

«Малая сетевая углеродно-нейтральная энергетика для удаленных территорий РФ на основе микро-АСММ и эффективных электрогенераторов с внешним подводом тепла НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ»

С.В. Иванов, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе



Цель: опережающее развитие Арктических регионов Российской Федерации и Дальнего Востока

- ❖ XVII век - присоединение Сибири и Дальнего Востока к России с выходом к побережьям Северного Ледовитого и Тихого океанов на всем их протяжении до Чукотки на востоке и острова Сахалин на юге – **Ермак, Атласов, Дежнев...**
- ❖ XVIII - XIX века «...Российское могущество прирастать будет Сибирью и Северным океаном...» - **М.В. Ломоносов и Д.И. Менделеев.**
- ❖ XXI век, 2020-2025 гг. «...возможности Российской Федерации будут прирастать Арктическим регионом», «постепенно центр экономического развития сдвигается все восточнее и севернее, т.е. в Арктическую зону РФ и на Дальний Восток» - **В.В. Путин** (Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года, Указы Президента РФ №164 от 05.03.2020 г. и №645 от 28.10.2020, ПЭФ и ВЭФ 2024 г.)

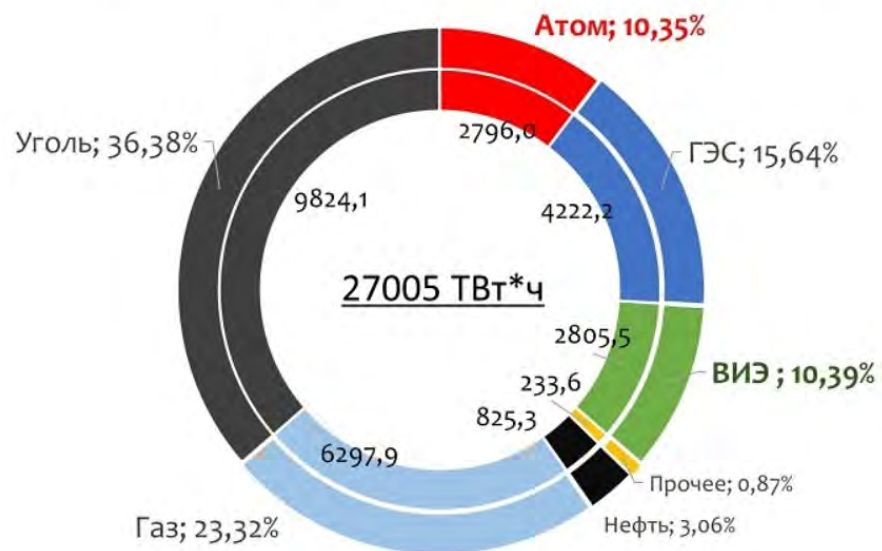
Основные природные ресурсы и полезные ископаемые РФ сосредоточены в труднодоступных районах АЗ РФ и ДВ, на шельфе Сев. Лед. океана в предельно суровых климатических условиях.

Основные задачи по опережающему экономическому развитию АЗРФ и ДВ:

- **Преодоление энергодефицита** для добывающей отрасли, промышленного производства, ЖКХ путем строительства и модернизации объектов локальной генерации в сторону расширения использования эффективных, экологически нейтральных и возобновляемых источников энергии, а также местного топлива (сжиженного и попутного природного газа, угля) с замещением Северного завоза.
- **Обеспечение их всесезонной транспортной доступности** авиа, морским и железнодорожным транспортом (включая и континентальные территории).
- **Расширение современного рынка труда** в Арктическом регионе в сферу высоких технологий за счет **повышения комфорта и качества жизни** населения, создание там ЦОДов.



Производство электроэнергии в мире в 2019 году (% и ТВт*ч)



Основными критериями для выбора способа получения энергии является показатель **EROI** – отношение полученной энергии к затраченной, а также **экологическая нейтральность**.

Энергостанция	EROI
АЭС (от обогащения)	50-105
ГЭС	35-100
На угле	29-31
На газе	28
ВИЭ	< 20 !

- Централизованным сетевым энергоснабжением охвачено не более 35% площади РФ (на 2020 г.)
- Быстрое освоение удаленных территорий возможно лишь путем оперативного (до 1 года) обеспечения автономной электрической и тепловой энергией любого расположенного там объекта по заказу (производства, ЖКХ, портовой структуры СМП, оборонного или навигационного комплекса).
- Для большинства потребителей достаточны энергостанции эл. мощностью 0,2-5 МВт (до 10 МВт тепл.), мобильные (транспортировка водная, ж/д или авиа), компактные, безопасные с подземным или подводным размещением, а также с возможностью модульного масштабирования до 10-20 МВт.

Этим вводным в большей степени удовлетворяют когенерационные микро-АСММ с теплоэлектростанциями нового поколения: преобразователями на основе двигателей с внешним подводом теплоты (ДВПТ).

Основные потребители микро-АСММ с малыми модульными реакторами (ММР)

- ✓ Развивающиеся страны с неразвитыми сетями и недостаточной инфраструктурой;
- ✓ Отдаленные северные регионы со сложным доступом и высокой стоимостью энергии из ископаемого топлива или Северного завоза;
- ✓ Островные территории, горные районы и т. д.
- ✓ Централизованное теплоснабжение и опреснение морской воды;
- ✓ Автономные малые поселения и энергозатратные производственные комплексы, ЦОДы;
- ✓ Удаленные объекты стратегического и оборонного назначения
- ✓ Неэлектрические применения: производство водорода, газификация угля и т.д.;
- ✓ Потребность в сокращении CO₂ выброса



Атомная энергетика: экологическая нейтральность и децентрализация

Атомная и возобновляемая энергетика составляют уже серьезную конкуренцию ископаемым энергоносителям!

- АЭС производят 10-15% электроэнергии в мире (рост замедлился - Чернобыль, Фукусима, но в целом безопасность современных реакторов высока, если снизить влияние чел. фактора)
- ГП РФ "Развитие атомного энергопромышленного комплекса" от 2 июня 2014 года №506-12 (с изменениями от 29 декабря 2021 г.)
- ЕК в 2021 г признала АЭ "чистым источником энергии", или экологически нейтральным. В 2020 г ~30% всего электричества в ЕС вырабатывалось на АЭС.
- Конгресс США – рост финансирования программ ЯЭ в 2020 на \$1,5 млрд, подтверждая, что ядерная энергия является важным фактором снижения выбросов углерода.
- Управляемый термоядерный синтез, используемый в качестве источника быстр. нейтронов для производства ядерного топлива для АЭС, позволит создать гибридную технологию замкнутого цикла – возобновляемый источник энергии БРЕСТ.

Основные тенденции в развитии современной мировой энергетики –
децентрализация энергоснабжения и экологическая нейтральность.

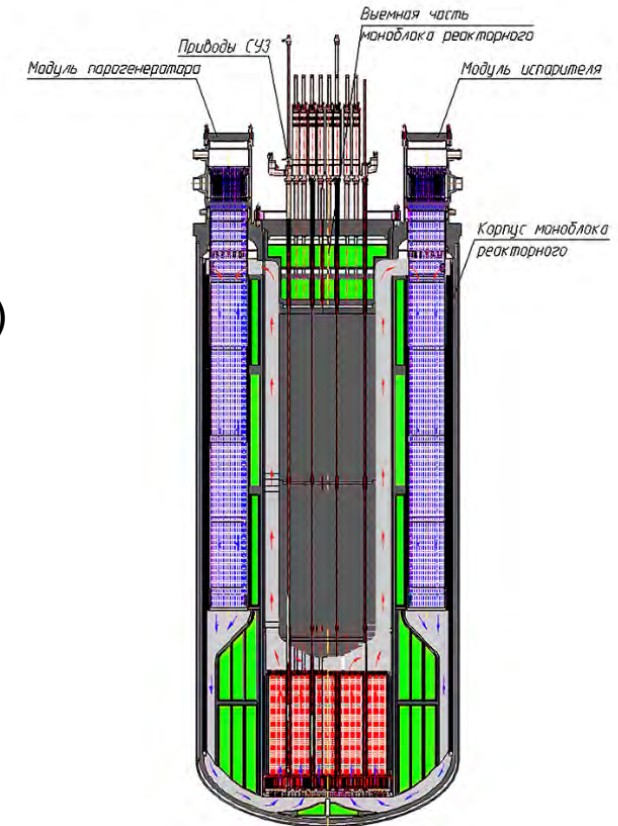
Миниатюризация ЯР в России (эл.мощность):

- ПАЭС «Ломоносов» – 70 мВт
- ГК «Росатом» - соглашение с Якутией о вводе в эксплуатацию в 2030 году пилотной мини-АЭС - 30 МВт.
- АСММ «Шельф» - 10 МВт

- В США «Проект Пеле» - микро-ЯР мощностью 1-5 МВт с газовым охлаждением и высокопробным низкообогащённым урановым топливом и генераторами на основе двигателей Стирлинга
Возможность транспортировки, термостойкость.

Широкий спектр применений: удаленные территории, транспорт, космос, подводные объекты, Лунная станция

- Высокий уровень безопасности реактора СВБР, диапазон электрической мощности: от 1 до 50 МВт (5 МВт – мобильный реактор).
- Высокая температура кипения свинца-висмута (1670°C), низкое давление - исключается кризис теплоотдачи из-за потери теплоносителя в результате его испарения при нарушении герметичности первого контура.
- Химическая инертность Pb-Bi при контакте с водой и воздухом (в отличие от Na-K) исключает возможность химической аварии (АЭС «Монджу») и взрыв водорода (АЭС «Фукусима»).
- Отсутствие изменения объема теплоносителя при плавлении-затвердевании – естественный барьер для выхода радиоактивности, γ -излучения .
- Теплоноситель удерживает в себе йод, цезий и другие продукты деления, кроме газообразных, связывает полоний-210 при разгерметизации 1 контура.
- Естественная циркуляция теплоносителей в контурах (Pb-Bi, пар) достаточна для отвода остаточного тепловыделения.
- Второй контур перегретый водяной пар (530°C). Малая потеря технической воды.
- Использование ядерного топлива различных видов (на оксиде урана, смешанных нитридах, смешанных оксидах), работа в замкнутом ядерном топливном цикле с быстрыми нейтронами.
- Воздухонезависимая автономная система.



ОКБ «ГИДРОПРЕСС» в
сотрудничестве с «АКМЭ-
инжиниринг», НИТИ
им. А.П. Александрова,
«ВНИПИЭТ»

Экологически нейтральные, эффективные теплоэлектрогенераторы с внешним подводом тепла

Предложение ФТИ им. А.Ф. Иоффе в ГК «Росатом» и ФПИ

Цель: Разработать и создать опытные образцы термоэлектрогенераторов нового поколения с внешним подводом тепла и КПД, близким к КПД цикла Карно:

- ✓ работающих от любого источника тепла (ЯР, солнечная энергия, доступное ископаемое топливо)
- ✓ имеющих высокую эффективность (КПД не менее 30%) и плотность мощности до 100 Вт/см^3 (50 Вт/см^2)
- ✓ способных работать в автономном режиме с ресурсом сопоставимым с временем перезарядки ядерного топлива в АСММ
- ✓ бесшумных (уровень шума 60-62 дБ и ниже),
- ✓ анаэробных (способных работать, в космосе, на Луне и под водой)
- ✓ способных обеспечить линейку преобразователей с эл. мощностью моноблока от 16 до 200 кВт и выше
- ✓ Являющихся импортонезависимыми и обеспечивающими технологическое лидерство РФ
- ✓ Простых в изготовлении, относительно дешевых и конкурентоспособных на мировом рынке

В наибольшей степени этому удовлетворяют:

- роторно-лопастной двигатель с внешним подводом теплоты (РЛДВПТ) по циклу Стирлинга
- термоэмиссионный преобразователь (ТЭП), работающий в высокотемпературном бесстолкновительном (кнудсеновском) режиме

Основные технические характеристики ДВПТ по циклу Стирлинга зарубежного производства

Начало истории – XIX век. В мире были созданы и используются ДВПТ поршневого типа. Начало активного развития 1980-1990 гг (Швеция, Германия, США, Япония, Китай): «Philips» (Нидерланды), «General Motors Co», «Ford Motor Co», «NASA Lewis Research Center», «Los Alamos National Laboratory» (США), «MAN-MBW» (Германия), «Mitsubishi Electric Corp.», «Toshiba Corp.» (Япония). С 2015 - «Daimler Benz» и «Cummins Power Generation» (CPG) и др.

Преимущества энергетических станций на основе ДВПТ – высокая эффективность, возможность работы на любом виде топлива, высокий моторесурс, высокий КПД, анаэробность, бесшумность, **согласуется с работой в комплексе с ЯР**

Фирма	Марка	Мощность, кВт	Удельная масса, кг/кВт	Ресурс, ч	Эффективный КПД, %
Philips	4 x 235	150	5,0	10 000	28
	4-S-1210	265	3,8	10 000	30
STM Inc.	STM 4-120	52	2,1	50 000	45
	SM-3	40		50 000	40
Daimler Benz	KS15D	15	3,7		37,1
Solo	V-160	7,5	2,3	28 000	35
MTI	Mod -III	108	3,0	20 000	36
	4-95	52	4,1	20 000	41

Основные технические характеристики ДВПТ, предлагаемых на рынке:

- моторесурс – 10000 - 50000 ч;
- эффективный КПД – до 45%;
- мощность моноблока – <100 кВт,
в России – до 15 кВт (АО «Арсенал», 1990-е годы);
- Удельная масса до 2,1 кг/кВт
- с микро-АСММ в США: MARVEL, (100 кВт эл. мощн. 4 ДС x 25 кВт), Idaho Nation. Lab, Kilo-power...

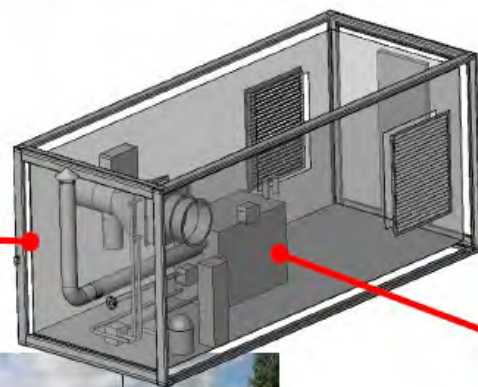


Задел ФТИ: реинжиниринг ДВПТ свободно-поршневой конструкции на 9 кВт электрической мощности

Для разработки и создания РЛДВПТ ФТИ им. А.Ф. Иоффе собрал у себя команду из ученых, инженеров, конструкторов и технологов, способных выполнить ОКР, провести стендовые испытания.

2008–2009 гг. - работы по изготовлению двигателя электрической/тепловой мощностью 9/25 кВт и КПД 32% (реинжиниринг ДС «Solo») с He_2 рабочим телом (механика, уплотнения на 5-10 МПа, АСУТП)

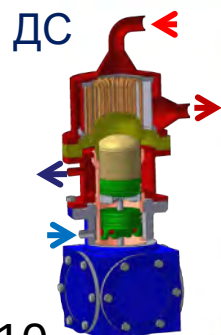
Успешные испытания в Кузбассе опытного контейнерного энергомодуля на базе ДВПТ (Стирлинга), работающего на шахтном метане из угольных пластов без предварительной фильтрации и осушки газа.



Когенерационный
модуль с двигателем
Стирлинга
электрической
мощностью 9,5 кВт



Опытная площадка Талдинская 1-УМ Кемеровской области
по добычи метана из угольных пластов



- В результате проектирования была создана 3D-модель двигателя и рабочая документация проточной части.
- Сама установка была запущена при -30°C и успешно отработала по предложенному Заказчиком алгоритму.
- Установка до сих пор находится в исправном состоянии
- Акт сдачи-приемки от 3.09.2008 г. с протоколами испытаний от 29.08.2008г. и от 18.04.2016г., № 4/113-182, Патент №2685626 от 22 апреля 2019 г.

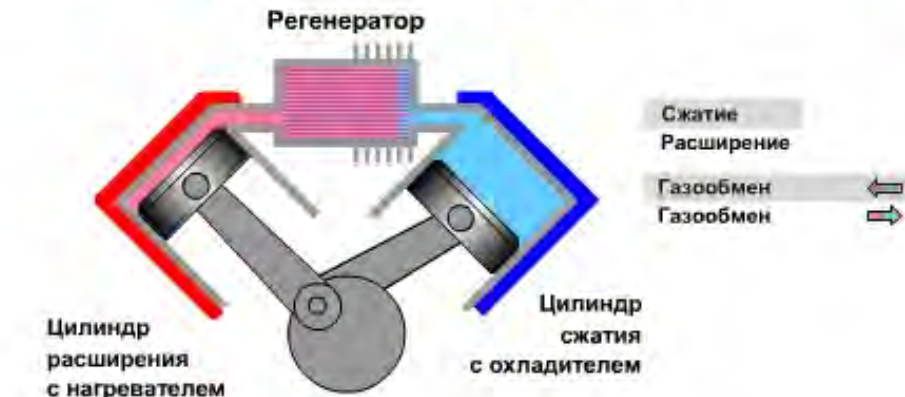


Задел ФТИ: реинжиниринг ДВПТ свободно-поршневой конструкции на 9 кВт электрической мощности

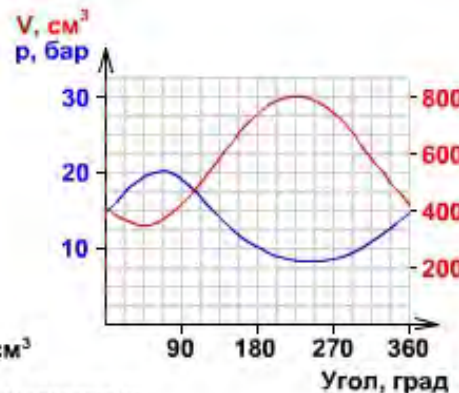
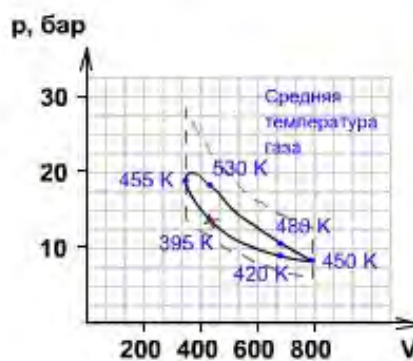
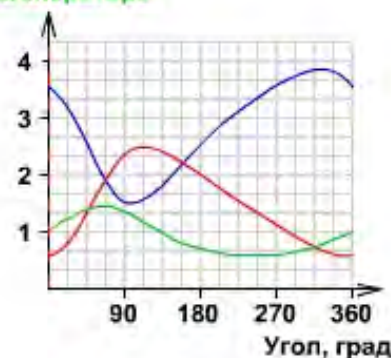
Для разработки и создания РЛДВПТ ФТИ им. А.Ф. Иоффе собрал у себя команду из ученых, инженеров, конструкторов и технологов, способных выполнить ОКР, провести стендовые испытания.

2008–2009 гг. - работы по изготовлению двигателя электрической/тепловой мощностью 9/25 кВт и КПД 32% (реинжиниринг ДС «Solo») с Нв, рабочим телом (механика уплотнения на 5-10 МПа, АСУТП)

Двигатель Стирлинга (Alpha-тип)



Масса рабочего тела, грамм
в цилиндре расширения
в цилиндре сжатия
в регенераторе



юдуля на базе ДВПТ (Стирлинга),
рительной фильтрации и осушки газа.

В результате проектирования была создана 3D-модель двигателя и рабочая документация проточной части.

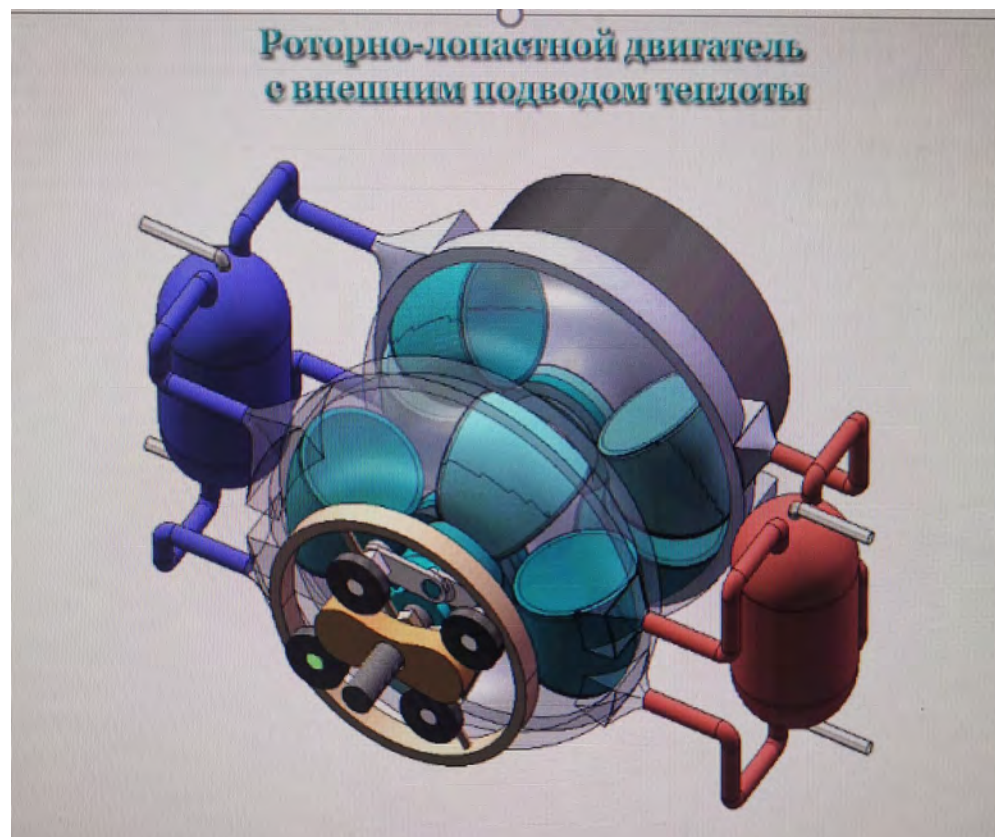
Сама установка была запущена при -30°C и успешно отработала по предложенному Заказчиком алгоритму.

Установка до сих пор находится в исправном состоянии

Акт сдачи-приемки от 3.09.2008 г. с протоколами испытаний от 29.08.2008г. и от 18.04.2016г., № 4/113-182,
Патент №2685626 от 22 апреля 2019 г.

Д(

11



- Двигатель состоит из двух тороидов (цилиндров), в каждом из которых размещены по две лопастные группы (под 90°), относительное движение которых задается механизмом преобразования движения;
- Каждая пара механически связана с роторами внутри своих тороидов, которые вращаются соосно и смещены на 45° относительно друг друга;
- Лопасты делят тороид на четыре рабочие камеры (4 цилиндра), в каждой камере за один оборот попеременно совершаются все четыре рабочих такта: впуск рабочей смеси, сжатие, рабочий ход и выпуск отработавших газов.

Дополнительные преимущества РЛДВПТ:

- небольшое количество движущихся частей, подшипники качения, надежность и простота в обслуживании;
- регулирование мощности в широких пределах путем изменения давления рабочего тела и температуры;
- возможность передачи мощности с высоким крутящим моментом.

Реализация опытного образца с паровым рабочим телом: 9 кВт (эл.) / 30 кВт (тепл.) (есть видео)

«Зимняя школа ФТИ - 2026», 25 февраля – 1 марта 2026, Репино

Преимущества РЛДВПТ, предложенного ФТИ (оригинальный):

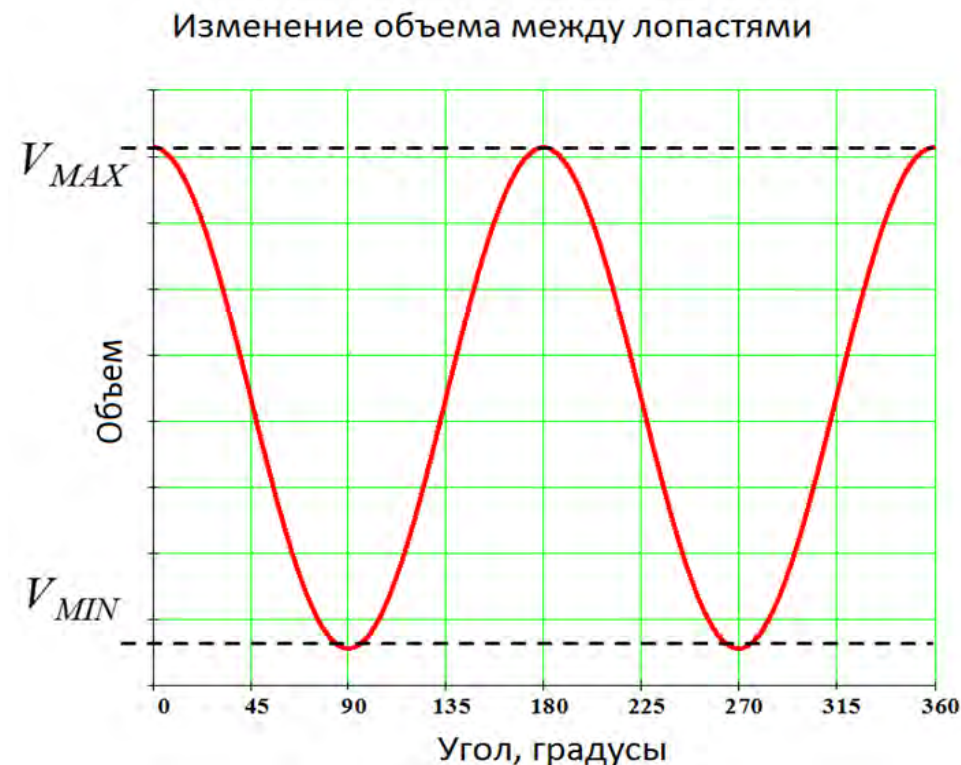
- большая удельная мощность приводит к существенно меньшим габаритам и массе;
- может обеспечить мощность от 30 кВт до 1-2 МВт, оставаясь мобильным ЭГА;
- уплотнения только по валу или полностью герметичная конструкция в капсульном исполнении с генератором внутри на валу;
- большой моторесурс - до 80 000 ч за счет работы на меньших оборотах и давлениях;
- меньший уровень вибраций и шума, синусоидальная схема синхронизации
- вентильно-инверторный генератор конструктивно расположен на одном валу с РЛДВПТ - поддержание частоты $50 \pm 0,3$ Гц, при изменении скорости вращения вала.

Характеристики	РЛД	ШПД
Удельная масса, кг/кВт	1,2 – 1,8	2,5 – 4,5
Удельная мощность, кВт/литр	200	50 – 80
Максимальная мощность в одномодульном исполнении, кВт	2000 (расчет)	≤ 100
Уплотнения на единицы МПа	Только на валу	По периметру поршней
Минимальная скорость вращения, об/мин	60	600 – 800
Рабочий газ / давление, МПа	N₂ / 3-5	He ₂ / 5-15
Потери на механическое трение, %	15	35
Амплитуда вибраций (в подвешенном состоянии), мкм	100	3000

Разработка теоретической модели и концепции инновационного РЛДВПТ (принцип работы)

- Разработана компоновочная схема РЛДВПТ, обладающая новизной конструкций: роторно-лопастной группы, преобразователя движения.
- Разработан алгоритм расчета и проектирования РЛДВПТ на различные мощности.
- Разработана методика термодинамического, кинематического и динамического расчета двигателя.
- **Предложена принципиально новая схема системы подвода тепла и охлаждения для реализации цикла, отличительной особенностью которой является то, что рабочее тело циркулирует в замкнутом контуре в одном направлении**

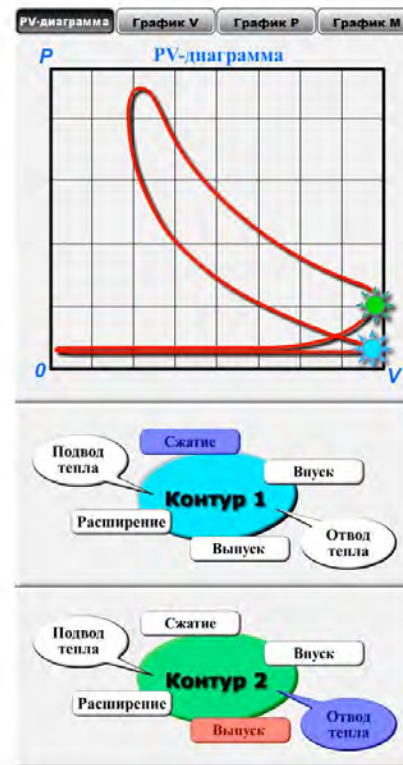
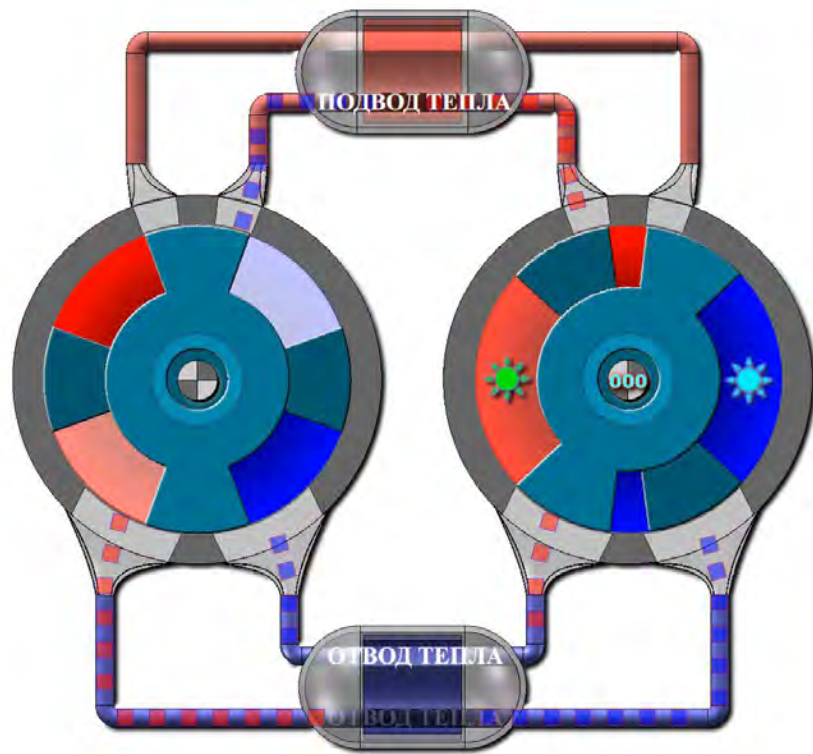
Патенты, относящиеся к теме проекта: №2387844 от 27 апреля 2010 г.,
 №2619391 от 15 мая 2017 г.,
 №2651106 от 18 апреля 2018 г.



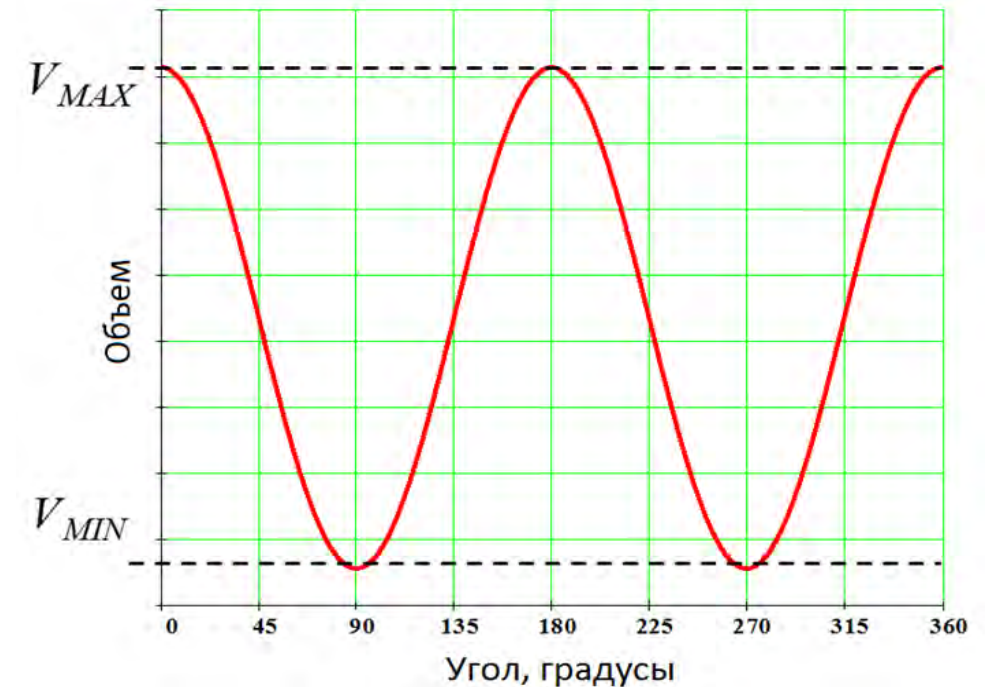
Фаза второго ротора сдвинута относительно первого на 45°

Гармонично-синусоидальная схема синхронизации
 обеспечивает высокую плавность преобразования
 неравномерного движения роторов в равномерное
 вращение выходного вала

Разработка теоретической модели и концепции инновационного РЛДВПТ (принцип работы)



Изменение объема между лопастями



Фаза второго ротора сдвинута относительно первого на 45°

Гармонично-синусоидальная схема синхронизации обеспечивает высокую плавность преобразования неравномерного движения роторов в равномерное вращение выходного вала

Патенты, относящиеся к теме проекта: №2387844 от 27 апреля 2010 г., №2619391 от 15 мая 2017 г., №2651106 от 18 апреля 2018 г.

Сравнение параметров иностранных образцов ДВПТ с создаваемым РЛДВПТ

Показатели	4S1210 «Дженерал Моторс» (экспери- мент. данные)	4L23 «Дженерал Моторс» (расчетные данные)	Рядный «Филипс» (расчетные данные)	РЛДВПТ (расчетные данные)
Мощность, кВт	280	95	147	300
Частота вращения, мин ⁻¹	1500	2100	3000	1500
КПД, %	35	–	–	22,6
Температура нагревателя, °С	650	760	700	427
Температура охладителя, °С	32	57	40	77
Рабочее тело	H ₂	H ₂	He	CO₂
Среднее давление, МПа	10,35	10,3	21,6	3,1
Количество цилиндров	4	4	4	2
Объем цилиндра, см ³	2270	1510	400	1000
Удельная мощность, Вт/ см ³	58	15,7	136	150
Масса, кг	2270	725	400	500
Габаритные размеры, мм	1880x1016x1930	1360x600x1000	1130x440x963	1200x600x900
Объемная мощность, кВт/м ³	76	116,4	308	464
Удельная масса, кг/кВт	8	7,6	2,72	1,66

Схема работы РЛДВПТ с микро-АСММ на номинальном режиме

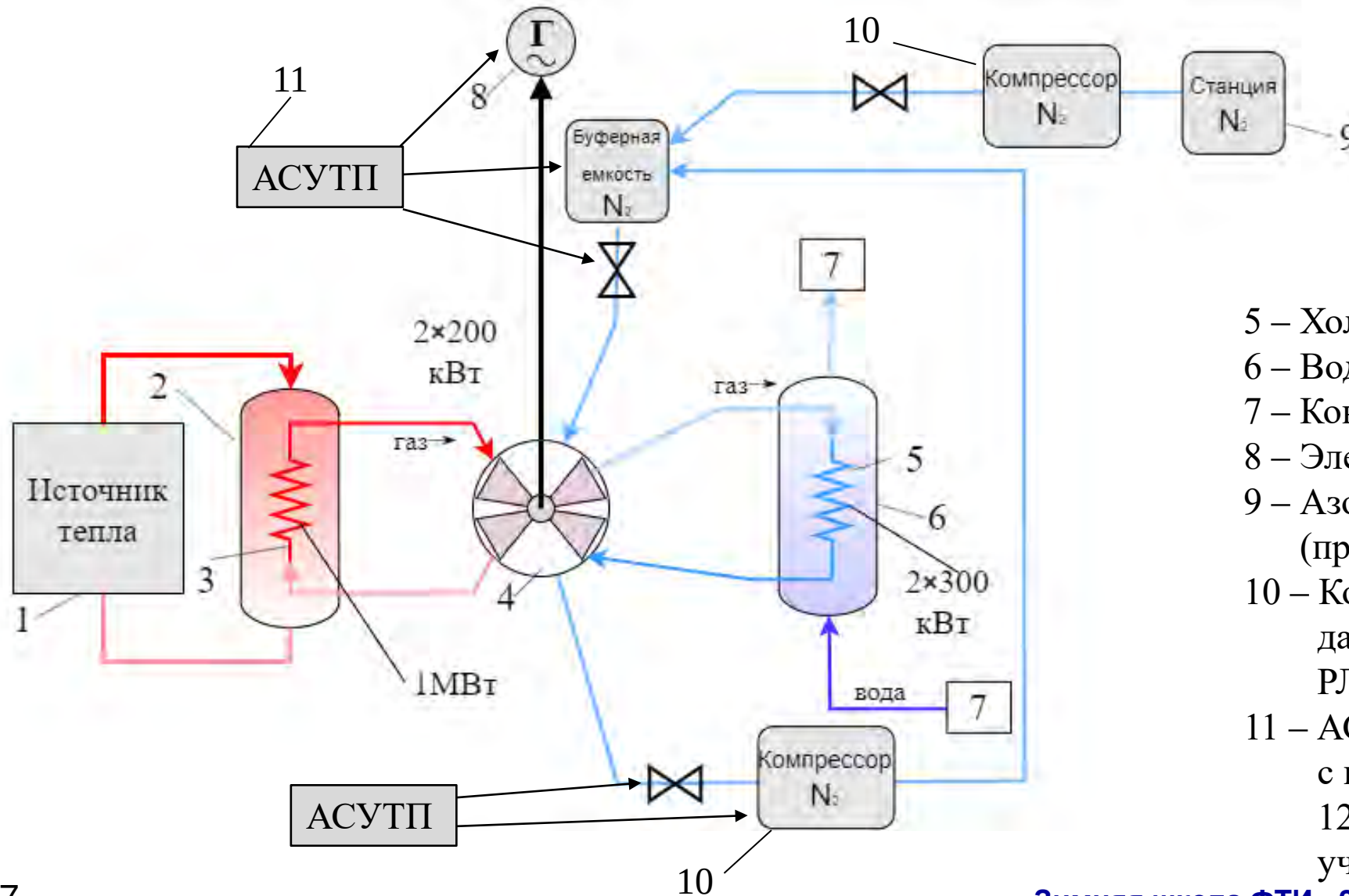
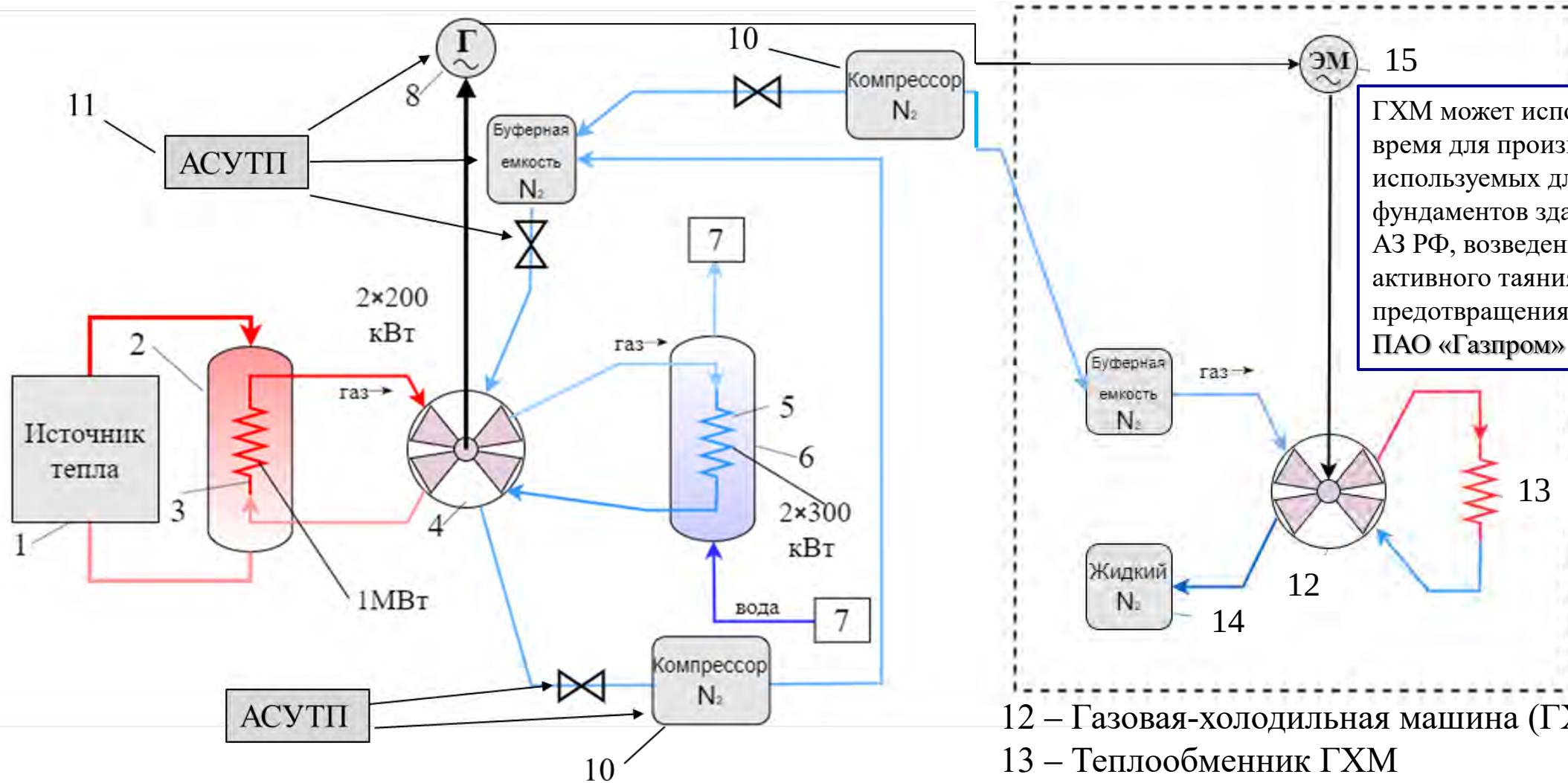


Схема работы РЛДВПТ с пониженным потреблением и сбросом эл. мощности на ГХМ



ГХМ может использоваться в ночное время для производства хладагентов, используемых для замораживания фундаментов зданий и сооружений в АЗ РФ, возведенных в местах активного таяния вечной мерзлоты и предотвращения их разрушения. ПАО «Газпром»

12 – Газовая-холодильная машина (ГХМ)

13 – Теплообменник ГХМ

14 – Емкость хранения жидкого азота

15 – Электродвигатель ГХМ

Выводы по РЛДВПТ с микро-АСММ (ММР)

Основные параметры разрабатываемого РЛДВПТ, позволяющие обеспечивать непрерывную работу мобильной автономной микро-АСММ в течение всего срока ее службы:

- ✓ линейка электрических мощностей моноблоков от 0.2 МВт до 2 МВт;
- ✓ малые габариты и вес (до 2 МВт) за счет большой удельной мощности для комплектации мобильных микро-АСММ и транспортировки любым видом транспорта и по дорогам общего пользования;
- ✓ быстрое разворачивание мобильных микро-АСММ с РЛДВПТ собранных по блокам на заводе и высокая защищенность объекта генерации (в т. ч. монтаж под землей, под водой), безопасность эксплуатации;
- ✓ высокий моторесурс (выше 40000 часов непрерывной работы, в перспективе доведение сроков автономной работы ЭГА до сроков перезагрузки топлива на ЯР – 80000 часов);
- ✓ высокий КПД – 30-45%;
- ✓ с помощью АСУТП возможность регулировки выходной мощности в пределах от 50% до 120% от номинальной мощности за счет изменения давления рабочего тела при постоянной температуре нагревателя;
- ✓ возможность автономной работы по удаленному доступу;
- ✓ модульная конструкция (комплектация любого номинала до 30 МВт, а также работа с микро-АСММ в каскадном режиме на температурном перепаде после основного ЭГА), позволяющая балансировать суточные, недельные и сезонные колебания нагрузки;

- ✓ анаэробность – возможность работать в отсутствие кислорода (воздуха) – подводные шельфовые АЭС, лунная станция;
- ✓ бесшумность – подводные аппараты;
- ✓ когенерационность, т.е. возможность производить одновременно электроэнергию и теплоноситель требуемой температуры, тройная генерация - +холод.
- ✓ на основе РЛДВПТ могут быть созданы оригинальные криогенные машины от 0.2 МВт до 2 МВт.

Дополнительные
возможности и
применения
РЛДВПТ

Термоэмиссионные преобразователи (ТЭП): актуальность и мотивация

В настоящее время основные задачи в освоении ближнего космоса – глобальные информационные системы, экологический мониторинг и новые потребности оборонной техники, связанные с радиолокацией, использованием мощных лазеров и СВЧ генераторов – нельзя решить без эффективных источников электрической энергии мощностью 0.1-1.0 МВт.

Необходимы **небольшие масса и габариты**. Отсюда параметры преобразователя энергии: **высокие плотность энергии, КПД и температура холодильника излучателя** (в открытом космосе тепло можно сбрасывать только излучением).



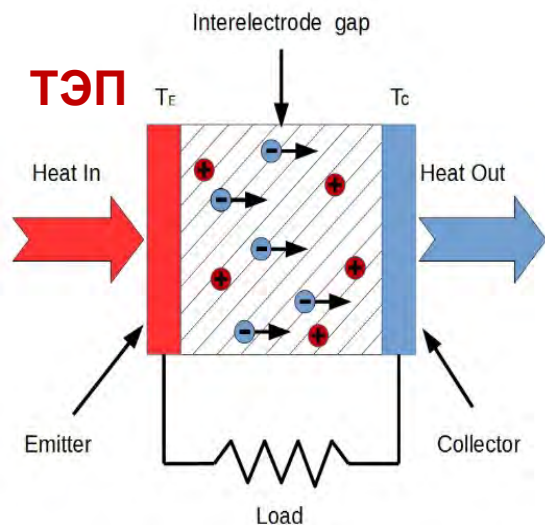
Дунаев Юрий Александрович

Сегодня для получения электрической энергии в космосе могут быть использованы только солнечное излучение и ядерная энергия, и доступны только **3 преобразователя этих видов энергии в электричество: фотоэлектрический, термоэлектрический и термоэмиссионный (ТЭП)**.

Фотоэлектрические преобразователи используют энергию солнечного излучения. Не очень эффективны из-за огромных размеров (низкая плотность солнечной энергии – $1,3 \text{ кВт/м}^2$, или 0.4 кВт/м^2 при КПД 30%, малая удельная мощность) и сильной уязвимости. **Термоэлектрические преобразователи**, используют тепло от распада радиоактивных изотопов и имеют низкую удельную мощность и малый КПД (5-10%).

Вывод: космосе на роль мощных источников электрической энергии могут претендовать только **термоэмиссионные ядерные энергетические установки (ТЯЭУ) с эффективными ТЭП нового поколения**.

Термоэмиссионные преобразователи энергии. Основные параметры, история открытия.



ТЭП – тепловая машина прямого преобразования, в которой рабочим веществом является электронный газ. Нет движущихся частей. **Ток** – за счет эмиссии электронов с нагретого эмиттера, **напряжение** – за счет разности работ выхода эмиттера и коллектора (1–1.5 В).

Для увеличения проходящего тока объемный заряд электронов компенсируют ионами Cs. Ионы Cs образуются либо в объеме организацией вспомогательного разряда (**дуговой режим**), либо путем ионизации на поверхности эмиттера (**бесстолкновительный режим**). В дуговом режиме около 0.5 В теряется при получении ионов. **В бесстолкновительном режиме потерь в плазме нет.**



Барабаш Маркус Борисович

$$\eta_{\text{Карно}} = \frac{T_H - T_X}{T_H}$$

1962 г. в ФТИ впервые успешные реакторные испытания много-элементного ТЭП с ЯР-нагревом эмиттера (с КПД ~3,5%, 2,5 Вт/см²).

В 1965 г. в НПО «Луч» была создана термоэмиссионная ЯЭУ «ТОПАЗ»: $W_{\text{эл}} \sim 5$ кВт, (2 Вт/см²), КПД $\eta \sim 5\%$, $T_c < 900$ К. Тепловая мощность ЯР ~ 100 кВт. Удельный размер ХИ у Топаза 1.5 м²/кВт. **Дуговой разряд.**

В последние годы КПД дугового ТЭП до 10%. Размеры ХИ (~0.7 м²/кВт). Удельная мощность (2-3 Вт/см²)

В 1987 г. год на орбите в составе КА «Космос-1867»

$$S = \frac{1 - \eta}{\eta} \frac{W_{\text{эл}}}{\epsilon \sigma T_c^4}$$



ЯЭУ ТЭУ-5 «Тополь»

Термоэмиссионные преобразователи нового типа. Научно-технический задел

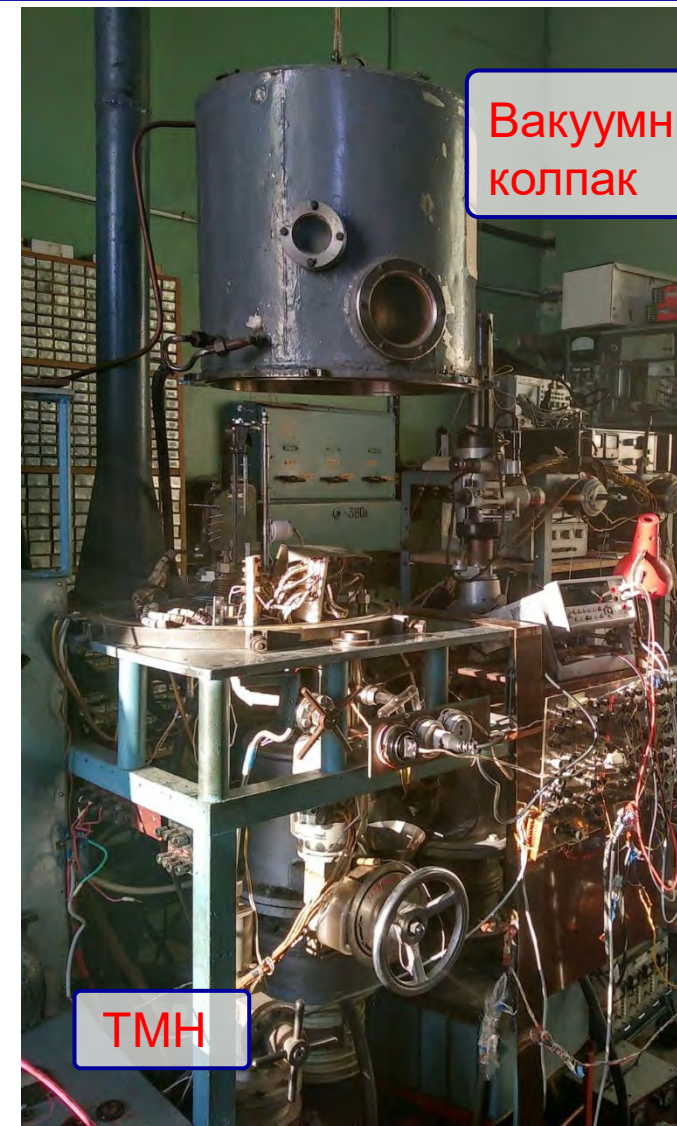
ФТИ им. А.Ф. Иоффе предложил ТЭП нового поколения, работающий в кнудсеновском режиме, где нет потерь в плазме. На практике этот режим реализуется в диоде с Cs-Ba наполнением:

- **компенсация объемного заряда** обеспечивается **за счет ионов Cs**, образующихся на поверхности горячего эмиттера,
- необходимая эмиссия электронов и разность потенциалов – за счет **различной адсорбции атомов Ba на поверхности электродов и снижения работы выхода** эмиттера.
- это приводит к сильному **росту удельной мощности преобразователя**.

Создана теория кнудсеновского режима ТЭП. Разработаны приборы и методы диагностики плазмы диода и поверхности его электродов. Проведена оптимизация характеристик ТЭП с использованием паров Ba

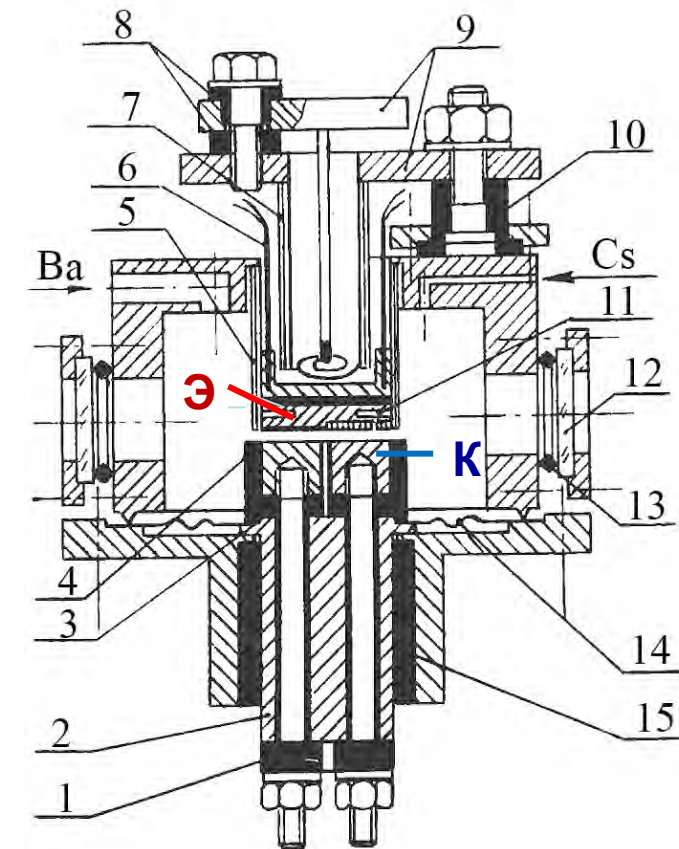
В.И. Бабанин, А.Я. Эндер, ЖТФ, 1972, **42**(10), 2144;

В.И. Бабанин, В.И. Кузнецов,А.Я. Эндер. ЖТФ, 1978, **48**(4), 754.



Фотография
эксперимен-
тального
стенда со
снятым
прибором

Экспериментальные стенды для исследования кнудсеновского ТЭПс Cs-Va ТЭП



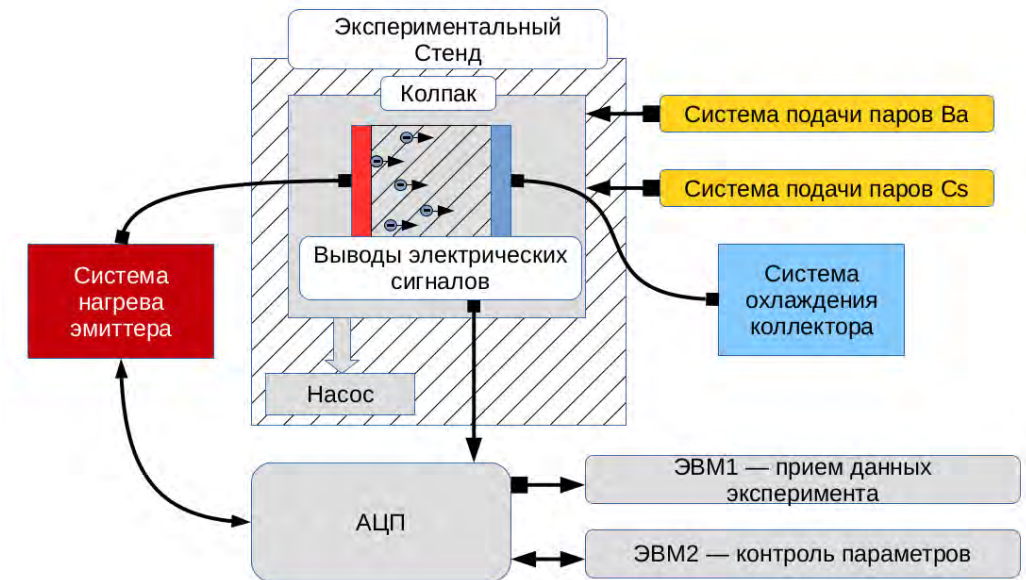
Конструкция экспериментального прибора плоской геометрии с Cs-Va наполнением.

1,3 – коллекторные изоляторы,
2 – коллекторный шток,
4 – изолятор,
5 – экраны, 6 – W-Re термодпары,
7 – экраны пушки,
8, 10 – изоляторы пушки,
9 – электронная пушка,
11 – отверстия в эмиттере для
пирометрирования,
12 – сапфир,
13 – ножевое уплотнение,
14 – танталовая диафрагма,
15 – графитовая втулка.

Вакуум в камере ниже 5×10^{-6} Тор.

Подача Cs и Va осуществлялась через различные отверстия. При фиксированном давлении паров Cs и $T_{\text{Э}}$ изменялось давление паров Va. Для каждого давления Va регистрировалась ВАХ и временные осциллограммы тока и напряжения.

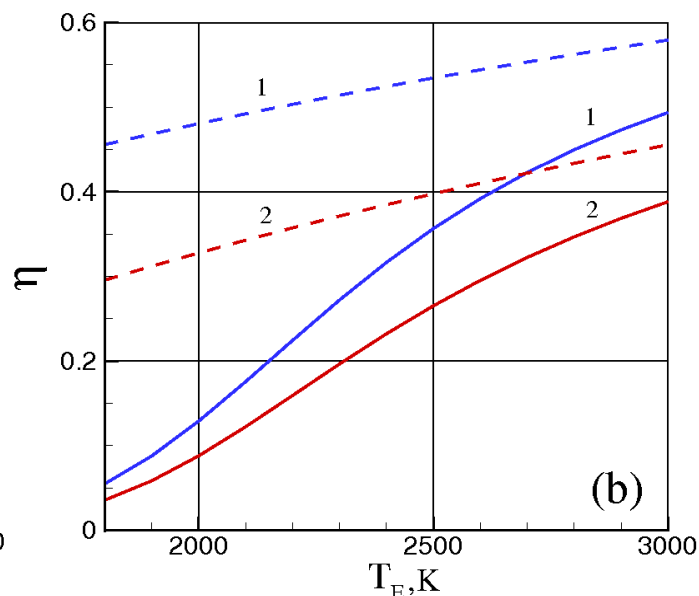
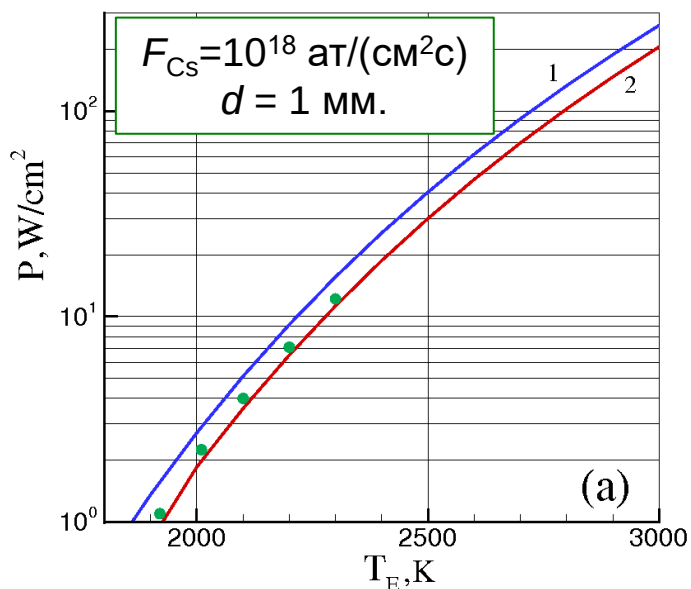
Блок-схема экспериментального стенда



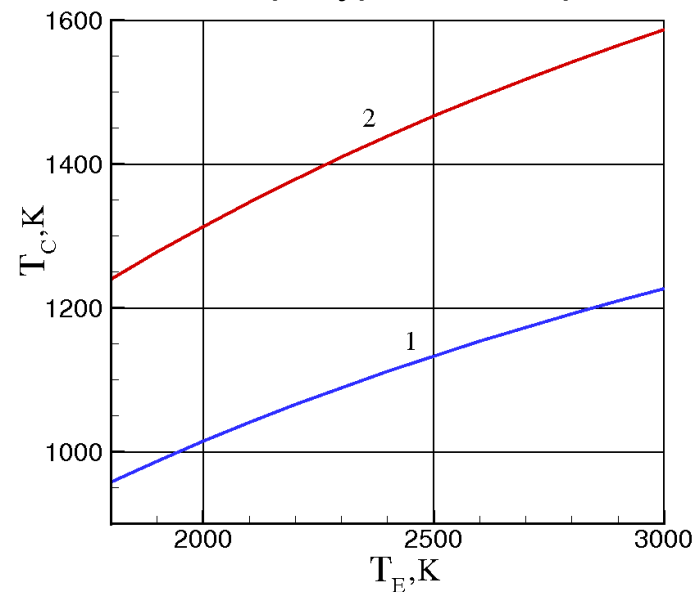
1. Создан метод магнитной диагностики параметров плазмы и поверхности электродов.
2. Проведена оптимизация выходных характеристик ТЭП до $T_{\text{Е}} = 2300$ К.
3. Создан высокоточный метод измерения T в условиях Va среды на основе термосопротивления.
4. Создан метод нагрева эмиттера электронной пушкой до $T_{\text{Е}} = 3000$ К с точностью до 10 К.

Результаты теоретической оптимизации и эксперимента на кнудсеновском ТЭП

Теоретические зависимости (а) максимальной удельной мощности и (б) КПД от температуры эмиттера.



Теоретическая зависимость оптимальной температуры коллектора от температуры эмиттера.



Эндер Андрей
Яковлевич

Кривые: 1 – работа выхода коллектора $\varphi_C = 1.7$ эВ, 2 – 2.2 эВ,

* – данные экспериментов. Пунктирные линии на рис. b соответствуют циклу Карно.

При $T_E > 2000$ K КПД ТЭП резко возрастает с ростом температуры, приближаясь к КПД цикла Карно, а при $T_E > 2250$ K удельная мощность оказывается выше 15 Вт/см². Высокой оказывается и температура коллектора. Оценки показывают, что кнудсеновский режим может быть реализован до $T_E = 2600$ K

Теория подтверждена экспериментами вплоть до $T_E = 2300$ K (рис. а).

A.Ya. Ender, V.I. Kuznetsov, et al., AIP. 1994, 2, 861; V.I. Kuznetsov, A.Ya. Ender., et al., J. Appl. Phys. 2018, 124(4), 044502.

Сравнение характеристик ТЭП разных поколений:

Экспер./ Теор.	Температура		Удельная электрическа я мощность	Площадь эмиттера на 100 кВт	КПД	Выигрыш в площади ХИ			Площадь ХИ для ТЯЭУ на 100 кВт
	эмит- тера	коллек- тора							
	T _Е ,K	T _К ,K	W _{эл.} , Вт/см ²	S _Е , м ²	η, %	За счет увел. КПД	За счет увел. T _К	Суммар- ный	S, м ²
экспер. 1	1900	880	2	5	5	1.0	1.0	1.0	140
экспер. 2	1900	880	2-3	4-5	10	2.1	1.0	2.1	67
экспер. 3	2250	1400	10-15	1	20	4.8	6.4	30.7	4.5
теор.	2400	1450	20	0.5	25	6.3	7.4	46.6	3.0
теор.	2600	1500	50	0.2	30	8.1	8.4	68	2.0

1-2 строчки – дуговой режим, 3-5 строчки – кнудсеновский режим.

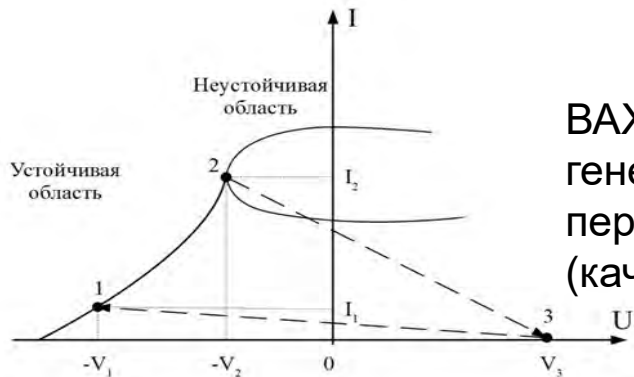
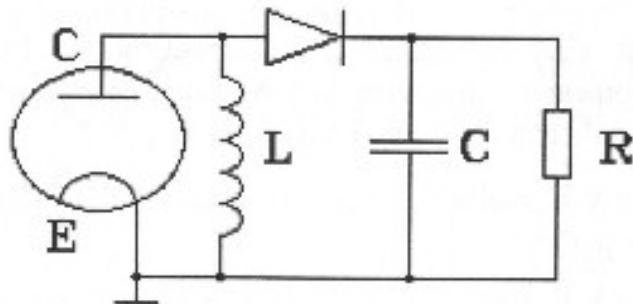
Благодаря высокой $W_{эл}$ кнудсеновский ТЭП имеет значительно меньшие размеры преобразователя, чем дуговой: для получения 100 кВт электричества его S_E составит всего 1 м² при $T_E = 2250$ К, и 0.2 м² при $T_E = 2600$ К. У дугового ТЭП S_E будет около 5 м² при $T_E = 1900$ К.

Благодаря более высоким КПД и T_C сильно уменьшатся размеры ХИ: для получения 100 кВт электричества при использовании кнудсеновского ТЭП с $T_E > 2250$ К площадь ХИ составит всего 2-5 м². У дугового ТЭП 2-го поколения она будет около 70 м². У солнечных батарей она будет порядка 300-400 м².

Кнудсеновский ТЭП – генератор переменного тока (теория и эксперимент)

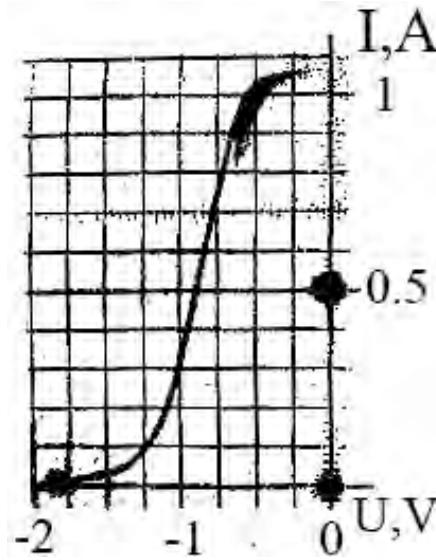
- ❖ Предложено использовать ТЭП в качестве генератора импульсов повышенного напряжения (10...12 В) [А.Я. Эндер и др.. Патент 2030017, БИ № 6. 1995].
- ❖ Создан численно-аналитический метод исследования нестационарных процессов в кнудсеновских ТЭП, и на его основе создан уникальный высокоточный Е,К-код [В.И. Кузнецов, А.Я. Эндер. Физика плазмы, 2010, 36(2), 248, 258; V.I. Kuznetsov et al., Phys. Plasmas, 2021, 28 (2), 022305; 2022, 29(11), 112115].
- ❖ Изучена электронная неустойчивость в кнудсеновских диодах. Исследовано влияние на нее магнитного поля и столкновений электронов с атомами [S. Pramanik, V.I. Kuznetsov, et al., Phys. Plasmas. 2017, 24(2), 023107; В.И. Кузнецов и др., ЖТФ, 2019, 89,(10), 1535]

Схема генератора переменного тока на основе ТЭП

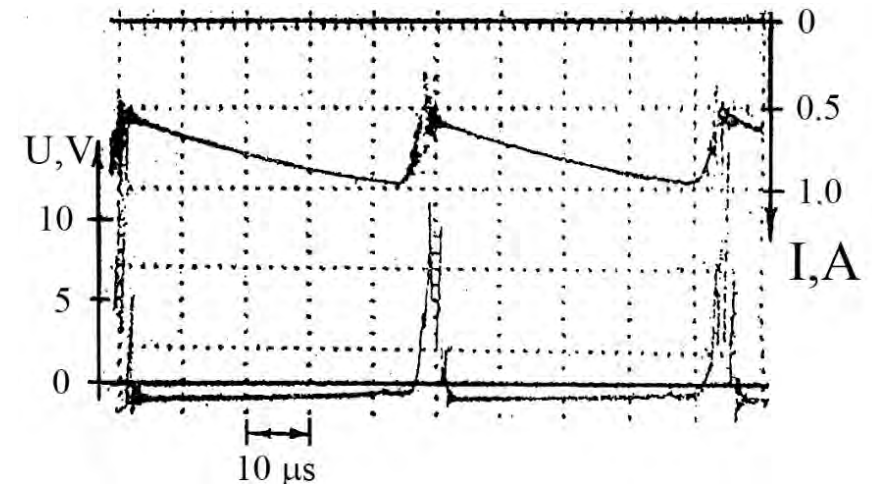


ВАХ диода в режиме генерации переменного тока (качественно)

Э
к
с
п
е
р
и
м
е
н
т



Экспериментальная ВАХ.
 $P_{Cs}=10^{-4}$ Тор, $d=1$ мм.



Осциллограммы I / U . $P_{Cs}=1 \cdot 10^{-4}$ Тор, $d=1$ мм. $L = 20$ мкГн; $V_{max} \sim 10$ В, $T_1 = 45$ мкс, $T_2 = 4$ мкс

- В 2001г. в США предложена программа работ по ТЭП [Thermionics Quo Vadis? An Assessment of the DTRA's Advanced Thermionics Research and Development Program. 2001. <http://www.nap.edu/catalog/10254.html>]. Она предусматривала две области применения: в космосе (солнечные и ядерные установки) и на Земле.
- В последние 15 лет в США и других странах возобновился интерес к термоэмиссионному способу преобразования энергии [Y.-G. Deng et al., J. Renewable and Sustainable Energy. 2009, **1**, 052701; K.A.A. Khalid et al., IEEE Transac. on Electron Dev. 2016, **63**(6), 2231; M.F. Campbell et al., Review. Adv. Sci. 2021, **8**, 2003812].
- Экспериментальные работы по ТЭП с развитым эмиттером, в 2000-х годах в Institute for Space and Nuclear Power Studies в Альбукерке, США В этих работах была подтверждена высокая эффективность работы ТЭП при определенных величинах давления паров Cs и умеренных $T_{\text{э}}$. При этом полученные в эксперименте значения КПД и плотности мощности достигали 14% и 2.4 Вт/см², соответственно. [M.S. El-Genk, Y. Momozaki. Energy Conversion and Management. 2002, **43**(7), 911; Y. Momozaki, M.S. El-Genk., Energy Conversion and Management. 2004, **45**, 1153].
- Более впечатляющие результаты для ТЭП с развитым эмиттером получены недавно в России [A.Y. Grabovskiy, A.S. Mustafaev, A. Krizhanovich, V.I. Kuznetsov, and V.S. Sukhomlinov. J. Appl. Phys. 2022, **132**, 013302].

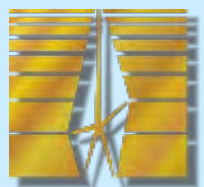
Таким образом, можно утверждать, что ТЭП являются перспективной технологией, исследования которой ведутся во многих развитых странах: США, Англии, Германии, Израиле, Китае, Японии. Проводимые исследования нацелены на улучшение характеристик традиционных ТЭП, разработку новых материалов, позволяющих сильно понизить работу выхода электродов, а также построение ТЭП, способных работать на солнечной энергии, заменяя традиционные солнечные элементы.



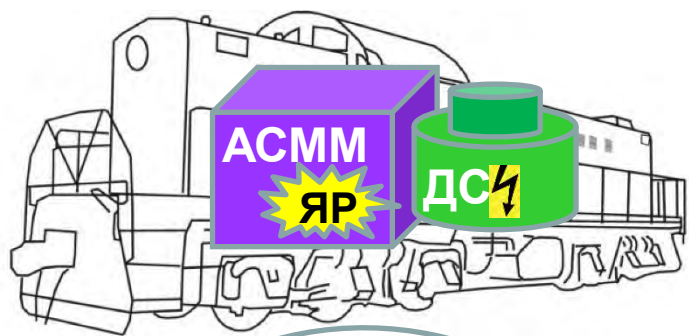
Thermionic energy conversion (TEC) is the direct conversion of heat into electricity by the mechanism of thermionic emission, the spontaneous ejection of hot electrons from a surface. Although the physical mechanism has been known for over a century, it has

- **Базовые** располагаются вдоль побережья Северного Ледовитого океана на расстоянии порядка 900-1000 км друг от друга, т.е. вдоль СМП, или неплавучих крупноблочных транспортабельных микро-АСММ у крупных континентальных поселений. Базовые ПАЭС/микро-АСММ могут быть гибридные 2-х каскадные в случае ВТГЯР с ТЭП (1-й каскад) и РЛДВПТ (2-й каскад)
 - ✓ Установки имеют полный КПД $>45\%$ и EROI >100 .
 - ✓ Позволяют быстро выводить и вводить в эксплуатацию мощности 2-го каскада, сообразуясь с сезонными и суточными колебаниями потребления электроэнергии.
 - ✓ Тепловая мощность ЯР должна составлять 2-10 МВт.
 - ✓ Возможны модульные блоки до 20-30 МВт, структура из нескольких 1 или 2-х каскадных установок.
 - ✓ Это мобильные установки, транспортируемые в любые точки территории или береговой полосы

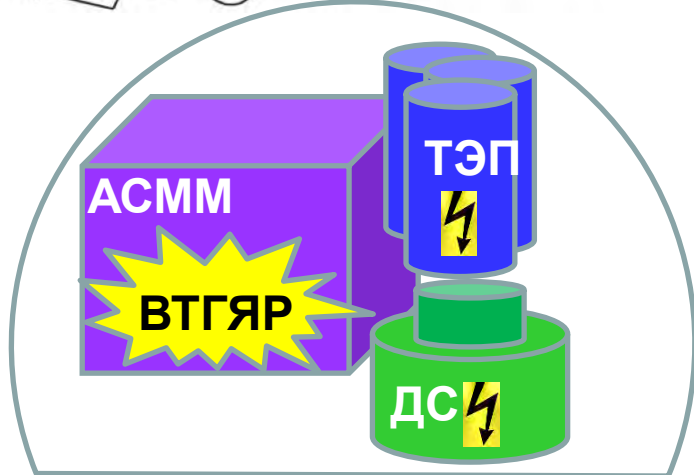
Каждую ПАЭС сопровождают «дочерние» **мобильные энергостанции** (ДЭС) малой мощности (30–500 кВт электрической мощности), расположенные в радиусе порядка 300 км от ПАЭС, основой которых является РЛДВПТ с газгольдерной емкостью, метанолом, СПГ, ПГ на сезон. или экологически-нейтральным угольным котлом.



- ✓ Предлагаемая стратегия обеспечивает **эффективную выработку электроэнергии, минимизирует затраты на экологию, повышает качество жизни и делает произведенную продукцию импортозамещающей и конкурентоспособной на рынке.**
- ✓ Предлагаемая сетевая система энергоснабжения на основе «базовых» и «дочерних» установок имеет **большой ресурс автономной работы, возможность дистанционного управления и обеспечивает электрической энергией СМП и удаленные районы.**
- ✓ Сетевая система малой распределенной энергетики обеспечивает **безопасность и неустойчивость энергетической системы страны и охрану ее периметра** в малонаселенных регионах и сложных климатических условиях.
- ✓ Экспортный потенциал: Кроме удаленных регионов АЗР стратегия сооружения малых автономных АЭС «под ключ» **востребована в странах Азиатско-Тихоокеанского региона, Африке, Латинской Америке.** Для этих рынков характерна относительная неразвитость инфраструктуры, удаленность объектов и наличие большого количества островных территорий.

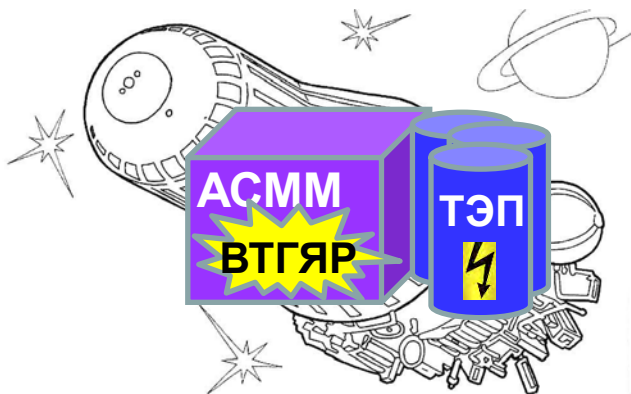


1. Автономные мобильные установки малой электрической мощности (200-1000 кВт) на основе РЛДВПТ с нагревом ЯР для использования в наземных условиях на удаленных территориях, Ж/Д транспорте.



2. ВТГЯР с ТЭП и ДС с мощностью (до 1-4°МВт электрической и 2-10°МВт тепловой), для использования в наземных условиях (плавучий или континентальный вариант) в удаленных и территориально изолированных районах, а также, на поверхности Луны и под водой (подводный флот и беспилотные подводные аппараты).

Такие автономные ЯЭУ имеют: сравнительно небольшие размеры, высокую удельную мощность, высокий КПД, малозумные и анаэробные.



3. ВТГЯР с ТЭП на мощности (0.1...1°МВт), для использования в Космосе. Благодаря высоким удельной мощности и эффективности, а также высокой температуре коллектора такой преобразователь имеет малые массогабаритные характеристики и сверхмалые размеры холодильника-излучателя.

Главное преимущество стационарных АЭС – большая установленная мощность, которая позволяет обеспечить низкую стоимость 1 кВт часа, поскольку все расходы относятся на большее количество кВт.

Однако такой подход для оценки стоимости получаемой электроэнергии не учитывает ряд факторов, которые влияют на коммерческую эффективность, но остаются за пределами бухгалтерского учета, (см. https://overclockers.ru/blog/kosmos_news/show/161366/U-issledovatelej-voznikli-somneniya-v-effektivnosti-mini-AES).

Существуют и оптимистические экономические прогнозы, например, для разработки и эксплуатации плавучих АСММ типа «Ломоносов» с ледокольными реакторами «Ритм-200» на 55 МВт (см. <https://www.gazeta.ru/business/2021/11/30/14264041.shtml?updated>)

В перспективе, создание на основе НИОКТР разработок ФТИ им. А.Ф. Иоффе промышленного производства линейки эффективных РЛДВПТ по циклу Стирлинга от 30 кВт до нескольких МВт позволит создать малую отечественную энергетику, работающую, помимо ЯЭУ, от любых местных источников тепла и от концентрированного солнечного излучения. Также тепловые машины обратного цикла Стирлинга являются эффективными криогенными машинами, производство которых в РФ отсутствует, для производства и транспортировки сжиженных газов, для замораживания фундаментов зданий и сооружений АЗ РФ, возведенных в местах активного таяния вечной мерзлоты, и многих других применений.

Обоснование экономической целесообразности развития микро-АСММ по сравнению с АСММ и АЭС

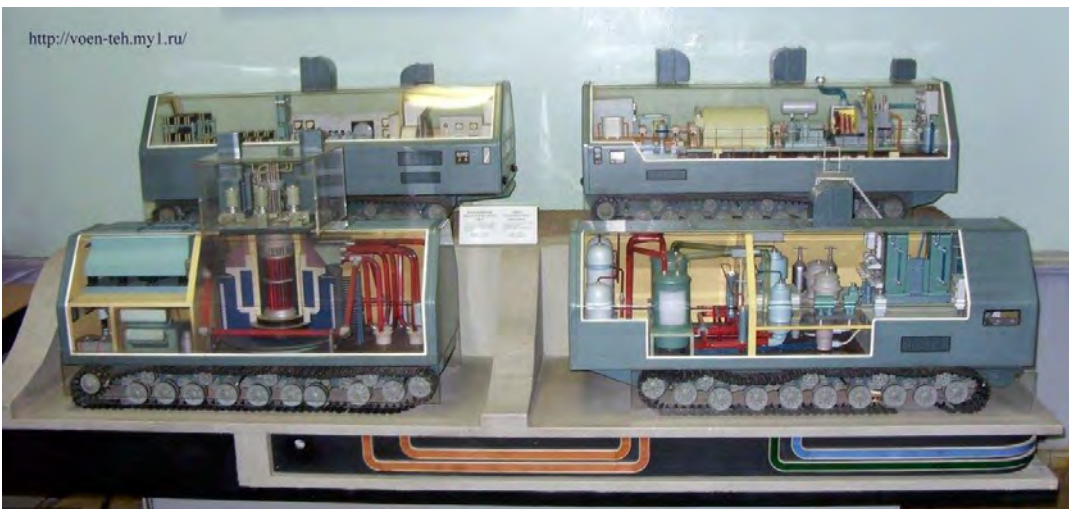
1. Мобильность микро-АСММ (5-10 МВт тепловой мощности), позволяет **не списывать все расходы на один объект**, а распределять их между всеми объектами, где она будет использоваться в пределах своего срока службы, что уменьшит стоимость установленной мощности 1 кВт.
2. Заводская сборка микро-АСММ **не предполагает больших капитальных вложений при размещении герметичного модуля в месте применения**, организации стройплощадки, завоза материалов, обеспечения автономными источниками энергии. А также **не предусматривает строительства и дорогостоящей эксплуатации протяженных ЛЭП** а также **потери на них** (электричества до 10%, тепла – до 70%), как в случае АСММ и АЭС.
4. Микро-АСММ, как и любая АЭС, является объектом повышенной опасности, но значительно менее уязвима, т.к. подобно «ядерной батарее» может быть смонтирована под землей (бетонной крышкой), и, в случае разрушения, там же и останется, исключив радиоактивное заражение местности. С использованием СВБР-10 или СВЕТ-М ситуация с безопасностью будет еще менее критичной, так же как и с возможностью транспортировки заглушенного реактора.
5. Микро-АСММ с ЭГА на основе ДС позволяет еще и **создание многокаскадных АСММ, сконструированных на различные диапазоны температуры** (например, 600-1000°C, 200-600°C и т.д.), что существенно увеличит суммарный КПД выше 45%. РЛДВПТ реализуют цикл Карно и имеют наибольший КПД. КИУМ у АСММ не опускается ниже 80%

Типы разработанных мобильных прототипов микро-АСММ (ММР) в СССР и России

ТЭС-3



- Мощность (т/э) – 11/1,5 МВт
- Топливо – UAl_3 , 36 %
- Физпуск – 1961 г.
- Эксплуатация – 1961-1966 (опытно-промышленная)



АСММ «Памир»



- Реактор мощностью 5 МВт(т), 0,63 МВт(э)
- Теплоноситель – тетраоксид диазота (N_2O_4)
- Физпуск – 1985 г., опытная эксплуатация -3600 час

Спасибо за внимание!

Команда разработчиков: В.И. Кузнецов, Ю.Н. Лукьянов, М.А. Донченко,
С.В. Булович, В.А. Акулов, С.Н. Снегуров

