуляторной батареей благодаря стоимостным и ресурсным показателям, а также более высоким допустимым токам заряда/разряда. Показано, что введение в состав автономной энергетической системы ветроэлектрогенератора может привести не только к снижению потребления дизельного топлива, но и к ухудшению технико-экономических показателей дизель-генераторной установки ввиду ее работы на малых мощностях.

Ключевые слова: ветродизельный комплекс; суперконденсатор; оптимизация; балансовая модель; коэффициент использования установленной мощности; потребление дизельного топлива.

## ON THE POSSIBILITY OF SUPERCAPACITOR USING IN AUTONOMOUS WIND-DIESEL COMPLEXES

*S. V. Kiseleva<sup>1,2</sup>, A. B. Tarasenko<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography  
1 Leninskie Gori, Moscow, 119991, Russia  
tel.: +7 (495) 939 42 57, e-mail: k\_sophia\_v@mail.ru

<sup>2</sup>Russian Academy of Science Joint Institute for High Temperature  
13/2 Izhorskaya St., Moscow, 125412, Russia  
tel.: +7 (495) 484 23 74

\* Киселева С.В., Тарасенко А.Б. О возможности использования суперконденсаторных накопителей энергии в составе автономных ветродизельных комплексов // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2018;19-21:23-33.



The paper deals with the features of wind-diesel units operation at a high frequency of wind speed variations. Various options of the wind farm complex layout are considered on the basis of the following input data: 1) consumer load schedule (Ust-Voyampolka village in the Kamchatka Territory); 2) the characteristics of domestic diesel-generator sets and supercapacitors; 3) characteristics of wind power generators of Chinese production. We have made the estimates using a balance model and two calculation algorithms which differ in the details of the initial data on the wind regime (the periodicity of the data is 3 hours and 2 seconds respectively). It is proposed to optimize the energy complex composition by partitioning the diesel generator set and by using a supercapacitor battery to compensate for the variable output of wind generators. It is shown that under the typical wind conditions and daily load graphs of the consumer, the optimum capacity of the supercapacitor battery in the wind farm is 324 Wh. Moreover, increasing the capacity of supercapacitor does not reduce fuel consumption. Comparison of technical and economic characteristics of the supercapacitors and batteries with a similar energy capacity suggests that the supercapacitor module can have an advantage over the battery due to cost and resource parameters, as well as higher permissible charge-discharge currents. It is shown that the introduction of a wind-electric generator into the system can lead not only to a decrease in the consumption of diesel fuel, but also to a deterioration of the technical and economic indicators of the diesel generator set due to its operation at low power.

Key words: wind-diesel complex; supercapacitor; optimization; balance model; installed capacity utilization factor; diesel fuel consumption.



Софья  
Валентиновна Киселева  
Sofia Kiseleva

**Сведения об авторе:** канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

**Образование:** физический факультет МГУ (1987 г.) и аспирантура того же факультета (1990 г.).

**Область научных интересов:** возобновляемые источники энергии; оценка ресурсов ВИЭ; лабораторное моделирование динамических процессов в океане.

**Публикации:** более 80, в том числе патенты на изобретения.

*h*-index (по РИНЦ) 12; SPIN 9597-0055  
ResearcherID E-3324-2014

**Information about the author:** D.Sc. in Physics and Mathematics, Senior Scientific Worker of Renewable Energy Sources Laboratory at Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography.

**Education:** Faculty of Physics Lomonosov Moscow State University, 1987.

**Research interests:** renewable energy sources; resource evaluation; ecology-geographical aspects of renewable energy; laboratory modeling of ocean and atmosphere's dynamical process.

**Publications:** more than 80, including patents.



Алексей Борисович  
Тарасенко  
Alexey Tarasenko

**Сведения об авторе:** научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии ОИВТ РАН.

**Образование:** Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (2005 г.).

**Область научных интересов:** возобновляемые источники энергии; фотопреобразователи; накопители энергии.

**Публикации:** более 40, в том числе патентов на изобретения.

*h*-index (по РИНЦ) 6  
Researcher ID: E-2683-2014  
SPIN-код: 6346-1356

**Information about the author:** the Scientific Worker at Renewable Energy Sources Laboratory of Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences.

**Education:** National Research Nuclear University MEPH, 2005.

**Research interests:** renewable energy sources, PV, energy stores.

**Publications:** more than 40, including patents

## 1. Введение

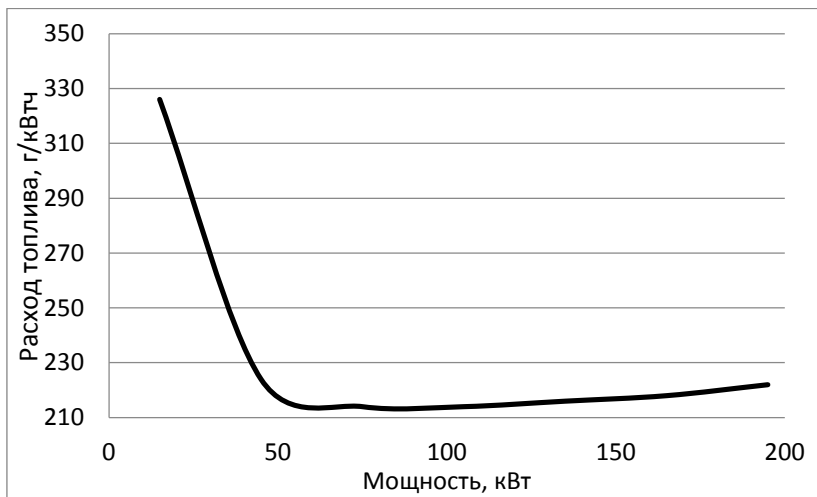
Практическое использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для электроснабжения автономных потребителей на российском Дальнем Востоке и Крайнем Севере имеет большое значение. При обосновании введения объектов на ВИЭ в сис-

темы энергоснабжения в первую очередь рассматривается возможность снижения себестоимости энергии, обычно вырабатываемой на дизель-генераторных установках (ДГУ) из привозного топлива, цена которого существенно отличается от закупочной за счет транспортной составляющей [1]. Кроме того, учитывается возможность снижения антропо-

генной нагрузки, которая связана, в том числе, с захламлением прилегающих территорий порожней тарой из-под топлива. За рубежом в схожих условиях приморских районов Норвегии, Аляски и Канады широкое распространение получила комбинация дизель-генераторной установки с ветроэлектростанциями (ВЭГ) и – в ряде случаев – накопителями энергии [2]. Несколько пилотных проектов реализовано и в России, например, на Дальнем Востоке силами ООО «Передвижная энергетика» введены в эксплуатацию ветродизельные комплексы [3]. В поселке Амдерма Ненецкого автономного округа на побережье Северного Ледовитого океана построена комбинированная ветродизельная установка с ВЭГ китайской компании Gherpower, разработанными по техническому заданию и в тесном сотрудничестве со специалистами Санкт-Петербургского политехнического университета [4]. Определяющую роль при выборе состава и характеристик гибридной энерго-

системы – мощности ВЭГ и дизельной установки, энергоемкости накопителя – играет ожидаемая экономия дорогостоящего привозного органического топлива [5]. Основными ограничениями для использования накопителей в подобных системах являются их относительно высокая стоимость и малый срок эксплуатации в режиме постоянных циклов заряда/разряда, вызванном переменным характером выдачи мощности ВЭГ. Поэтому большинство таких систем эксплуатируется без накопителя энергии [5].

Практика простого дополнения дизель-генераторной установки ветроэлектростанциями некоторой (особенно значительной) мощности не всегда приводит к положительным результатам, так как ДГУ имеют ярко выраженный минимум зависимости удельного расхода топлива от вырабатываемой мощности, обычно лежащий в диапазоне 60 ÷ 80 % от максимальной мощности установки (рис. 1).



**Рис. 1** – Удельный расход топлива при разных значениях мощности дизельного генератора 8СН 13/14 (ЯМЗ-238Н) [6]  
**Fig. 1** – The specific fuel consumption at different power values of the diesel generator 8СНН 13/14 (YAMZ-238Н) [6]

Работа дизель-генераторов на малых мощностях обычно ведет к увеличению расхода масла и закоксовыванию цилиндров при неполном сгорании топлива [7]. Таким образом, уменьшение нагрузки на дизель-генератор при добавлении в систему ветроустановки должно производиться с учетом последствий возможного выхода коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) дизеля за пределы оптимального рабочего диапазона с точки зрения потребления топлива и срока службы. В то же время специфика удаленных поселений в рассматриваемых регионах такова, что при аварии дизель-генератора и отсутствии ветра необходимо полное резервирование электроснабжения. Это предполагает

наличие нескольких комплектов дизель-генераторов и выбор максимальной мощности генерирующей установки в соответствии с максимально возможной мощностью потребителя. В связи с обозначенными проблемами в представленной работе были сделаны оценки экономии дизельного топлива для различных комбинаций ВЭГ, дизель-генераторов и накопителей различного типа с учетом графика нагрузки потребителя и ветрового потенциала. В предложенном подходе впервые были использованы различные уровни детализации исходных данных о скорости ветра, что позволило определить ниши возможного использования суперконденсаторов в гибридных ветровых установках.

Список обозначений	
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
max	Максимальное значение
min	Минимальное значение
<i>Аббревиатуры</i>	
ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
ВЭГ	Ветровой электрогенератор



ДГУ	Дизель-генераторная установка
КИУМ	Коэффициент использования установленной мощности
КНР	Китайская Народная Республика
СК	Суперконденсатор
ЦАГИ	Центральный аэрогидродинамический институт

## 2. Теоретическая часть: алгоритмы расчетно-аналитических исследований

Модельным объектом был выбран поселок Усть-Воямполка (Камчатский край), для которого известен график нагрузки (почасовое потребление электрической энергии) (рис. 2). Поскольку основным критерием эффективности применения новых технологий в энергетике автономных районов является снижение затрат на энергоснабжение, необходимо оценить объемы по-

требления дизельного топлива электрогенерирующей системой, в составе которой имеется ВЭГ. Согласно сообщению информационно-аналитического портала «Камчатка-Информ» [8], стоимость завезенного топлива (30,6 тыс. тонн дизельного топлива) составила более 1,5 млрд руб. Следовательно, средняя стоимость привозного дизельного топлива, используемого ОАО «Южные электрические сети Камчатки», в 2017 г. составила 49 тыс. руб. за тонну.

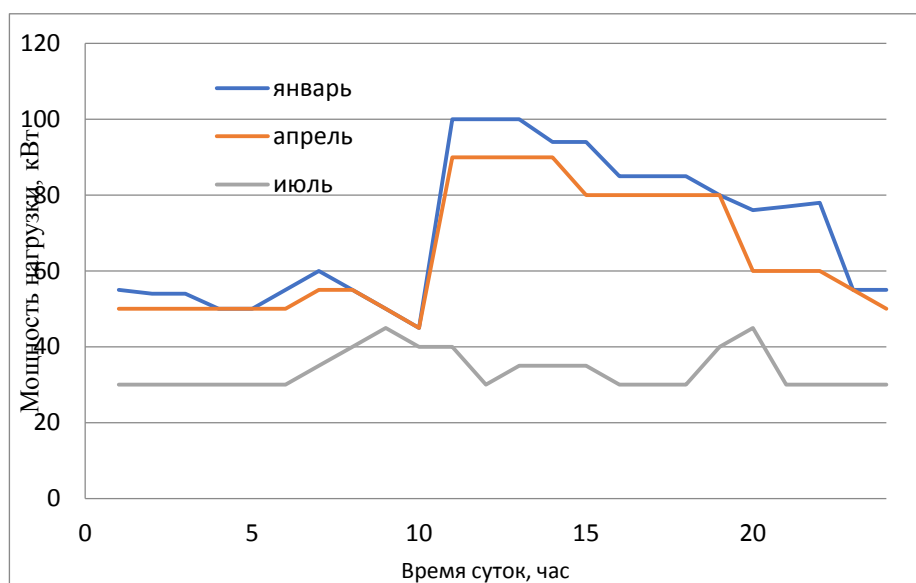


Рис. 2 – Типовые графики нагрузки потребителей для п. Усть-Воямполка (для января, апреля, июля)  
Fig. 2 – Typical load diagram for the Ust-Voyampolka village (for January, April, July)

Оценки потенциальной производительности ВЭГ в составе гибридной установки в п. Усть-Воямполке делались на основе балансовой модели. Моделировалась работа энергогенерирующей системы, которая может включать в себя ветроэлектрогенераторы, накопители энергии и ДГУ. Расчет энергетического баланса проводился на двух уровнях детализации в зависимости от временного разрешения исходных данных о скорости ветра. Для расчетов первого уровня детализации учитывались многолетние данные (2007–2017 гг.) о ветровом режиме, представленные на сайте «Расписание погоды» [9], где содержатся результаты наземных метеонаблюдений скорости ветра на высоте 8 ÷ 10 м (интервал между наблюдениями – 3 часа). Данные о скорости ветра в каждый срок измерения усреднялись за 10 лет для получения типичной картины распределения скорости ветра в течение года по трехчасовым интервалам. Для моделирования работы гибридной системы на втором уровне детализации использовались приведенные к условиям п. Усть-Воямполки результаты ветромониторинга на московской площадке ЦАГИ

имени профессора Н.Е. Жуковского с двухсекундным разрешением во времени.

### 2.1. Алгоритм расчета на первом уровне детализации

Исходя из многолетних метеорологических наблюдений о скорости ветра в п. Усть-Воямполке на высоте порядка 10 м с разрешением 3 часа [9], а также данных [10] о средней многолетней скорости ветра на различных высотах в пространственной сетке 1 x 1°, формировался годовой ряд значений скорости ветра с разрешением 3 часа на высоте расположения гондолы ВЭГ (рис. 3). На основе суточных графиков потребления электрической энергии для п. Усть-Воямполка был составлен годовой график нагрузки с разрешением 3 часа. Таким образом, временное разрешение потока поступающей в систему энергии (энергия ветра) приводилось в соответствие с потреблением электрической энергии.

На начальном этапе оптимизации состава и структуры энергосистемы выбирался тип и количество ВЭГ, а также структура ДГУ для покрытия заданной нагруз-



ки. Под структурой ДГУ в данном случае понимается количество однотипных дизель-генераторов, работающих параллельно, так, что общая пиковая мощность ДГУ равняется пиковой нагрузке потребителя.

В соответствии с режимом скорости ветра на основе мощностной характеристики ветрогенератора рассчитывалась энергия, вырабатываемая ВЭГ за каждые 3 часа в течение года, а также баланс этой выработки и энергии, ушедшей на покрытие нагрузки потребителя (предполагается, что в течение трехчасового интервала скорость ветра постоянна). Недостаток энергии покрывается за счет аккумуляторной батареи, а при достижении заданной предельной глубины разряда – ДГУ. При известной нагрузке потребителя и вычисленной производительности ВЭГ в

пределах каждого трехчасового интервала оптимизировалась структура ДГУ, а именно, количество работающих секций ДГУ подбиралось таким образом, чтобы КИУМ ДГУ оказался в пределах оптимума по расходу топлива (в предложенной схеме расчета принималось следующее условие оптимизации:  $КИУМ < 0,85$ ). Оптимизация структуры ДГУ осуществлялась путем последовательного добавления секций и расчета КИУМ в пределах каждого трехчасового интервала для каждой конфигурации ДГУ. Для выбранной оптимальной структуры ДГУ на основе данных [6] о зависимости удельного расхода топлива от КИУМ вычислялся расход топлива за каждые 3 часа года, а затем – суммированием – за каждый месяц и за год в целом.

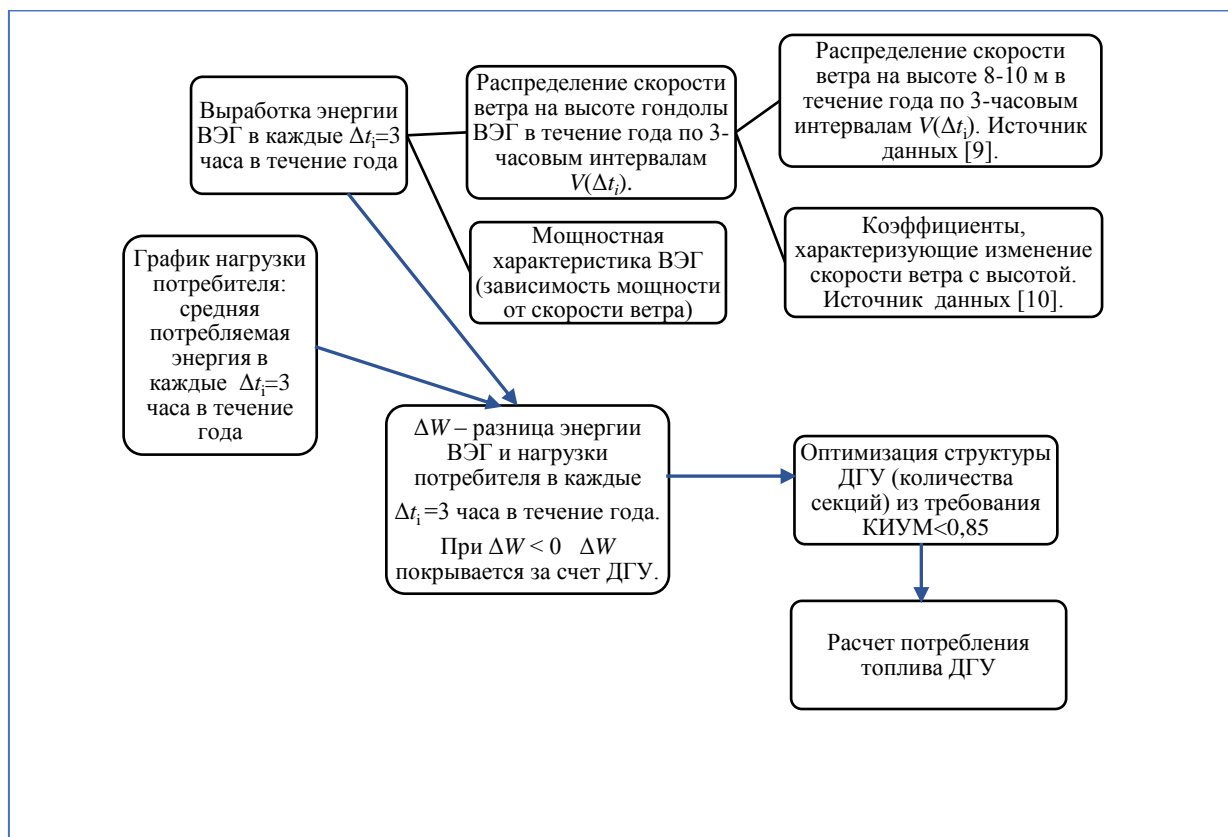


Рис. 3 – Схема алгоритма оптимизации состава ветродизельной установки на уровне детализации 1

Fig. 3 – Scheme of the optimization algorithm for the composition of the wind farm at the level of detail 1

## 2.2. Алгоритм расчета на втором уровне детализации

Для анализа возможностей применения суперконденсатора (СК) в качестве накопителя в составе гибридной ветродизельной установки использовался алгоритм расчета на 2 уровне детализации исходных данных о скорости ветра в течение года с разрешением 2 секунды. Для этого использовались:

– последовательности данных о скорости ветра с шагом в 2 секунды, полученные в результате фактических измерений на московской площадке ЦАГИ имени профессора Н.Е. Жуковского [11];

– годовой ряд значений скорости ветра с разрешением 3 часа на высоте расположения гондолы ВЭГ (с 1-го уровня детализации).

При этом каждый трехчасовой интервал детализировался до двухсекундного разрешения путем «вписывания» в него последовательностей двухсекундных данных (рис. 4). Предварительно проводилось сопоставление средней скорости ветра в последовательностях с двухсекундным разрешением и средней скорости ветра в каждом трехчасовом интервале. При равенстве средних скоростей последовательность с двухсекундным разрешением «вписывалась» в трехчасовой интервал. Например, последо-

вательность длительностью 3 750 сек. и двухсекундным разрешением со средней скоростью 5 м/сек. была использована для детализации временного хода ветра внутри интервала 15 ÷ 18 ч для сентября, поскольку скорость ветра на этом интервале по данным метеонаблюдений в п. Усть-Воямполке составляет 5,1 м/сек. Другая последовательность (длительность 2 784 сек., разрешение 2 сек., средняя скорость 6,52 м/сек.) была отнесена к интервалу 18 ÷ 21 ч для января (скорость ветра для этого интервала по данным метеонаблюдений в п. Усть-Воямполке составляет 6,5 м/сек) и т.д. В результате средняя скорость в каждом трехчасовом интервале оставалась практически равной исходной средней скорости ветра в этом интервале. При данном уровне детализации моделирование проводилось на коротких периодах, равных длительности двухсекундных по-

следовательностей (порядка часа) с учетом нагрузки потребителя в тот же час суток.

На основе детализированного массива данных о скорости ветра и зависимости мощности ветроустановки от скорости ветра на каждом рассмотренном периоде рассчитывалась производительность ВЭГ, которая сопоставлялась с графиком нагрузки. При этом предполагалось, что в течение трехчасового интервала нагрузка и состав ДГУ, который ранее был определен на уровне детализации 1, постоянны. Но, поскольку детализация скорости ветра в данном алгоритме составляла 2 сек., мощность ДГУ и ее КИУМ определялись с разрешением по времени 2 сек. На этом этапе алгоритмы 2 и 1 отличаются только более детальными расчетами (2 сек.) производительности ВЭГ и КИУМ по времени.

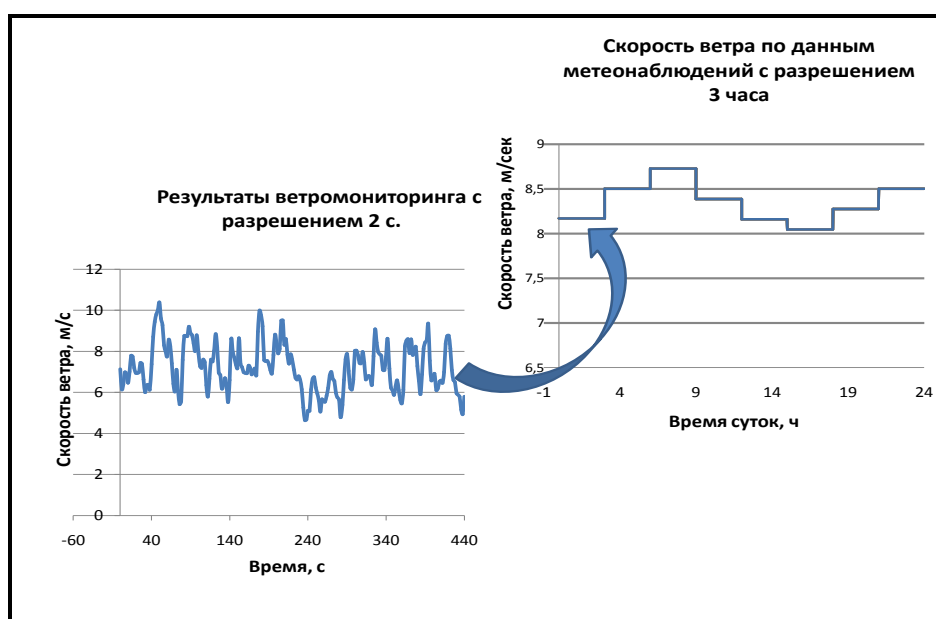


Рис. 4 – Схема формирования последовательностей скорости ветра с разрешением 2 сек.  
 Fig. 4 – Scheme of the wind speed sequences formation with a resolution of 2 sec.

С учётом зависимости потребления топлива от КИУМ ДГУ были заданы допустимый диапазон изменения КИУМ ( $КИУМ_{max} = 0,85$ ;  $КИУМ_{min} = 0,40$ ) и некоторая доступная энергоёмкость суперконденсаторного накопителя. Затем с детализацией 2 сек. определялся баланс между выработанной энергией (ВЭГ + ДГУ) и потреблением энергии нагрузкой. При этом, как указывалось, мощность ВЭГ варьировалась с шагом исходных данных 2 сек., а состав ДГУ оставался постоянным на каждом 3-часовом интервале. Оптимизация КИУМ проводилась следующим образом. В случае если КИУМ ДГУ находился вне заданного допустимого диапазона, то его значение увеличивалось путем передачи части энергии в суперконденсатор (при текущем  $КИУМ < КИУМ_{min}$ ) либо уменьшалось за счет передачи энергии потребителю из СК (при текущем  $КИУМ > КИУМ_{max}$ ). По модифицированно-

му таким образом режиму работы ДГУ и, соответственно, оптимизированному графику изменения КИУМ ДГУ определялся расход топлива на каждом шаге расчета; результаты экстраполировались на месяц и год. В результате роль СК сводилась к оптимизации работы ДГУ путем «удержания» его в наиболее экономичных диапазонах мощности с точки зрения потребления топлива и ресурса.

### 3. Результаты расчетов и их обсуждение

Для расчетов по алгоритму 1 был выбран ВЭГ GhrepowerFD 16-50 компании Ghrepower (КНР). Данная установка разработана совместно с российскими специалистами и адаптирована к эксплуатации в условиях российского Севера и Дальнего Востока. Пилотный проект с ВЭГ этого типа был реали-



зован в поселке Амдерма [12]. Фундамент установки имеет тепловую развязку с грунтом; монтаж возможен посредством обычного автокрана и гидроцилиндров; лопасти и гондола ВЭГ имеют конструктивные и технологические особенности, обеспечивающие их устойчивую работу в северных условиях [4]. Пиковая мощность установки отвечает требованиям энергоснабжения относительно небольших поселков, не подключенных к сети. На сайте производителя [13] представлены мощностная характеристика установки и параметрический ряд агрегатов с высотой мачты 16 м, 20 м, 25 м и 30 м. В расчетах использовались характеристики ВЭГ данного типа высотой 30 м.

В состав установки также была включена ДГУ, разбитая на 3 секции по 40 кВт для повышения КИ-УМ. В качестве секций ДГУ рассматривались единичные двигатели марки ММЗД-246.4. Результаты расчетов энергетических балансов по алгоритму с уровнем детализации 1, а именно, выработка энергии ВЭГ, ДГУ и нагрузка потребителя, для средних суток худшего с точки зрения поступления ветровой энергии месяца (января) представлены на рис. 5, лучшего (сентябрь) – на рис. 6.

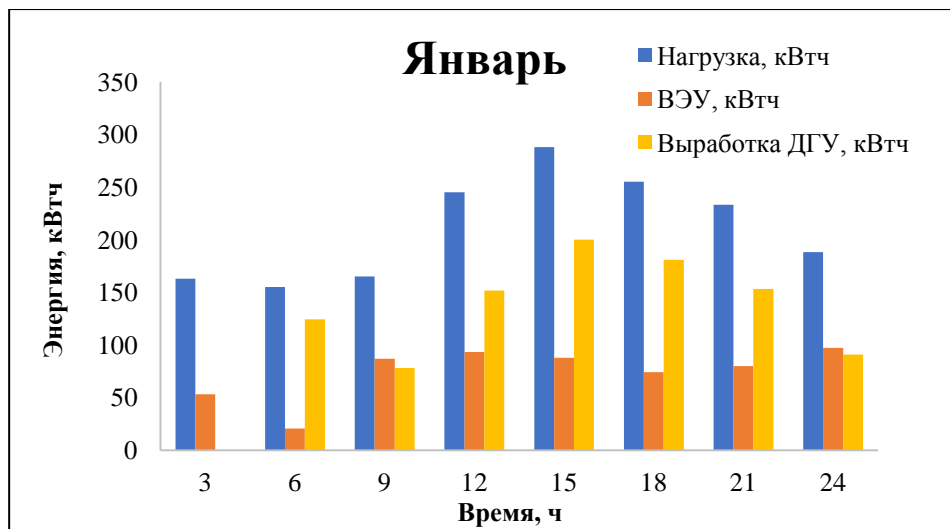


Рис. 5 – Результаты расчета энергетического баланса системы ДГУ-ВЭГ-потребитель для п. Усть-Воямполка, январь (уровень детализации 1)

Fig. 5 – The energy balance of the hybrid power system for Ust-Voyampolka, January (level of detail 1)

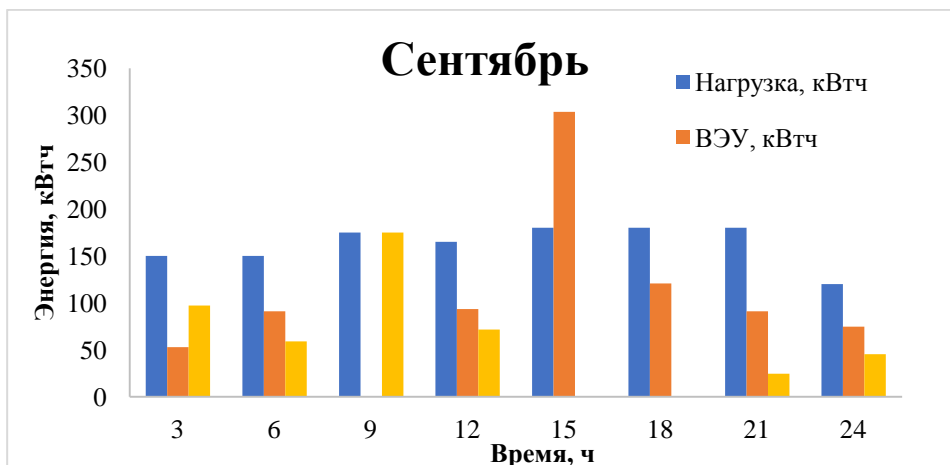


Рис. 6 – Результаты расчета энергетического баланса системы ДГУ-ВЭГ-потребитель для п. Усть-Воямполка, сентябрь (уровень детализации 1)

Fig. 6 – The energy balance of the hybrid power system for Ust-Voyampolka, September (level of detail 1)

Поскольку шаг расчета по времени в 3 часа, и даже в час, является слишком грубым для оценки применимости СК, были предприняты расчеты по алгоритму 2 с двухсекундным уровнем детализации скорости

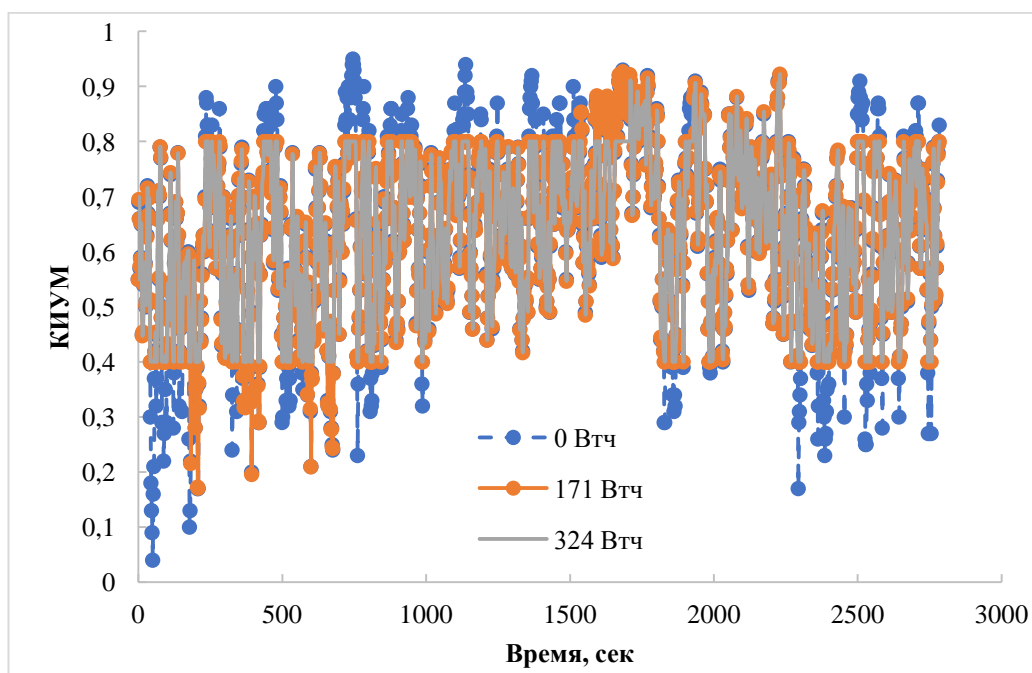
ветра. Как уже указывалось, при работе установки в составе ВЭГ-ДГУ-СК-нагрузка критичным с точки зрения ресурса ДГУ и расхода топлива является «уход» ДГУ в неоптимальный диапазон значений



КИУМ (ниже 0,40 и выше 0,85). В соответствии с алгоритмом расчета на уровне детализации 2, при значении КИУМ ДГУ выше 0,85 в модели начинается разряд суперконденсаторного модуля на нагрузку, а при значении ниже 0,40 – заряд СК от ДГУ. Пример изменения КИУМ ДГУ во времени при различных значениях емкости СК в составе установки представлен на рис. 7. На диаграмме видно, что при отсутствии СК в системе (энергоемкость СК = 0 Вт·ч) достаточно длительные периоды времени ДГУ работает не в оптимальном режиме.

«Проблемные» периоды могут занимать от 2 сек. до минуты, что позволяет рассматривать применение суперконденсаторных батарей для исключения этих неоптимальных режимов работы ДГУ. Для детальных оценок была рассчитана и проанализирована энергия, содержащаяся в отклонениях мощности ДГУ от оптимального диапазона КИУМ. На основе полученных результатов была проведена предварительная оценка энергоемкости СК, необ-

ходимая для стабилизации мощности ДГУ в оптимальных пределах. Максимальное абсолютное значение отклонения мощности ДГУ за пределы оптимальных значений КИУМ составило 29 кВт, максимальная энергия, содержащаяся в подобном выбросе – 0,169 кВт·ч. Суперконденсаторная батарея номинальным напряжением в 220 ÷ 240 В, построенная на 90 единичных элементах в 2 500 Ф (органический электролит, 2,7 В/элемент), соединенных последовательно, в диапазоне рабочих напряжений 121 ÷ 242 В, способна обеспечить энергоемкость в 0,171кВт·ч и мощность в 75 кВт (по данным ООО «ТЭЭМП» [14], производимые этой компанией единичные суперконденсаторные элементы позволяют принимать или отдавать ток до 750 А при емкости 3 000 Ф). Дальнейшие расчетно-аналитические исследования стабилизации работы ДГУ в пределах оптимального диапазона КИУМ проводились с использованием характеристик такого суперконденсаторного модуля.



**Рис. 7 –** Зависимость КИУМ ДГУ от времени для уровня детализации 2 скорости ветра при различной энергоемкости суперконденсаторного модуля  
**Fig. 7 –** Diesel genset load coefficient vs time for different supercapacitor module size (level of detail 2)

Расчет совместной работы ВЭГ, ДГУ и СК показал, однако, что энергоемкость суперконденсаторного модуля 171 Вт·ч недостаточна для сглаживания пульсаций, уводящих КИУМ ДГУ ниже 0,4 (см. рис. 7). Согласно проведенным расчетам, более оптимальной является энергоемкость суперконденсаторного модуля 324 Вт·ч. Однако дальнейшее наращивание энергоемкости СК не ведет к сокращению потребления топлива (рис. 8). Другими словами, при заданном режиме ветра интегральная избыточная

энергия, выработанная ВЭГ и ДГУ, меньше интегрального недостатка энергии для покрытия нагрузки, и в этом случае дальнейшее наращивание емкости СК не дает снижения расхода топлива. Этот результат отражается на графике зависимости расхода топлива от энергоемкости СК. Выход на плато зависимости расхода топлива от емкости СК является сигналом к прекращению процесса оптимизации СК. В этом случае для еще большего снижения расхода топлива следует увеличивать мощность ВЭГ.





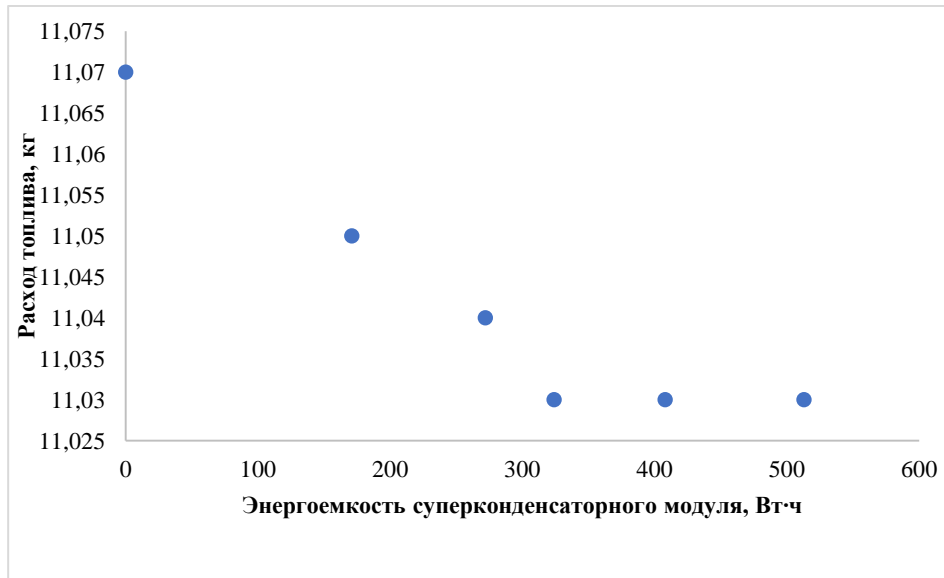


Рис. 8 – Зависимость расхода топлива за расчетный период от энергоемкости суперконденсаторного модуля для уровня детализации 2

Fig. 8 – Dependence of fuel consumption for the calculation period on the energy capacity of the supercapacitor module for the level of detail 2

Для парирования бросков мощности может быть использована не только суперконденсаторная, но и аккумуляторная батарея. В последнем случае необходимо учесть предельные токи этой батареи. Так, при мощности 29 кВт и напряжении 220 В максимальный ток нагрузки составит 131 А, то есть с учетом ограничений по предельным токам речь идет об энергоемкости в 1 310 А·ч для свинцово-кислотной батареи и в 262 А·ч для литий-ионной, или 290 кВт·ч и 58 кВт·ч соответственно. При среднерыночной стоимости аккумуляторов этих типов 0,2 долл./Вт·ч и 0,6 долл./Вт·ч капитальные затраты для рассматриваемого случая составят 58 тыс. \$ и 34,6 тыс. \$ соответственно. Применение суперконденсаторной батареи оптимальной энергоемкости в 324 Вт·ч, даже с учетом высокой удельной стоимости в 40 долл./Вт·ч, потребует только 13 тыс. \$ капитальных затрат. При этом ресурсные показатели суперконденсаторов существенно выше таковых у обоих рассматриваемых типов аккумуляторов: 1 000 тыс. циклов при глубине разряда 75 % против 1,6 тыс. циклов при 40 % у свинцово-кислотных и 3 ÷ 5 тыс. циклов при 70 ÷ 80 % у литий-ионных.

Таким образом, включение суперконденсаторных модулей в состав ветродизельных комплексов в отсутствие аккумуляторных батарей большой энергоемкости представляется обоснованным, поскольку помогает сгладить пульсации, возникающие ввиду изменений скорости ветра, и обеспечить работу дизель-генератора в более комфортном режиме с продлением его срока службы. Кроме того, суперконденсаторный модуль может иметь преимущество перед аккумуляторной батареей за счет более высоких допустимых токов заряда/разряда. Дальнейшее обоснование этого положения может быть проведе-

но на основе алгоритма 2 за более длительные интервалы времени (в идеале за год) с высокой детализацией данных о скорости ветра.

#### 4. Заключение

Представлена методика оценки экономии дизельного топлива для автономной ветродизельной установки с накопителями различного типа с учетом графика нагрузки потребителя и ветровых условий местности. Основной задачей являлось выявление возможности и необходимости использования СК для оптимизации работы ДГУ с точки зрения потребления топлива. В основе методики лежит простая балансовая модель, последовательно применяющая два алгоритма расчета в зависимости от детализации исходных данных о скорости ветра: на трехчасовых данных оптимизируется состав ДГУ по критерию оптимальности КИУМ; на основе данных о скорости ветра с детализацией до 2 сек. проводится оптимизация энергоемкости суперконденсаторного блока. Расчеты проводились для п. Усть-Воямполка Камчатского края. Данные о скорости ветра с детализацией до 3 ч были взяты из доступных метеорологических баз данных, детальные (2 сек.) последовательности скорости ветра синтезированы на основе экспериментальных разовых измерений. При характерных ветровых условиях заданной местности и суточных графиках нагрузок потребителя (максимальная потребляемая мощность в зимние месяцы – 100 кВт; минимальная в летние – 25 кВт) оптимальная емкость суперконденсаторной батареи в составе ветродизельной установки составляет 324 Вт·ч. Дальнейшее наращивание емкости СК не обес-



печивает снижения расхода топлива. Сравнение технико-экономических характеристик СК и аккумуляторов с аналогичной энергоемкостью продемонстрировало, что суперконденсаторный модуль имеет преимущество перед аккумуляторной батареей за счет стоимостных и ресурсных показателей, а также более высоких допустимых токов заряда/разряда.

#### Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ. Проект № 16-08-01233.

#### Acknowledgment

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research. Project № 16-08-01233.

#### Список литературы

[1] Киселева, С.В. Потенциальные потребители энергии от возобновляемых источников в децентрализованных регионах России / С.В. Киселева // Труды II Международной конференции «Рациональное природопользование: традиции и инновации» МГУ им. М.В. Ломоносова. 17–18 ноября 2017 г./ С.В. Киселева, Н.А. Комарова, А.Б. Тарасенко, Т.С. Габдерахманова. – М., 2017. – С. 91–95.

[2] Koussa, D.S. Hybrid diesel-wind system with battery storage operating in standalone mode: Control and energy management-experimental investigation / D.S. Koussa [et al.] // Energy. – 2017. – Vol. 130. – P. 38–47.

[3] На Камчатке открыт крупнейший на Дальнем Востоке ветроэнергетический комплекс: Пресс-релиз ПАО «РАО Энергетические системы Востока» от 10.09.2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rao-esv.ru/press-room/news/12966/>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 14.05.2018).

[4] Разработка методов и интеллектуальных технологий автономного энергоснабжения на основе традиционных и возобновляемых источников энергии для суровых климатических условий: Отчет по Соглашению № 14.577.21.0066 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fp7-energy.ru/conf/9.12/Elistratov.pdf>. – (Дата обращения: 20.05.2018).

[5] Hu, Y. Optimization of a hybrid diesel-wind generation plant with operational options / Y. Hu, P. Solana // Renewable Energy. – 2013. – Vol. 51. – P. 364–372.

[6] Завалишин, В.В. Экономия топлива при генерации электроэнергии дизель-генераторной установкой с переменной частотой вращения дизеля / В.В. Завалишин // Вестник СГТУ. – 2010. – № 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomiya-topliva-pri-generatsii-elektoenergii-dizel-generatornoy-ustanovkoys-peremennoy-chastotoy-vrascheniya-dizelya> – (Дата обращения: 18.06.2018).

[7] Матиевский, Г.Д. Анализ показателей работы дизеля по характеристике постоянной мощности / Г.Д. Матиевский, С.П. Кулманов // Ползуновский вестник. – 2010. – № 1. – С. 13–10.

[8] Информационно-аналитический портал «Камчатка-Информ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kamchatinfo.com/news/kolhoz/detail/20924/>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 14.04.2018).

[9] Расписание погоды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.rp5.ru](http://www.rp5.ru) – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 28.06.2018).

[10] NASA SSE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov+s01#s01>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 21.04.2018).

[11] Игнатъев, С.Г. Новые методы оценки энергии ветра и оптимизации параметров ветроэнергетических установок / С.Г. Игнатъев – М.: Издательство «Шанс», 2016. – 632 с.

[12] ВНАО. Еженедельник собрания депутатов ненецкого автономного округа. – Выпуск № 35 (365) 6 ноября 2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vnao.ru/news/zdes-vihrya-potok-prevrashchaetsya-v-tok>. – (Дата обращения: 10.05.18).

[13] Сайт компании GhrePower [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.ghrepower.com/en/wind-power.php?cid=23#23](http://www.ghrepower.com/en/wind-power.php?cid=23#23). – (Дата обращения: 22.12.2017).

[14] Сайт компании «ТЭЭМП» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.teemp.ru](http://www.teemp.ru). – (Дата обращения: 11.06.2018).

#### References

[1] Kiseleva S.V., Komarova N.A., Tarasenko A.B., Gabderakhmanova T.S. Potential energy consumers from renewable sources in decentralized regions of Russia (Potentsial'nyye potrebiteli energii ot vobnovlyayemykh istochnikov v detsentralizovannykh regionakh Rossii). *Proceedings of the II International Conference "Rational Nature Management: Traditions and Innovations" of the Moscow State University*. November 17–18, 2017. Moscow, 2017; pp. 91–95 (in Russ.).

[2] Koussa D.S., Koussa M., Rennane A., Hadji S., Boufertella A., Balehouane A., Bellarbi S. Hybrid diesel-wind system with battery storage operating in standalone mode: Control and energy management-experimental investigation. *Energy*, 2017;130:38–47.

[3] The largest in the Far East wind energy complex was opened in Kamchatka (Na Kamchatke otkryt krupneyshiy na Dal'nem Vostoke vetroenergeticheskiy kompleks) [E-resource]. Available on: <http://www.rao-esv.ru/press-room/news/12966/> (05.14.2018) (in Russ.).

[4] Development of methods and intelligent technologies for autonomous power supply based on traditional and renewable energy sources for severe climatic conditions (Razrabotka metodov i intellektual'nykh tekhnologiy avtonomnogo energosnabzheniya na osnove traditsionnykh i vobnovlyayemykh istochnikov energii dlya surovyykh klimaticheskikh usloviy) [E-resource]. Available on: <http://www.fp7-energy.ru/conf/9.12/Elistratov.pdf> (05.20.2018) (in Russ.).



[5] Hu Y., Solana P. Optimization of a hybrid diesel-wind generation plant with operational options. *Renewable Energy*, 2013;51:364–372.

[6] Zavalishin V.V. Fuel economy in the generation of electricity by a diesel generator set with a variable speed of the diesel engine (Ekonomiya topliva pri generatsii elektroenergii dizel'-generatornoy ustanovkoy s peremennoy chastotoy vrashcheniya dizelya). *Vestnik SGTU*, 2010, no. 1 [E-resource]. Available on: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomiya-topliva-pri-generatsii-elektroenergii-dizel-generatornoy-ustanovkoy-s-peremennoy-chastotoy-vrashcheniya-dizelya> (06.18.2018) (in Russ.).

[7] Matievsky G.D. An analysis of the performance of a diesel engine with a constant power characteristic (Analiz pokazateley raboty dizelya po kharakteristike postoyannoy moshchnosti). *Polzunovsky vestnik*, 2010;1:13–10 (in Russ.).

[8] Informational and analytical portal “Kamchatka-Inform” [E-resource]. Available on: <https://kamchatinfo.com/news/kolhoz/detail/20924/> (04.14.2018) (in Russ.).

[9] Reliable prognosis. Rp5.ru [E-resource]. Available on: [www.rp5.ru](http://www.rp5.ru) – (28.06.2018) (in Russ.).

[10] NASA SSE. [E-resource]. Available on: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov+s01#s01> (04.21.2018).

[11] Ignatiev S.G. New methods for estimating wind energy and optimizing the parameters of wind power plants (Ignat'yev, S.G. Novyye metody otsenki energii vetra i optimizatsii parametrov vetroenergeticheskikh ustanovok) – Moscow: Publishing house “Chance”, 2016, p. 632 (in Russ.).

[12] Weekly meeting of deputies of the Nenets Autonomous District. 06.11.2015. № 35 (365) [E-resource]. Available on: <http://vnao.ru/news/zdes-vihrya-potok-prevrashchaetsya-v-tok> (05.10.18) (in Russ.).

[13] Website of the company GhrePower [E-resource]. Available on: [www.ghrepower.com/en/wind-power.php?cid=23#23](http://www.ghrepower.com/en/wind-power.php?cid=23#23) (12.22.2017).

[14] Website of the company “TEEMP” [E-resource]. Available on: [www.teemp.ru](http://www.teemp.ru) (06.11.2018) (in Russ.).

Транслитерация по BSI



## Всероссийская конференция «ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ: ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ»

Уважаемые коллеги!

От имени Оргкомитета приглашаем Вас принять участие во II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития», которая состоится 19–20 декабря 2018 года в Санкт-Петербурге. В рамках конференции запланированы профильная выставочная экспозиция и школа-семинар по современным техническим средствам измерений и методам анализа и интерпретации данных в гидрометеорологии и экологии.

### Тематика конференции:

- Изменения климата
- Методы прогноза гидрометеорологических характеристик
- Совершенствование технических средств и методов гидрометеорологических измерений
- Актуальные вопросы метеорологии
- Гидрология и управление водными ресурсами
- Фундаментальные и прикладные аспекты океанологии
- Экология и рациональное природопользование
- Экономика и управление морской деятельностью
- Нарращивание потенциала в области образования в сфере гидрометеорологии

К началу работы Конференции будет подготовлен и опубликован в печатном и электронном виде сборник докладов «Труды II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития».

По вопросам участия просим обращаться в Дирекцию конференции:  
Светлана Николаевна Иконская – Генеральный директор Организации деловых мероприятий ООО «Инпроэкспо»  
Алексей Вадимович Зимин – Заместитель Председателя Программного комитета Конференции доктор географических наук, доцент  
Телефон: +7 960 286 52 80; e-mail: [info@mgo-spb.ru](mailto:info@mgo-spb.ru)

[meteoinfo.ru](http://meteoinfo.ru)

