

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ДЛЯ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ АРКТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Р.Н. Шульга¹, Т. С. Смирнова¹

¹ Всероссийский электротехнический институт-филиал федерального государственного унитарного предприятия «Российский Федеральный Ядерный Центр- Всероссийский научно- исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина», г. Москва

✉ rnshulga@vei.ru

Рассмотренные характеристики Северного морского пути (СМП), атомных ледоколов и их судовой энергетики показывают целесообразность энергоснабжения береговых потребителей с использованием судовых реакторных устройств (РУ) типа атомных станций малой мощности (АСММ), что позволяет унифицировать и тиражировать энергоустановки. Для Арктики и СМП применение АСММ, дополненной шиной постоянного тока и наличием накопителей, является безальтернативным решением в части автономии, снижения выброса диоксидов углерода и азота, отсутствием обслуживания и дистанционным цифровым управлением. Рассмотренные альтернативные варианты энергообеспечения стационарных и мобильных установок наземного, надводного и подводного базирования на сжиженном природном газе (СПГ) предусматривают использование авиационных газовых турбин мощностью до 5 МВт, а для установок морского базирования корабельных газовых турбин мощностью от 30 МВт с применением накопителей электроэнергии, мощность которых зависит от пиковой мощности потребителей. Приведены структура и состав мобильного модульного комплекса жизнеобеспечения (ММКЖ) в составе подводного или надводного энергомодуля с управляемым выпрямителем, выход которого соединен биполярным подводным кабелем постоянного тока с береговыми модулями преобразования, накопления и распределения. Выходы последнего наземными биполярными кабелями связаны со входами модулей водоподготовки и воздухоподготовки, а также производственными и вспомогательными модулями. Комплекс напряжением от 1 до 10 кВ мощностью от 1 до 10 МВт создается с использованием преобразователей тока и напряжения, накопителей электроэнергии, выключателей и кабелей постоянного тока, оснащается цифровыми устройствами управления.

Ключевые слова: атомный ледокол, энергоснабжение, энергоустановка, шина постоянного тока, накопитель электроэнергии, жизнеобеспечение.

USE OF SHIP POWER FOR LIFE SUPPORT OF ARCTIC FACILITIES

R.N. Shulga¹, T. S. Smirnova¹

¹ All-Russian Electrotechnical Institute-Branch of Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics named after Academician E. I. Zababakhin,» Moscow, Russia

The considered characteristics of the Northern sea route (NSR), nuclear icebreakers and their ship power engineering show expediency of power supply of coastal consumers with use of ship reactor devices (RU) of type of nuclear power plants of small power (ASMM) that allows to unify and replicate power installations. For the Arctic and the NSR, the use of ASMM, supplemented by a DC bus and the presence of storage devices is an alternative solution in terms of autonomy, reducing the emission of carbon dioxide and nitrogen, lack of maintenance and remote digital control. The alternative options of energy supply stationary and mobile installations of ground, surface, and submarine-based liquefied natural gas (LNG) include the use of aviation gas turbines

up to 5 MW, and for sea-based vehicular gas turbines of 30 MW using energy storage devices, the capacity of which depends on the peak power of the consumers. The structure and composition of a mobile modular life support complex (MMCF) as part of an underwater or surface power module with a controlled rectifier, the output of which is connected by a bipolar underwater DC cable to the shore conversion, accumulation and distribution modules, are presented. The outputs of the latter are connected by ground bipolar cables to the inputs of the water and air treatment modules, as well as production and auxiliary modules. The complex with voltage from 1 to 10 kV with power from 1 to 10 MW is created using current and voltage converters, energy storage, switches and DC cables, equipped with digital control devices. The possibility of terminating the transit of reactive power with sufficiently intense geomagnetic disturbances.

Keywords: nuclear icebreaker, power supply, power plant, DC bus, electricity storage, life support.

Статья получена: 05.11.2019

Принята к публикации: 11.12.2019

Опубликована онлайн: 25.03.2020

Характеристики северного морского пути и осваиваемых территорий

Северный морской путь (СМП), так же, как и Арктика – это национальный и глобальный проект России в 21-ом веке, который требует мобилизации всех ресурсов страны, освоения новых технологий для достижения главной задачи: подъема экономики, повышения благосостояния народа и защиты северных рубежей протяженностью 23 тыс. км. Протяженность СМП от проливов архипелага Новая

Земля и бухтой Провидения (Тихий Океан) – 5600 км. Маршрут охватывает 5 морей и 10 портов от Мурманска до бухты Провидения с добавлением новых портов Сабетта, Хатанга и др. для вывоза нефти, сжиженного природного газа (СПГ), угля (антрацита) с Таймыра, руды и золота. Схема СМП, приведенная на (рис. 1), достаточно наглядно показывает направление потока грузов в обоих направлениях, что важно для круглогодичной эксплуатации СМП.



Рисунок 1 – Схема СМП с обозначением основных портов и выгоды его использования [1].

Расстояние от Санкт-Петербурга до Владивостока через СМП – 14 тыс. км, а через южные моря и Суэцкий канал – 23 тыс. км, и, соответственно, фрахт занимает 23 суток против 45 суток. Грузооборот СМП резко нарастает, и если в 2013 г. он составлял 2,8 млн. т, то в 2016 г. – 6,9 млн. т, а в 2020 г. составит 30 млн. т, причем из них 16 млн. т – вывоз из «Ямал-СПГ». К 2030 г. вывоз угля из Таймыра в Китай достигнет 30 млн. т. При круглогодичной навигации к 2021 г. ожидается перевозка до 40 млн. т, а к 2025 г. – до 75 млн. т. [1]

Сегодня, по словам генерального директора ФГУП «Атомфлот» В. Рукши, объем вывоза СПГ должен составить 40 млн. т, газового конденсата – 5 млн. т. Себестоимость доставки 1 т СПГ в порт Кобе (Япония) через Суэц – 96 долл., а по СМП – 58 долл.; в порт Яньтань (Китай) – 91 долл., а по СМП – 64 долл. Разница в 20-25 долл. за тонну позволяет нарастить парк ледоколов и инфраструктуру портов. [1]

Богатства недр шельфа и арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) столь значительны, что возникает задача их освоения и защиты в условиях потепления климата [2]. Карта (рис. 2) показывает лицензионные участки (ЛУ) на

шельфе АЗРФ и др. морях «ПАО «НК Роснефть», которые дают представление о перспективах освоения СМП только по нефти. Вывоз нефти из Карского моря через Хатангу на уровне 50 млн. требует использования танкеров водоизмещением по 100 тыс. тонн для прохода от Обской губы до Сабетты [2].

Западно-Приновоземельский ЛУ содержит 1,4 млрд. т нефти и 1,8 трлн. куб. м газа, Восточно-Приновоземельский ЛУ – 130 млн. т нефти и 500 млрд. куб. м газа [2].

Штокмановское месторождение объемом 4 трлн. куб. м газа и 60 млн. т газового конденсата является крупнейшим в мире [2].

Павловское рудно-металлическое месторождение на острове Южный (архипелаг Новая Земля) входит в пятерку крупнейших в РФ, принадлежит «Атомредметзолоту» и должно давать до 70 тыс. т цинкового концентрата в год. Предполагаемая смета горно-обогатительного комбината (ГОК) – 22 млрд. руб., порта – до 6 млрд. руб. Освоение предполагается к 2019-2021 гг., потребляемая мощность – до 40 МВт, персонал – 500 человек, работающих вахтовым методом [3].



Рисунок 2 – Карта лицензионных участков «ПАО «НК Роснефть» на шельфе морей [1].

Целью написания настоящей статьи является анализ потребностей инфраструктуры СМП и предложение по использованию атомных станций малой мощности (АСММ) для локальных систем энергоснабжения береговых потребителей, а также описание мобильного модульного комплекса жизнеобеспечения арктических объектов.

Атомные ледоколы для СМП

Освоение СМП без ледокольного флота нереально, и только атомные ледоколы могут обеспечить круглогодичную проводку судов, особенно в восточной зоне Арктики. Первый атомный ледокол «Ленин» был построен в 1959 г., прослужил 30 лет с непрерывной эксплуатацией в течение одного года, после чего впервые в нем была осуществлена замена реакторной установки (РУ) на другую установку. Затем последовало строительство 6 ледоколов типа «Арктика» (второе поколение), которые отличались двухкорпусным исполнением, между корпусами которых располагались цистерны для водобалластировки, с автономностью до 8 месяцев. Были реализованы два типа судов: «Россия» с двумя РУ, мощностью 75 тыс. л.с.; «Таймыр» и «Вайгач» с 1 РУ, мощностью 40 тыс. л.с., которые имели меньшую осадку для прохода через устья рек.

В 90-х годах прошлого века как Военно-морской флот (ВМФ), так и ледокольный флот претерпели большой урон. Из 243 атомных подводных лодок (АПЛ) к началу века осталось 50 АПЛ, а 185 были выведены из состава ВМФ. 3 ледокола были выведены из эксплуатации в связи с сокращением северного завоза.

В настоящее время ФГУП «Росатомфлот» располагает семью атомными судами и осуществляет следующие задачи: северный завоз; освоение новых проектов в интересах Минобороны, ГК Росатом в части Павловского месторождения, проектов нефтегазовых и угольных компаний по проводке их судов.

Для реализации указанных задач по проекту 22220 строятся ледоколы ЛК-60 типа «Арктика» («Урал», «Сибирь») (третье поколение) мощностью 60 МВт, водоизмещением 33,5 тыс. т с системами электро-

движения (СЭД), преодолевающие льды толщиной до 3 м. Следующее четвертое поколение будет реализовано на основе ледокола типа «Лидер». Технические характеристики ледокола «Лидер», (проект 10510) по данным центрального конструкторского бюро (ЦКБ) «Айсберг»: водоизмещение – 71380 т, длина – 209 м, ширина – 47,7 м, осадка – 13 м, РУ – РИТМ 400 тепловой мощностью – 315 МВт, мощность на винтах – 120 МВт, автономность (по провизии 8 месяцев), ледопроездимость – 4,3 м на скорости 2 узла, 2,0 м на скорости 15 узлов. Концепция «открытой кормы» для подобных судов разных классов позволяет разместить на корме легкоъемные боевые модули разных типов. К 2035 году предусматривается использование 8 атомных ледоколов 4 поколения и свыше 100 танкеров и газозовов водоизмещением до 100 тыс. т. [1].

Реакторные установки малой мощности

По терминологии Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) РУ мощностью до 300 МВт относятся к типу малой мощности, которые классифицируются как АСММ. В тоже время по типу нагрузок малыми считаются нагрузки до 30 МВт. Мировой интерес к АСММ обусловлен потребностями большинства стран в источниках малой мощности для выработки электричества, тепла и холода, опреснения воды на основе технологических решений без выброса диоксидов углерода, с быстрым вводом в эксплуатацию (1 год вместо 5 лет как для крупных атомных электростанций (АЭС) [4].

Большие массогабаритные показатели ранее разработанных в ГК Росатом сухопутных РУ были преодолены на судовых и подводных РУ. С 1959 по 2018 гг. преимущественно в ОКБМ Африкантова были разработаны 4 поколения РУ. 3 поколение на базе РУ КЛТ-40М и ОК-900А соответственно тепловой мощностью 135 и 170 МВт имели срок службы 25 лет, непрерывной работы – 8 тыс. час. 4 поколение РУ РИТМ-200 с мощностью блоков по 175 МВт должно иметь срок службы 40 лет, непрерывной работы – 26 тыс. час [4].

НИКИЭТ разработал РУ Шельф тепловой мощностью 6,4 МВт, непрерывной работой 5 тыс. час. в наземном и подводном варианте с ориентировочной стоимостью 10 руб./кВтч.

ОКБМ Африкантова и ЦКБ Рубин еще до перестройки разработали подводный энергокомплекс РУ Айсберг тепловой мощностью 24 МВт, непрерывной работой 8 тыс. час. с подводными буровыми, сейсморазведкой, охраной и др. модулями.

«Инжиниринговая компания инновационных проектов ИКИП» разработала АСММ мощностью от 0,1 до 1 МВт для обеспечения буровых станций связью, бытовыми условиями и др. нуждами [2].

Частно-государственная компания «АКМЭ-Инжиниринг» разработала и строит АСММ со свинцово-висмутовым теплоносителем на быстрых нейтронах СВБР-100 и СВБР-10, предназначенные для гражданского применения и для нужд Арктики, потенциальный объем мирового рынка которого оцениваются в 600 млрд. долл.

Промышленное производство СПГ и морские терминалы погрузки СПГ также возможно питать АСММ надводного и подводного базирования. В результате, для энергообеспечения Арктики, уже сегодня можно использовать более

20 типов АСММ мощностью 0,1; 1; 10; 30 МВт, т.е. весь диапазон малой генерации и малых нагрузок, характерных для Арктики (в связи с малочисленностью населения).

На (рис. 3) приведен схематический чертёж АСММ «УниTERM» разработки НИКИЭТ, которая может быть применена в вариантах морского, подводного и сухопутного базирования [4].

Предполагается, что РУ 4 поколения на быстрых нейтронах типа СВБР-100 и СВБР-10 с использованием МОКС топлива смогут закрыть проблему АСММ различного назначения и, несмотря на большую стоимость сравнительно с водо-водяными РУ, стать базовыми за счёт их широкого тиражирования, безопасности эксплуатации и удешевления топлива за счёт работы по замкнутому циклу. На (рис. 4) приведён схематический чертёж реакторного моноблока СВБР-100 разработки «АКМЭ-Инжиниринг».

Характеристики СВБР-100 приведены в (табл.1) [5].

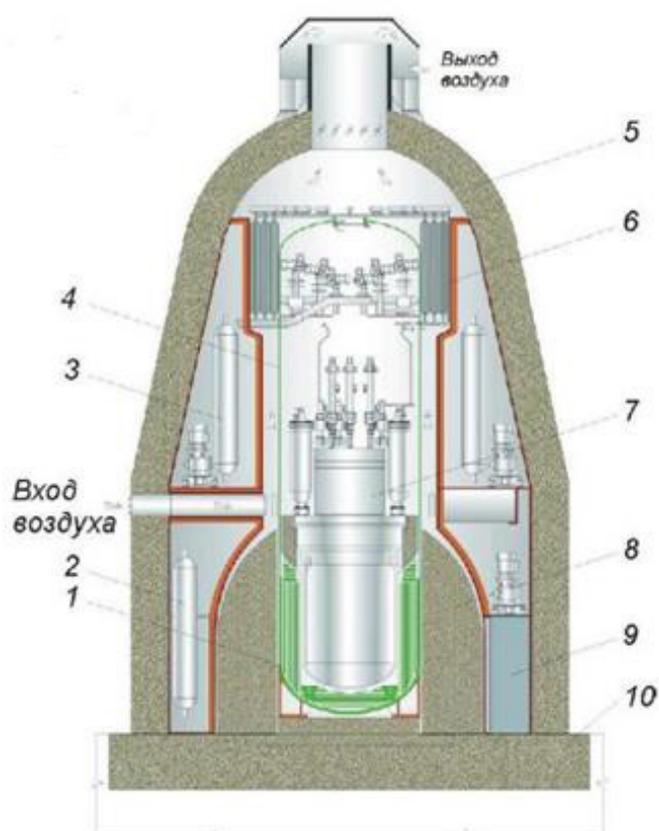


Рисунок 3 – Схематический чертёж АСММ «УниTERM» разработки НИКИЭТ, где
 1- Бак железобетонной защиты
 2- Баллоны хранения газообразных радиоактивных отходов
 3- Система подачи жидкого поглотителя
 4- Защитная оболочка
 5- Оболочка противударной защиты
 6- Теплообменник системы расхолаживания
 7- Парогенерирующий агрегат
 8- Блоки радиационной защиты
 9- Хранилище жидких и твердых радиоактивных отходов
 10- Фундамент

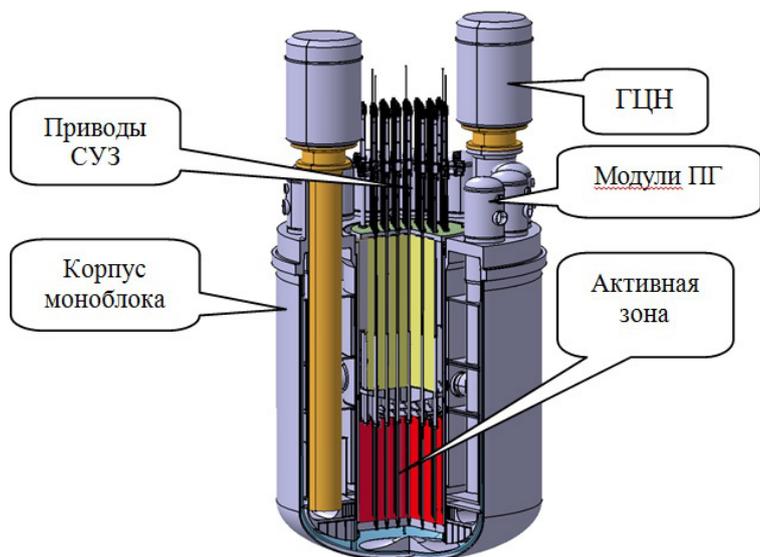


Рисунок 4 – Реакторный моноблок СВБР-100 [5], где

ГЦН – главный циркуляционный насос,
ПГ – парогенератор,
СУЗ – система управления и защиты

Таблица 1

Характеристика	Единица измерения	Значение
Мощность РУ тепловая	МВт	280
Мощность электрическая	МВт	100
Давление генерируемого насыщенного пара	МПа	7,0
Паропроизводительность	т/ч	580
Теплоноситель 1 контура состав 44,5% Pb + 55,5% Bi:		
Температура теплоносителя 1 контура, вх/вых	°С	340 / 490
Кампания активной зоны	тыс. эфф.ч	50
Топливо: тип		
среднее обогащение по U-235	%	20
максимальное обогащение по U-235 по UO2	%	16,3
Интервал времени между перегрузками	лет (одномоментная перегрузка всего топлива)	7 – 8
Габариты МБР (диаметр/высота)	м	4,53 / 7,86

Электрические суда и их энергетика

Судовые электроустановки обладают высоким коэффициентом полезного действия (КПД), обеспечивают гибкость и повышенную надежность и, что еще более важно, снижают стоимость оборудования. Простота схмотехники, сокращение числа первичных источников энергии, интеграция, гибкость проектных решений и убедительные коммерческие преимущества делают их перспективными для решения предъявленных кораблестроителями требований.

Системы судовых ходовых электроустановок по данным [6] разделяются на три основных направления, а именно:

- гибридные,
- интегрированные (IEP),
- полностью интегрированные (IFEP).
- гибридные установки – это корабельные установки, сходные с фрегатом серии Т23, где применение механического привода сочетается с электрическим приводом;

- IEP-установки, где традиционные источники энергии, используемые на корабле, заменяются на чисто электрические источники. В качестве примера можно привести эсминец серии Т45, танкеры серии АО и десантные корабли LPD(R);
- IFEP-установки, где концепция электрических источников энергии развивается дальше путем применения силовой электроники и элементов накопления электроэнергии, что дает дополнительные преимущества по стоимости и оперативным характеристикам;

В настоящее время термины электрокорабль и военный электрокорабль обозначают отдельные категории:

- электрокорабль – объединяет в себе усовершенствованные первичные источники энергии и развитую систему электрификации, встроенную в архитектуру IFEP;
- военный электрокорабль - электрокорабль, в котором системы наведения и мощное вооружение объединены в единое целое для ис-

пользования всех возможностей мощных систем энергоснабжения [7,8, 9].

На (рис. 5) приведена структурная схема энергоснабжения корабля среднего класса типа эсминца или ледокола. Силовая установка (СУ) содержит 2 ГТУ каждый мощностью 36 МВт (для эсминца Zumwalt) или по 27 МВт для отечественного судна, два дизель-генератора каждый мощностью по 6 МВт, одна-две батареи накопителей энергии НЭЭ в виде конденсаторов, суперконденсаторов и аккумуляторных батарей АБ. Источники в виде синхронных генераторов Г с постоянными магнитами (возможны и сверхпроводящие двигатель-генераторы) через выпрямители В нагружены на униполярную или биполярную сеть постоянного тока высокого напряжения ВН – 6(10) кВ и могут работать с самой высокой частотой вращения. Система автоматического управления комплекса (САУК) осуществляет управление и мониторинг агрегатов по шине САУК.

Цепи собственных нужд информационно-вычислительного комплекса могут содержать секционированную шину низкого напряжения НН – 0,22-0,4 кВ.

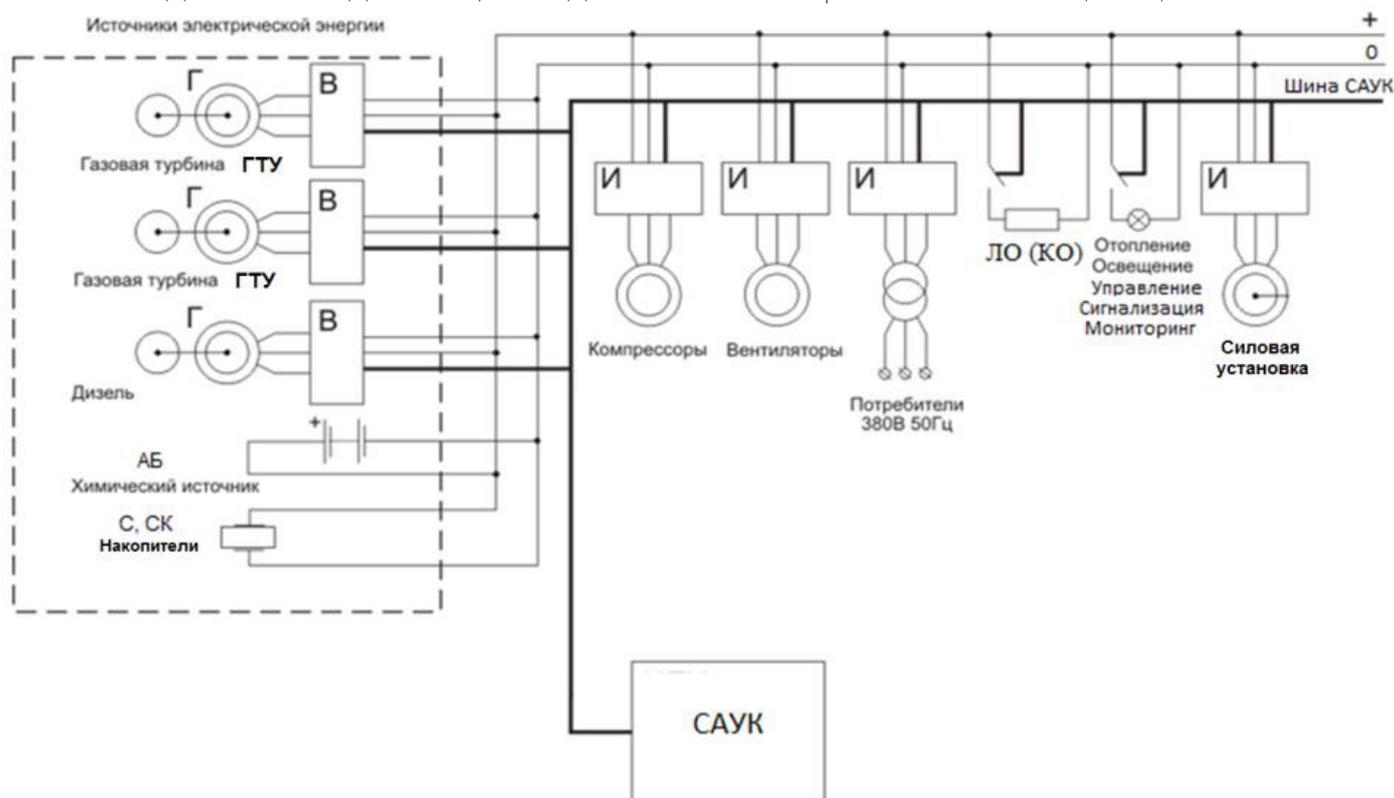


Рисунок 5 – Структурная схема энергоснабжения корабля, где принимаются обозначения: ГТУ-газотурбинная установка, В-выпрямитель, И-инвертор, АБ-аккумуляторная батарея, С, СК-конденсаторы, суперконденсаторы, ЛО (КО)-лазерное (кинетическое оружие), САУК- система автоматического управления комплекса [9]

Питание приводов и различных видов оружия осуществляется от шины ВН. Мощность накопителей электроэнергии (НЭЭ) и аккумуляторных батарей (АБ) выбирается как из условия резервирования СУ, так и с учетом энерговооруженности корабля. Автономность кораблей с ГТУ ограничена запасами топлива, в отличие от ледоколов СМП, где вместо газотурбинных установок (ГТУ) устанавливаются одна или две АСММ с турбогенератором и перегрузкой по топливу через 8 лет. НЭЭ позволяют кораблям осуществить форсировку движения, обеспечивают резервирование по мощности, а для ледоколов – продвижение на лед.

Автономные локальные системы энергоснабжения могут применяться для надводного, подводного и наземного базирования, при этом мощность единичного модуля электропитания составляет 6 МВт при напряжении 6 кВ. Ниже приведены характеристики газотурбинного агрегата ГТА-6/8 РМ производства НПО «Сатурн» (г. Рыбинск) на базе авиационного двигателя Д30КУ/КП (табл.2) [1]. Указанные агрегаты имеют суммарную наработку 55 млн. час. при питании от газа или керосина.

В качестве источника корабельной ГТУ может использоваться ГТУ мощностью 27 МВт, электрической мощностью 12,65 МВт,

Таблица 2

Характеристика	Единица измерения	Значение
Мощность на выходном валу	МВт	6,5
Мощность электрическая	МВт	6
Мощность тепловая	Гкал/час	12,2
КПД (ISO 2314)	%	25,7
Частота вращения	об/мин	3000
Расход дизельного топлива	кг/час	2263
Расход топливного газа	кг/час	1950
Температура газа за турбиной	°С	460
Расход газа на выходе	кг/с	47,3
Габариты (L x B x H)	м	3,4 x 2,3 x 2,5
Масса с рамой	т	5,62

КПД 28,5%, коэффициентом давления 10,5, расходом выхлопа 124 кг/с, температурой выхлопа 487 °С, частотой вращения 5000 об/мин, весом 87 т, габаритами 11,6 x 3,2 x 3,7 м. Назначенный ресурс ГТУ составляет 120 тыс. часов, срок службы 20 лет. Удельная мощность авиационных газовых турбин составляет выше 1000 Вт/кг, корабельных - в 3 раза ниже, а дизель-генераторов - примерно в 5-7 раз ниже.

В качестве источника ледокольной энергоустановки для питания береговых потребителей с помощью плавучего или подводного энергоблока могут использоваться РУ СВБР-100, РИТМ-200. Для Арктики и СМП применение АСММ с шиной постоянного тока и наличием накопителей является безальтернативным решением в части автономии, снижения выброса диоксидов углерода, отсутствием обслуживания и дистанционным цифровым управлением.

Номинальная мощность АБ определяется резервированием энергоснабжения и форсировкой приводов собственных нужд и электродвижения, причем, в качестве основных типов АБ предполагается использование литиевых батарей для мобильных комплексов. Литиевые элементы самые легкие, имеют номинальное напряжение 3,6 В, удельную энергоёмкость 240 Вт.ч/кг, число циклов заряд-разряд 600, диапазон температур $-20 \div +60$ °С. Для стационарных установок, по-прежнему, целесообразно применять никель-кадмиевые батареи. Никель-кадмиевые элементы имеют номинальное напряжение 1,35 В, удельную энергоёмкость 45-60 Вт.ч/кг, число циклов заряд-разряд 1000-1500, диапазон температур $-50 \div +40$ °С, срок службы 20-25 лет и их можно хранить про запас.

В качестве НЭЭ целесообразно использовать металло-пленочные импульсные конденсаторы КПИМ и ИКЧ с высокой удельной энергией - до 0,3 Дж/ч, собственной индуктивностью - примерно 10 нГн и внутренним сопротивлением 10 мОм [3]. Указанные конденсаторы разработаны на напряжение 5-100 кВ с максимальным током 100-300 кА с числом циклом 60-120 тыс. Наряду с конденсаторами возможно применение суперконденсато-

ров (СК), которые накапливают энергию в двойном электрическом слое на поверхности высокопористой наноструктуры. СК имеют емкости от 10 до 12000 Ф рабочим напряжением 1-15 В. Наиболее распространёнными являются полимерные СК с напряжением 2,5-2,7 В, импульсным током 30 А, ёмкостью до 2600 Ф, диапазоном температур $-30 \div +75$ °С. Удельная энергоёмкость СК - до 10 кДж/кг, удельная мощность - 3 Вт/кг [10].

Структура и состав мобильного модульного комплекса жизнеобеспечения (ММКЖ).

Технические решения по использованию модульных комплексов освещены в [11], а экологические аспекты в [12]. На арктических объектах необходимо использовать кабельные линии (КЛ) взамен прокладки воздушных линий (ВЛ) не только в силу большей пропускной способности и надёжности, но в силу большей стойкости к техногенным, природным воздействиям, улучшению экологии в условиях таяния вечной мерзлоты и др. факторам. Особенно это относится к подводной или надводной реализации комплекса. Разработанный в ВЭИ-филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», г. Москва проект «Мобильный модульный комплекс жизнеобеспечения» ММКЖ [13] позволяет обеспечить потребителей не только электричеством, но, и, теплом, холодом, водой, (по потребности - воздухом). Структурная схема ММКЖ приведена на (рис.6). Сдвоенными линиями показаны водяные и воздушные трубопроводы. Управляемый выпрямитель 4 присоединяется к выходу турбогенератора либо водородного энерго модуля топливного элемента (ТЭ).

Основными модулями ММКЖ являются управляемый выпрямитель 4 и модуль преобразования, накопления и распределения 2. На (рис. 7 и 8) соответственно приведены однолинейные принципиальные схемы модулей 4 и 2, причем модуль 4 встраивается в подводный или надводный энерго модуль 1, для передачи питания на модуль 2 биполярным силовым и оптическим кабелем 6.

На (рис.8) принимаются те же обозначения, что и на (рис.7), но 1- НЭЭ типа

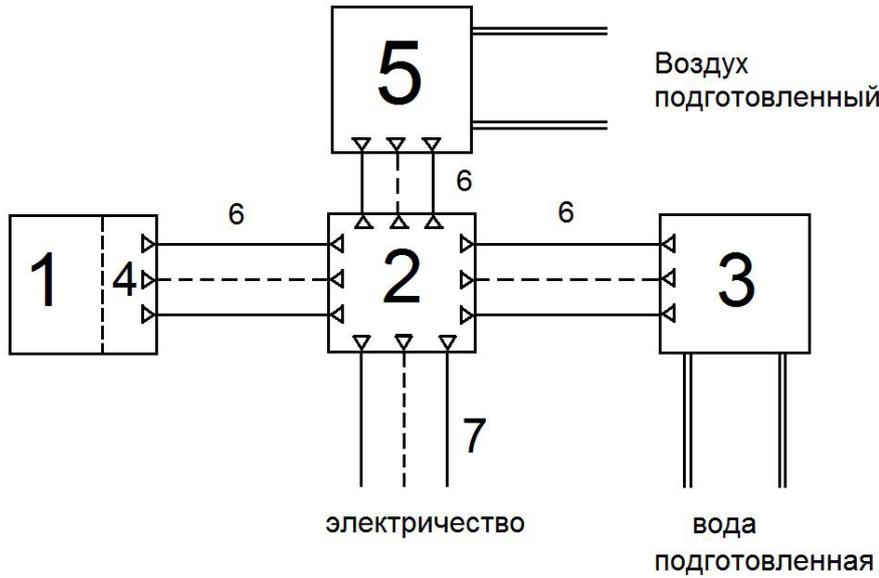


Рисунок 6 – Структурная схема ММКЖ [13], где
 1- атомный энергетический модуль с турбогенератором либо водородный энергомодуль на основе твердооксидных топливных элементов (ТЭ)
 2- модуль преобразования, накопления и распределения электроэнергии
 3- модуль водоподготовки
 4- управляемый выпрямитель
 5- модуль воздухоподготовки
 6- биполярный кабель постоянного тока
 7- трехфазный кабель переменного тока, либо биполярный кабель постоянного тока

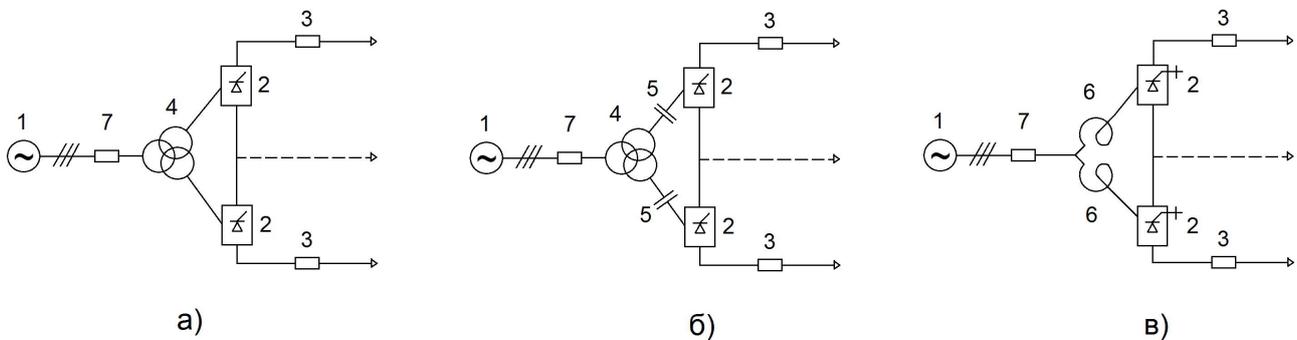


Рисунок 7 – Однолинейная принципиальная схема управляемого выпрямителя 4 (см. рис.6) [13], где

- 1- генератор атомного или водородного энергомодуля,
- 2- преобразователь тока на тиристорах (либо преобразователь напряжения на приборах IGBT или IGCT),
- 3- однополюсный выключатель постоянного тока,
- 4- трансформатор,
- 5- конденсатор,
- 6- реактор,
- 7- трехполюсный выключатель переменного тока

ТЭ или аккумуляторная батарея АБ, а 8- технологический модуль водоподготовки или воздухоподготовки, либо другой по необходимости.

На (рис.8) приведена однолинейная принципиальная схема модуля преобразования, накопления и распределения 2, указанного на (рис.6).

На (рис.7, схема а) соответствуют некомпенсированному преобразователю тока (ПТ), которая наиболее употребима для работы с синхронным генератором 1; схема б) соответствует компенсиро-

ванному преобразователю тока (КПТ) и приспособлена для работы с генератором 1 на постоянных магнитах, с целью регулирования напряжения за счет преобразователя напряжения (ПН) на шинах генератора; схема в) соответствует ПН и позволяет работать с любым типом генератора 1. Наличие трансформатора позволяет осуществить гальваническую развязку и согласовать по напряжению генератор и преобразователь. Применение ПН позволяет отказаться от трансформатора, но примерно на 30 % дороже ПТ.

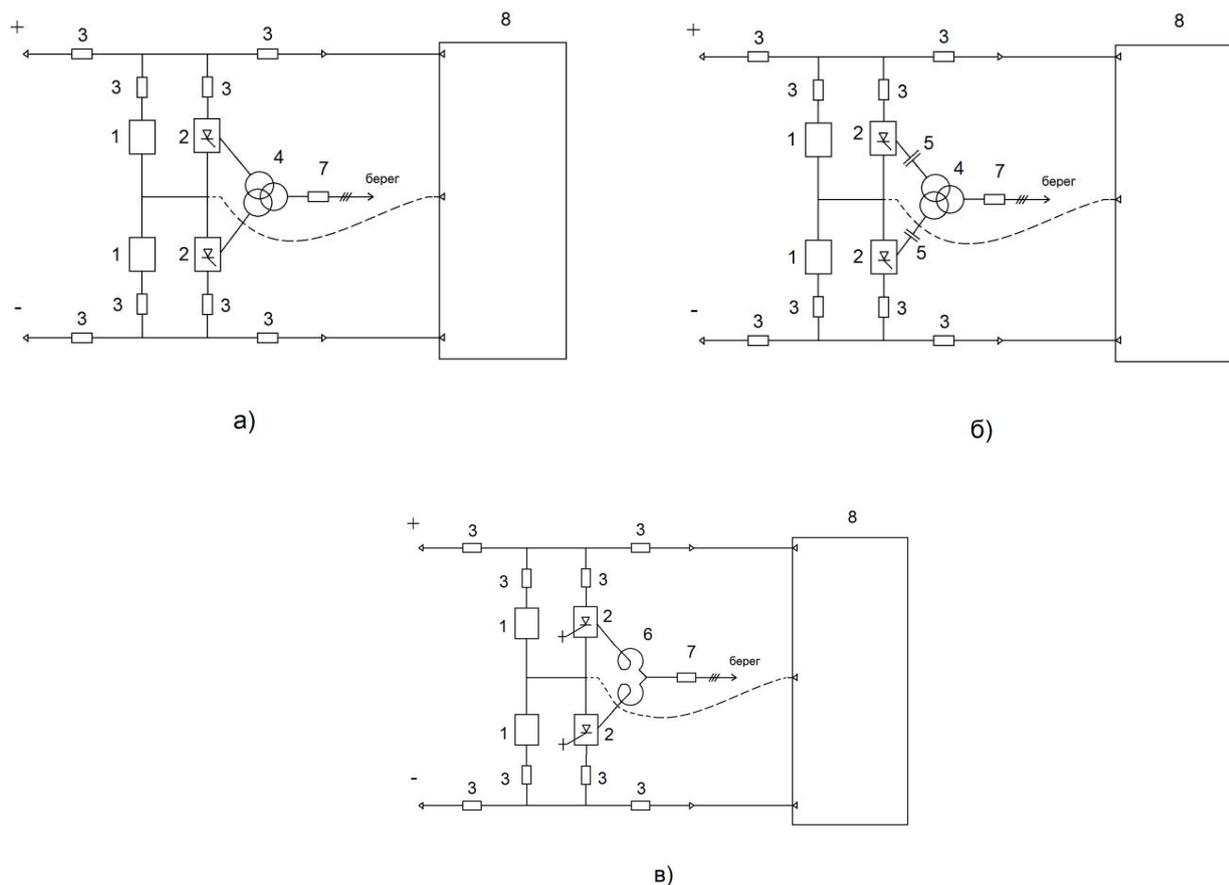


Рисунок 8 – Однолинейная принципиальная схема модуля преобразования, накопления и распределения 2, указанного на (рис.6) [13].

Схемы (рис. 8) аналогичны (рис.7), но работают в инверторном режиме с большим потреблением реактивной мощности и отличаются желательной установкой накопителей 1 вместо генераторов 1 на (рис.7). Если потребители на берегу используют переменный ток (например, при модернизации электроснабжения), то применяются схемы (рис.8). Если система электроснабжения создается вновь, то береговые потребители могут получать постоянный ток непосредственно от шин накопителей 1 при отказе от инверторов 2, показанных на (рис.8). При наличии возобновляемых источников энергии (ВИЭ) они могут подключаться к шинам накопителей 1 непосредственно через выключатели постоянного тока 3.

Подводный биполярный кабель 6, который соединяет подводный энергомодуль 1 (с модулем 4) и береговой модуль 2 (см. рис. 6) может быть как двухпроводным с возвратом тока по морю, так и иметь третий провод (показан пунктиром), который существенно повышает надежность энергоснабжения и обеспечивает безо-

пасность подводных обитателей. Наличие биполярного подводного кабеля постоянного тока 6 на выходе выпрямителя 4 позволяет минимизировать емкость конденсаторов на выходе выпрямителя и повысить надежность электроснабжения при аварии одного полюса выпрямителя или кабеля.

Работа мобильного модульного комплекса жизнеобеспечения

Мобильный модульный комплекс (ММКЖ) работает следующим образом. При доставке комплекса буксиром к месту дислокации (в составе трех-четырех модулей) осуществляется следующее размещение (см. рис.6): модуль 1(4) – на достаточной глубине от промерзания и волнения моря, либо наплаву – на якорях; модули 2,3,5 и др. – на берегу (вдали от линии прибоя и приливов). Затем, на случай дрейфа, с помощью буксира прокладываются подводные кабельные линии постоянного тока 6 между модулями 1 и 2 (см. рис.6). Модули 2,3,5 и выход к береговым потребителям связывают назем-

ными кабельными линиями постоянного тока. После монтажа комплекса осуществляют запуск атомного реактора, либо водородного энергомодуля и вспомогательных устройств; подключение нагрузок; проводят автономные испытания модулей, пробный пуск и проверки комплекса. Нагрузки изменяют ступенями с выдержкой времени и фиксацией в протоколах испытаний. Модуль водоподготовки 3 в связи с большим электропотреблением подключают в последнюю очередь, причем возможна одновременная работа модулей 3 и 5: модуль 5 – днем, модуль 3 – ночью. Аналогично присоединение ВИЭ, например, солнечных батарей, ветровых генераторов и т.п., может происходить по мере необходимости: заряд НЭЭ в модуле 2 – ночью, разряд НЭЭ – днем в пике потребления.

В установленном режиме турбогенератор модуля 1 вырабатывает трёхфазный переменный ток, который выпрямляется управляемым полупроводниковым выпрямителем и по подводным кабельным линиям постоянного тока передается на берег к модулю 2. Модуль 2 передает электричество постоянным током береговым потребителям и, при необходимости, – на модуль 3 для водоподготовки и модуль 5 для воздухоподготовки. Модуль 3 осуществляет забор морской воды через прибрежные трубопроводы, осуществляет водоподготовку и накопление приготовленной воды, в береговых балластных цистернах, включая контроль количества и качества питьевой воды исходя из предполагаемых потребностей. Перед окончанием расхода топлива в модуле 1 и приходом другого заправленного модуля 1, осуществляется полная зарядка НЭЭ в модуле 2, а также присоединение ВИЭ для питания потребителей на время замены модуля 1. Отработавший модуль 1 с помощью буксира доставляется на централизованный пункт заправки топлива.

В нормальных режимах значение передаваемой мощности от модуля 1 задается уставкой мощности от берегового диспетчерского пункта, которая по телеканалу (оптоволокну) передается на модуль 2 и на модуль 1 с разделением этой уставки на две составляющие, с приоритетом в ча-

сти стабилизации предшествующего режима модуля 1. Изменение уставки мощности и режима модуля 1 сопровождается плавным изменением углов управления выпрямителя 4, который с помощью своего регулятора тока изменяет ток в подводном биполярном кабеле в сторону заданной уставки, одновременно изменяя уставку тока регулятора заряда или разряда накопителя модуля 2. Ток биполярного кабеля при симметрии напряжений полюсов выпрямителя модуля 4 в нейтральном кабеле, соединяющем средние точки выпрямителя 4 и модуля 2 отсутствует. При возникновении аварии в одном из полюсов подводного кабеля аварийный полюс мгновенно отключается с помощью его выключателей постоянного тока 3 (рис. 7,8), а уставка тока в регуляторе неповрежденного полюса выпрямителя 4 повышается вдвое, компенсируя снижение вдвое потока активной мощности для потребителей. При этом ток из неповрежденного полюса переходит в нейтральный кабель или при его отсутствии кратковременно протекает по морю. Наличие автоматики перевода в инверторный режим ПИР в управляемом выпрямителе 4 позволяет осуществить отключение поврежденного полюса даже при замене выключателей 3 на разъединители путем их отключения в бестоковую паузу, что сопровождалось бы кратковременным перерывом энергоснабжения потребителей при отсутствии накопителей. Наличие этих накопителей смягчает условия протекания рассматриваемого предельного аварийного режима. Восстановление исходного нормального режима сопровождается предварительным замыканием отключенных выключателей 3 с последующим плавным изменением углов управления аварийного полюса выпрямителя 4 и снижением уставки регулятора тока неповрежденного полюса до исходного значения.

Выводы

Рассмотренные характеристики СМП, атомных ледоколов и их судовой энергетики показывают целесообразность энергоснабжения береговых потребителей с использованием судовых РУ типа АСММ,

что позволяет унифицировать и тиражировать энергоустановки.

Для Арктики и СМП применение АСММ с шиной постоянного тока и наличием накопителей является безальтернативным решением в части автономии, снижения выброса диоксидов углерода и азота, отсутствием обслуживания и дистанционным цифровым управлением.

Рассмотренные альтернативные варианты энергообеспечения стационарных и мобильных установок наземного, надводного и подводного базирования на СПГ предусматривают использование авиационных газовых турбин мощностью до 5 МВт, а для установок морского базирования - корабельных газовых турбин мощностью от 30 МВт с применением накопителей электроэнергии, мощность которых зависит от пиковой мощности потребителей.

Описана структура и состав ММКЖ в составе подводного или надводного энерго модуля с управляемым выпрямителем, выход которого соединен биполярным подводным кабелем постоянного тока с береговыми модулями преобразования, накопления и распределения. Выходы последнего наземными биполярными кабелями связаны со входами модулей водоподготовки и воздухоподготовки, а также производственными и вспомогательными модулями. Комплекс напряжением от 1 до 10 кВ мощностью от 1 до 10 МВт создается с использованием преобразователей тока и напряжения, накопителей электроэнергии, выключателей и кабелей постоянного тока, оснащается цифровыми устройствами управления.

Список литературы:

1. Шульга Р.Н., Петров А.Ю., Завидей В.И. Судовая атомная энергетика, как основа постороеия втономных систем энергоснабжения при освоении арктических территорий// Энергетика. 2019 2(69) С. 93-97
2. Почему Россия и Беларусь должны делать малые АЭС вместе, Малая энергетика для Арктики, СОНАР 2050
3. Марцинкевич Б. Мегапроекты в Арктике без прямого участия государства невозможны, <https://www.geoenergetics.ru>, 04.10.2017
4. Саркисов А.А. Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики: Т. 2 М: Академ-Принт, 2015. 387 с.
5. Комлев О. Г., Тошинский Г. И., Тормышев И. В. СВБР-100: Потенциальная энергия теплоносителя и безопасность АЭС// Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2012. №7.
6. G.T. Little, S.S. Yong, J. M. Newell, Военно-морской корабль 7 поколения//пер. и ред. Местергази В. А. ВЭИ-Принт. 2017
7. Боровиков П. В., Шульга Р. Н. Энергообеспечение нетрадиционных направленных видов наступательного оружия//изд. РАН// 2017
8. Коул Дж. М. Пять видов оружия будущего, которое может изменить характер войны// The National Interest (дата обращения 16.02.2014)
9. Лазерное оружие – реалии настоящего времени. URL: www.arms-expo.ru (дата обращения 02.09.2009)
10. Каталог ООО «Русская технологическая группа 2». URL: <http://www.rustechgroup.ru/rus/index.htm> 2012. (дата обращения 02.09.2009)
11. Шульга Р. Н. , Путилова И. В. Мультиагентные системы постоянного тока с использованием ВИЭ и водородных топливных элементов// Альтернативная электроэнергетика и экология. (ISJAEЕ). 2019. 04-06. С. 65-82.
12. Шульга Р. Н., Путилова И. В., Петров А. Ю. Арктика: экология и водородная электроэнергетика// Альтернативная электроэнергетика и экология.(ISJAEЕ). 2019. 07-09. С.43-62.
13. Шульга Р. Н., Стальков П. М., Кокуркин М. П., Лавринович В. А. Мобильный модульный комплекс жизнеобеспечения. Заявка в Роспатент №2019101084 от10.01.2019

References:

1. Shulga R. N., Petrov A. Yu., Zaviday V. I. Ship nuclear power engineering as a basis for building astronomical power supply systems in the development of Arctic territories.// Energetika. 2019 2(69) 93-97s.
2. Pochemu Rossiya i Belarus' dolzhny delat' malye AES vmeste, Malaya energetika dlya Arktiki, SONAR 2050 (In Russian)
3. Marcinkevich B. Megaproekty v Arktike bez pryamogo uchastiya gosudarstva nevozmozhny, <https://www.geoenergetics.ru>, 04.10.2017 (In Russian)
4. Sarkisov A.A. Atomnye stancii maloj moshchnosti: novoe napravlenie razvitiya energetiki: T. 2 M:

- Akadem-Print, 2015. 387 s. (In Russian)
5. Komlev O. G., Toshinskij G. I., Tormyshev I. V. SVBR-100: Potencial'naya energiya teplonositelya i bezopasnost' AES// Bezopasnost' yadernyh tekhnologij i okruzhayushchej sredy. 2012. №1. (In Russian)
 6. G.T. Little, S.S. Yong, J. M. Newell, Voенно-morskoj korabl' 7 pokoleniya//per. i red. Mestergazi V. A. VEI-Print. 2017 (In Russian)
 7. Borovikov P. V., SHul'ga R. N. Energoobespechenie netradicionnyh napravlennyh vidov nastupatel'nogo oruzhiya//izd. RARAN// 2017 (In Russian)
 8. Koul Dzh. M. Pyat' vidov oruzhiya budushchego, kotoroe mozhet izmenit' harakter vojny// The National Interest (data obrashcheniya 16.02.2014) (In Russian)
 9. Lazernoe oruzhie – realii nastoyashchego vremeni. URL: www.arms-expo.ru (data obrashcheniya 02.09.2009) (In Russian)
 10. Katalog OOO «Russkaya tekhnologicheskaya gruppa 2». URL: <http://www.rustechgroup.ru/rus/index.htm> 2012. (data obrashcheniya 02.09.2009) (In Russian)
 11. SHul'ga R. N., Putilova I. V. Mul'tiagentnye sistemy postoyannogo toka s ispol'zovaniem VIE i vodorodnyh toplivnyh elementov// Al'ternativnaya elektroenergetika i ekologiya. (ISJAEЕ). 2019. 04-06. S. 65-82. (In Russian)
 12. SHul'ga R. N., Putilova I. V., Petrov A. YU. Arktika: ekologiya i vodorodnaya elektroenergetika// Al'ternativnaya elektroenergetika i ekologiya. (ISJAEЕ). 2019. 07-09. S.43-62. (In Russian)
 13. SHul'ga R. N., Stal'kov P. M., Kokurkin M. P., Lavrinovich V. A. Mobil'nyj modul'nyj kompleks zhizneobespecheniya. Zayavka v Rospatent №2019101084 ot10.01.2019. (In Russian)