**Пример заполнения первой части разделов паспорта проекта**

1. **Тема НИОКТР**

«Разработка технологий автономного производства тепловой и электрической энергии за счет использования местных низкокалорийных энергетических ресурсов Арктической зоны России для энергоснабжения индивидуальных и коллективных потребителей в условиях децентрализованных энергосистем».

1. **Приоритет стратегии**

Проект направлен на проведение прикладных научных исследований, направленных на реализацию приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации:

* основной приоритет - б) переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике; повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии;
* дополнительный приоритет - е) связанность территории Российской Федерации за счет создания интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем, а также занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем, освоении и использовании космического пространства, Мирового океана, Арктики и Антарктики.
* дополнительный приоритет – д) противодействие техногенным, биогенным, социокультурным угрозам, терроризму и идеологическому экстремизму, а также киберугрозам и иным источникам опасности для общества, экономики и государства»

1. **Ключевые слова**
   1. **На русском языке**

Автономная энергетическая установка, когенерация, пневматический аккумулятор электрической энергии, тепловой аккумулятор, свободно-поршневой двигатель, двигатель Стирлинга, теплообменные аппараты со сложной системой капиллярных каналов, аддитивные технологии, биотопливо, слоевое сжигание, биотопливный котел, повышение эффективности выработки электрической энергии и тепла, увеличение удельной мощности свободно-поршневого двигателя, интенсификация теплообмена, повышение маневренности генерирующего оборудования.

* 1. **На английском языке**

Independent power plant, cogeneration, compressed air energy storage, heat energy storage, free piston engine, stirling engine, heat exchanger with the complex system with сapilary channels, additive technology, biofuel, grate firing, biofuel boiler, increasing of efficiency of electricity and heat production, increasing the specific power of a free piston engine, heat transfer augmentation, increasing flexibility of the energy module

1. **Цель (цели) НИОКТР**

Целью проекта является разработка технологических решений для создания когенерационных автономных энергетических модулей (КАЭМ) малой мощности, работающих за счет использования местных низкокалорийных энергетических ресурсов Арктической зоны, в частности низкосортных углей и биотоплив, произведенных из растительной биомассы, для энергоснабжения индивидуальных и коллективных потребителей в условиях функционирования в составе децентрализованных энергосистем, характеризующихся высокой неравномерностью потребления электрической и тепловой энергии, и экстремально низких температур, что будет способствовать переходу к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, активному использованию нетрадиционных источников энергии (биосырья и биотоплива, производимого на его основе), а также внесет свой вклад в обеспечение связанности территории Российской Федерации и социально-экономическое развитие Арктической зоны.

Практическое применение разработанных в рамках проекта технологических решений путем создания новых когенерационных автономных энергетических моделей малой мощности будет способствовать: повышению надежности энергоснабжения научно-исследовательских, коммунально-бытовых объектов и добывающих комплексов; снижению себестоимости производства электрической и тепловой энергии за счет активного использования дешевых местных энергетических ресурсов; замещению импортных дизельных, газопоршневных и котельных установок отечественными образцами, имеющими более высокую конкурентоспособность; созданию новых рабочих мест в сфере производства биотоплива из местного биосырья (древесные опилки, щепа).

1. **Задачи и возможные пути их решения**

Основная задача ПНИЭР состоит в разработке технологии совместной генерации электрической и тепловой энергии за счет использования местных твердых топлив, доступных в Арктической зоне РФ на базе когенерационного автономного энергетического модуля малой мощности с энергетическими характеристиками, превышающими аналоги. Электрическая мощность разрабатываемого двигателя должна составлять не менее 4 кВт, тепловая не менее 12 кВт при сниженной металлоемкости не менее чем на 14 % по сравнению с современными аналогами. Для успешной реализации проекта необходимо решить ряд научно-исследовательских задач:

1. Разработка и оптимизация тепловых схем автономного энергетического модуля. Имитационное моделирование функционирования КАЭМ в децентрализованных энергосистемах с различной структурой потребления энергии.

В первую очередь будут разработаны варианты тепловых схем когенерационного автономного энергетического модуля. Значения параметров предложенных схем будут оптимизированы с позиции максимизации КПД модуля, будут предусмотрены мероприятия по обеспечению высокой маневренности (применение пневматических и тепловых аккумуляторов). Построение моделей тепловых схем позволит на ранних этапах определить условия работы модуля и сформировать наиболее четкие требования к облику разрабатываемого КАЭМ, к его маневренным характеристикам, что важно для проработки каждого из узлов. Для различных климатических условий и неравномерности потребления энергии будут определены требования к пневматическим аккумуляторам электрической энергии и аккумуляторам тепловой энергии, которые позволят компенсировать неравномерность суточных нагрузок энергопотребления. Данная задача будет решена с помощью программных комплексов GateCycle и AspenONE, предназначенных для моделирования разнообразных технологических схем с целью определения и оптимизации параметров их работы.

1. Разработка технических решений для создания теплового аккумулятора и пневматического аккумулятора электрической энергии для эксплуатации в составе КАЭМ в арктических условиях.

Необходимость разработки аккумуляторов энергии в рамках настоящего проекта определяется необходимостью осуществлять регулирование в широком диапазоне нагрузки КАЭМ для покрытия спроса на электрическую и тепловую энергию, характеризующегося высокой степенью неравномерности в суточном и годовом разрезах.

В целях повышения эффективности пневматического аккумулятора будут решены задачи:

* разработка технических решений по повышению аэродинамической эффективности компрессора и турбины пневматического аккумулятора за счет оребрения рабочих колес;
* разработка технических решений по минимизации гидравлического сопротивления регулирующей арматуры пневматического аккумулятора на всех степенях открытия;
* разработка антиобледенительной системы, обеспечивающей работоспособность пневматического аккумулятора в арктических условиях.

Указанные решения будут разработаны при активном применении методов инженерного анализа, численного моделирования, инструментов трехмерного профилирования и будут верифицированы путем проведения экспериментальных исследований созданного образца аккумулятора.

В целях повышения теплового аккумулятора будут решены задачи:

- разработка предложений по использованию композитной тепловой изоляции.

Предполагается, что в рамках проекта будут предложена композитная тепловая изоляция, обеспечивающая на 20% более длительное сохранение температуры теплоносителя в рабочем диапазоне значений.

1. Разработка технических решений для создания эффективного котельного агрегата, работающего на местных низкокалорийных энергоресурсах (твердом биотопливе и низкосортном угле), который включает в себя:

* разработку конструкций топочной камеры и схемы подвода топлива и окислителя для эффективного сжигания летучих компонент в закрученном потоке;
* разработку решений для борьбы с уносом твердых частиц топлива из зоны активного горения;
* разработку конструкции устройств, предназначенных для предварительной термической подготовки топлив за счет теплоты уходящих газов.

На первом этапе разработки решений для создания перспективного биокотла планируется проведение подробных теоретических исследований, включающих в себя:

* определение оптимального соотношения между первичным и вторичным воздухом для различных схем подвода окислителя и вариантов организации топочного пространства;
* определение влияния термической подготовки топлива на параметры процесса их горения;
* исследование и разработка различных способов сжигания летучих компонент в закрученном потоке;
* исследование и разработка различных способов борьбы с уносом при слоевом сжигании твердого топлива.

Предполагаемые методы исследования должны обеспечивать детальное изучение особенностей организации горения твердых топлив, в том числе способов организации двухступенчатого сжигания. Предполагается изучение нескольких способов организации подвода вторичного воздуха: встречный, прямой (вектор струи вторичного воздуха направлен ортогонально вектору горячих газов), тангенсальный. В ходе исследования планируется установить универсальные соотношения расходов первичного и вторичного воздуха для дожигания летучих веществ. Теоретические исследования будут выполнены при активном использовании различных инструментов численного моделирования (Ansys CFX и Fluent), будут построены конечно-элементные модели для расчета сопряженной задачи расчета горения топлива и газодинамики потока.

На втором этапе будут разработаны и изготовлены экспериментальный стенд и экспериментальный образец топочной камеры биокотла, проведены физические эксперименты на огневом стенде, в целях проверки работоспособности разработанных решений, работоспособности теплообменной системы двигателя Стирлинга в условиях подвода теплоты в цикл, соответствующим реальным.

В итоге будет разработана конструкция биокотла, обеспечивающего стабильное, контролируемое горение твердых низкосортных топлив с высокими экологическими и энергетическими показателями.

1. Важной задачей в разработке и создании КАЭМ является создание технических решений, обеспечивающих увеличение на 14% удельной мощности двигателя работающего по циклу Стирлинга при КПД по выработке электрической энергии не менее 26 %. Для этого будут выполнены следующие задачи:

* исследование и анализ теплофизических свойств рабочих тел двигателя Стирлинга, выбор наиболее перспективных с точки зрения повышения частоты его работы;
* термодинамический анализ цикла Стирлинга и определение оптимальных по критерию максимума КПД параметров рабочего тела в каждой точке цикла (давление, температура) для различных рабочих тел;
* исследование влияния эффективности теплообменной системы и её гидравлического сопротивления на параметры работы двигателя;
* разработка тепловой модели двигателя Стирлинга, учитывающей гидравлическое сопротивление теплообменной системы и неидельность процесса теплопередачи;
* разработка теплообменной системы для подвода/отвода теплоты из цикла двигателя и регенератора теплоты: разработка конструкции теплообменного аппарата «горячие газы/рабочее тело двигателя» со сложной системой капиллярных каналов, проработка возможности его изготовления с помощью аддитивных технологий, разработка конструкции теплообменного аппарата «холодный источник/рабочее тело двигателя», разработка оригинальной матричной конструкции регенератора, проработка возможности его изготовления с помощью аддитивных технологий.

Для разработки эффективных теплообменных систем, обеспечивающих нагрев рабочего тела двигателя до заданного уровня температур, будут использоваться численные методы исследования, применение которых позволит получить подробную картину протекания процессов теплообмена (распределение тепловых потоков, эпюры температуры на поверхности теплообменной поверхности) и сделать выводы об эффективности и работоспособности конструкции. Проведение численных экспериментов будет включать в себя решение сопряженных задач (горения топлива и теплообмен) и моделирование нестационарных процессов. В ходе разработок будут выбраны наилучшие конструкции и созданы физические модели для проведения экспериментальных исследований.

В ходе работ будет разработан и изготовлен экспериментальный образец двигателя Стирлинга и экспериментальные стенды для исследования его рабочих характеристик и эффективности работы в комплексе с оригинальной теплообменной системой. Результаты испытаний позволят верифицировать данные теоретических исследований в каждой фазе работы двигателя.

В рамках выполнения проекта будут поданы 4 патентные заявки:

* изобретение: «Автономная энергетическая установка малой мощности для совместной выработки тепловой и электрической энергии за счет использования местных низкосортных твердых топлив в условиях децентрализованных энергетических систем и экстремально низких температур».
* изобретение: «Теплообменная система на базе капиллярной архитектуры».
* полезная модель: «Конструкция топочной камеры для сжигания летучих газов в закрученном потоке».
* полезная модель: «Антиобледенительная система для пневматических аккумуляторов электрической энергии, работающих в климатических условиях Арктической зоны».

1. **Описание проблемы**

Реализация планов по социально-экономическому развитию Арктической зоны РФ невозможна без наличия надежной системы энергоснабжения, способной в условиях сурового климата и большой протяженности территорий удовлетворять постепенно возрастающие потребности в электрической и тепловой энергии. Арктическая зона Российской Федерации включает в себя: Мурманскую область, Ямало-Ненецкий и Чукотский автономные округа, частично: Республику Коми, Архангельскую область, Красноярский край, Республику Саха (Якутия). Территория Арктической зоны Российской Федерации составляет 4386,6 тыс. кв. км и занимает 25,7% от общей площади страны. Арктическая зона имеет ключевое геополитическое значение. На её территории сосредоточено 90 % извлекаемых ресурсов углеводородов всего континентального шельфа Российской Феде¬рации, проживает более 2,5 млн человек и сосредоточены крупные производственные активы судостроительных (АО «ПО «СевМаш», АО «Центр судоремонта «Звездочка») и добывающих компаний (ПАО «ГМК «Норильский никель», ПАО «Газпром», ПАО «АЛРОСА», ПАО «Росэнефть»). На данный момент экономика Российской Арктики обеспечивает более 10% ВВП страны и производит более 20% российского экспорта (газ, нефть, минеральные полезные ископаемые), согласно данным книги Энергия Арктики/М.О. Моргунова, А.Я. Цуневский/под научн. ред. В.В. Бушуева – М.: ИЦ «Энергия», 2012. — 84 с.

Уровень централизации и состояние электроэнергетической системы Крайнего Севера может существенно отличаться в отдельно взятых регионах. Архангельская область и отдельные районы Республики Коми являются территориями с ограниченной конкуренцией на оптовом рынке электрической энергии и мощности. Чукотский автономный округ, Республика Якутия и отдельные районы Красноярского края технологически изолированы от Единой энергетической системы, энергетическая система указанных субъектов РФ функционирует автономно. Энергетическая система Мурманской области и Ямало-Ненецкого автономного округа подключена к Единой энергетической системе РФ. Однако даже при высоком уровне централизации энергоснабжения на практике подключены к магистральным линиям электропередачи, как правило, потребители, расположенные в черте крупных городов, например, Мурманск, Архангельск, Северодвинск, Норильск, Воркута. Малые населенные пункты и промышленные объекты (в особенности в сфере добычи природных ресурсов), расположенные на значительном удалении от крупных центров, обеспечиваются электрической энергией от децентрализованных источников электрической и тепловой энергии, в качестве которых выступают дизельные электростанции (ДЭС), газопоршневые установки (ГПУ), газотурбинные электростанции (в случае расположения установок в непосредственной близости от газотранспортной системы и добывающих скважин) и котельные малой мощности. Например, в республике Саха (Якутия) централизованным электроснабжением охвачено только 37% территорий, а порядка 160 населенных пунктов обеспечивается электроэнергией от дизельных электростанций и газопоршневых установок. В силу большой протяженности территорий Арктической зоны, а также низкой плотности населения и наличия удаленных населенных пунктов, развитие централизованных систем энергоснабжения представляется нецелесообразным в силу высоких капитальных затрат, которые потребуются для строительства магистральных линий электропередач и транспорта высококалорийных углеводородов (природного газа и нефти).

Использование для энергообеспечения удаленных потребителей установок на базе двигателей внутреннего сгорания, работающих на высококалорийных и дорогостоящих топливах (дизельное топливо, сжиженный природный газ, печное топливо), сопряжено со значительными затратами на транспортировку топлива к месту потребления, вследствие чего себестоимость отпуска электроэнергии оказывается крайне высокой (порядка 10-15 руб./кВт\*ч, до 40 руб./кВт\*ч). Кроме того, существенной проблемой является отсутствие хорошо развитой транспортной инфраструктуры, что обуславливает высокий риск срыва поставок топлива и низкую надежность электро- и теплоснабжения. В совокупности указанные проблемы актуализируют развитие децентрализованных энергетических систем, источником энергии в которых должны выступать энергетические установки, работающие на местных видах низкосортных энергетических ресурсов, в избытке представленных в Арктическом регионе.

Анализируя зарубежный опыт решения проблемы энергоснабжения арктических территорий можно отметить, что распределенная генерация составляет значительную долю в энергообеспечении. Более 25% производства электрической энергии в Арктической зоне Дании приходится на станциях, использующих возобновляемые источники энергии (ветроустановки, биотопливо, гидроэнергетика). Для Исландии этот показатель составляет 20%, а в Финляндии около 15%. Стоит отметить, что в Арктической зоне других стран на данный момент активно развиваются установки, работающие на энергии солнца и ветра. Однако зависимость данных технологий от погодных условий приводит к тому, что для обеспечения гарантированного отпуска энергии в составе децентрализованных энергосистем необходимо наличие источника энергии, работающего независимо от окружающей среды. Одним из таких решений является комбинация солнечных и дизельных энергетических установок. Разумной альтернативой использованию дизельной генерации является создание и развитие установок, работающих на топливе, которое можно легко произвести из местного сырья и отходов (низкокачественного угля и топливных гранул, изготовленных из отходов деревообрабатывающих производств).

Отсутствие решения проблемы надежного и экономически эффективного энергоснабжения децентрализованных потребителей, расположенных в Арктической зоне РФ будет тормозить любые инициативы по социально-экономическому развитию Арктики, поскольку высокая себестоимость электроэнергии является большой нагрузкой для местных бюджетов регионов в силу необходимости компенсации разницы между социально приемлемым тарифом и фактической стоимостью энергетической продукции. Отсутствие уверенности у бизнеса в возможности покупки электрической и тепловой энергии по доступным ценам будет оставаться существенным барьером на пути повышения экономической активности территорий Крайнего Севера.

1. **Обоснование актуальности**

Стратегия научно-технологического развития РФ определила получение научно-технических результатов и создание на их основе технологий, направленных на переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, формирование новых источников и способов транспортировки энергии, а также освоение территорий Арктической зоны РФ в качестве приоритетов развития. В рамках проекта будут созданы технические решения, обеспечивающие возможность создания когенерационного автономного энергетического модуля (КАЭМ) для выработки тепловой и электрической энергии на основе использования низкокалорийных энергетических ресурсов Арктической зоны. Эксплуатация перспективной энергетической установки, представляющей собой комбинацию твердотопливного биокотла, двигателя Стирлинга и аккумуляторов тепловой и электрической энергии, приведет к снижению потребления дорогостоящего углеводородного топлива (дизеля и природного газа), повышению эффективности использования ресурсов Арктики и полезному использованию отходов деревообработки.

Современные свободнопоршневые двигатели Стирлинга обеспечивают высокий для генерирующих установок малой мощности КПД равный 25 % и обладают достаточно высоким ресурсом до капитального ремонта, достигающим значений 60 000-80 000 часов, что в 2-3 раза превышает аналогичный показатель у дизельных генераторов. Мощностной ряд двигателей Стирлинга достаточно широк: от 1 до 250 кВт. Соответственно, двигатели Стирлинга могут использоваться как для индивидуального электроснабжения, так и для обеспечения энергией малых населенных пунктов, находящихся в изолированных районах с неразвитой инфраструктурой и при этом обеспечивать высокие эксплуатационные показатели при невысоких капитальных затратах.

Целесообразность решения указанной проблемы на основе обозначенных решений обусловлена в том числе тем, что использование местных твердых видов топлив и твердых биотоплив, произведенных из растительной биомассы, доступных в Арктической зоне РФ затруднительно для выработки электрической энергии на основе традиционных для энергетики энергоустановок малой мощности. Существующие двигатели внутреннего сгорания (дизель-генераторы, газопоршневые установки) работают на высококачественном и дорогостоящем топливе (дизеле и природном газе), характеризуются низким ресурсом до капитального ремонта (15 000 моточасов для ДЭС и 45 000 моточасов для ГПУ мощностью до 1 МВт). Традиционные двигатели внешнего сгорания – паротурбинные установки (ПТУ) предназначены для энергообеспечения крупных потребителей. Создание ПТУ микро- и малой мощности экономически нецелесообразно в силу большой металлоемкости паровой турбины и котла, которая тем выше, чем меньше установленная мощность. Как правило, мощность паротурбинных установок малой мощности начинается от 100 кВт. Другой тип двигателей внешнего сгорания – газотурбинные установки (ГТУ) – характеризуются более низкой границей минимальной установленной мощности (вплоть до 30 кВт у микротурбинных установок фирмы Capstone). Однако в качестве топлива в ГТУ может быть использовано либо жидкое (керосин, дизель), либо газообразное топливо с высокой теплотворной способностью, в частности, природный газ. На сегодняшний день перспективным решением проблемы тепло- и электроснабжения малых коллективных и индивидуальных потребителей, находящихся в изолированных районах, является развитие когенерационных установок, работающих на местных низкосортных видах топлива и использующих в качестве привода электрогенератора двигатели Стирлинга.

Актуальность развития подобных энергоустановок также подтверждается наличием соответствующих патентов. В патентах РФ № 160122 и РФ № 2300654 описаны автономные когенерационные установки с двигателем Стирлинга, работающие на биотопливе (щепе, древесине). Существенным отличием данных энергетических модулей является наличие в технологической схеме газификаторов низкосортного топлива для получения генераторного газа, пригодного для сжигания в камере сгорания двигателя Стирлинга. Двухстадийное сжигание твердого топлива значительно усложняет технологическую схему генерирующей установки, что в свою очередь приводит к увеличению металлоемкости конструкции и ее удорожанию. Представленные сегодня на рынке двигатели Стирлинга, в том числе реализуемые российскими компаниями (компания Президент-Нева и ВРС Group), предназначены для работы на только на газовом топливе. Предлагаемая технология получения тепловой и электрической энергии, представляющая собой комбинацию биотопливного котельного агрегата и двигателя Стирлинга может стать решением проблемы, обозначенной в разделе «Описание проблемы».

Разработка предлагаемой технологии включает в себя три важные группы научно-технических задач.

Первая группа задач связана с решением основной проблемы двигателя Стирлинга – высокой металлоемкости (низкой удельной мощностью), которая является препятствием для развития энергоустановок данного типа. При транспортировке оборудования на большие расстояния габариты и масса выступают критическим параметром. Повышение удельной мощности традиционно идет по пути увеличения давления рабочего тела, однако повышение давления сверх 100-120 атм представляется нерациональным в силу необходимости утолщения стенок гильзы двигателя и усложнения системы уплотнений. Альтернативным способом увеличения удельной мощности двигателя является увеличение частоты работы двигателя, что можно реализовать при неизменном рабочем объеме, путем использования рабочих тел с высокой теплопроводностью, теплоемкостью и малой динамической вязкостью (гелий, водород), а также благодаря интенсификации процесса теплообмена между горячим/холодным источниками и рабочим телом двигателя. В настоящее время ведутся работы, касающиеся вопросов разработки и улучшения систем теплообмена. Например, в статье Timoumi Y., Tlili I., Nasrallah S. B. Performance optimization of Stirling engines //Renewable Energy. – 2008. – Т. 33. – №. 9. – С. 2134-2144 изучают влияние конструкции и свойств материала регенератора двигателя Стирлинга на его выходную мощность и эффективность работы. А публикация Crema L. et al. Development of a pellet boiler with Stirling engine for m-CHP domestic application //Energy, Sustainability and Society. – 2011. – Т. 1. – №. 1. – С. 5 посвящена вопросам создания когенерационных модулей, сочетающих в себе пеллетный котел и двигатель Стирлига.

Конструкция теплообменной системы должна обеспечивать эффективную передачу теплоты, при низком гидравлическом сопротивлении. Для выполнения данной задачи будут разработаны варианты конструкции теплообменного аппарата со сложной системой капиллярных каналов, для изготовления которых целесообразно применение аддитивных технологий.

Еще одним немаловажным фактором эффективного функционирования когенерационного модуля является обеспечение его маневренности и возможности изменения соотношения вырабатываемых тепловой и электрической энергии, что связано с существенной неравномерностью суточного потребления энергии, обусловленной в том числе суровыми климатическими условиями в Арктической зоне. Для решения указанной проблемы будут разработаны технические решения для аккумулирования электрической и тепловой энергии. Для хранения электрической энергии предлагается разработать пневматический аккумулятор с эффективной регулирующей арматурой, компрессором и турбиной, оборудованный специальной антиобледенительной системой, обеспечивающей работоспособность оборудования при температурах до -60 оС. В части создания тепловых аккумуляторов будут подобраны комбинации теплоизоляционных материалов, обеспечивающих максимальное сохранение теплоты в условиях Арктических морозов.

Третья группа задач ориентирована на разработку котельного агрегата, работающего на местных низкосортных видах топливах. Существующие на данный момент котлы на биотопливе обладают достаточно высоким реальным КПД, составляющим 91-92 %. Однако он может быть дополнительно увеличен за счет применения оригинальных решений для дожигания летучих газов в закрученном потоке и предотвращения уноса несгоревших частиц топлива из зоны топочной камеры, обеспечивающих минимизацию коэффициента избытка окислителя при полном выгорании топлива.

Зарубежные аналоги котла не могут быть использованы в КАЭМ, в том числе в связи с тем, что в конструкции биокотла должна быть обеспечена совместимость разработанной конструкции теплообменной системы и газового тракта котла без оказания первым негативного влияния на стабильность и контролируемость процесса горения топлива.

Вопросы создания когенерационных установок с двигателями Стирлинга рассматривались в ранее выполненных в России проектах. В проектах «Исследования и разработка критических технологий применительно к двигателю Стирлинга в составе автономного когенерационного источника энергии на твердой растительной биомассе» (Регистрационный номер НИОКТР 01201373062) и «Создание двигателя с внешним подводом теплоты по циклу Стирлинга для многотопливного автономного источника тепловой и электрической энергии» (Регистрационный номер НИОКТР 01201052682) основной упор был сделан на разработку конструкций регенераторов, которые являются частью теплообменной системы, и не рассматриваются вопросы совершенствования процессов сжигания топлива, повышения удельной мощности двигателя Стирлинга и увеличения маневренных характеристик энергетической установки. Также не рассматривается возможность использования аддитивных установок для изготовления элементов теплообменной системы.

Разработка технологии автономного производства тепловой и электрической энергии на базе КАЭМ, основанных на совместном функционировании биотопливного котельного агрегата и двигателя Стирлинга, соответствует прогнозу научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года в области перспективных технологий эффективного использования энергетической биомассы, а также перспективных технологий аккумулирования тепловой энергии в области суточных накопителей.

1. **Новизна и научно-технический уровень**

В ходе выполнения будут получены результаты, способные к правовой охране.

Научная новизна результатов предлагаемого проекта состоит в разработке научно-технических решений, обеспечивающих возможность создания перспективных когенерационных модулей для производства тепловой и электрической энергии за счет использования местных энергетических ресурсов Арктической зоны в целях энергоснабжения индивидуальных и коллективных потребителей в условиях высокой неравномерности потребления и экстремально низких температур.

В целях достижения цели проекта будут разработан ряд оригинальных технических решений для отдельных элементов перспективного модуля, способных к правовой охране:

1. Твердотопливный биокотел для индивидуального или коллективного энергоснабжения. Планируется разработать комплекс решений, позволяющих эффективно сжигать имеющиеся в Арктической зоне низкокалорийные энергетические ресурсы (низкосортный уголь и гранулированное биотопливо, произведенное из отходов лесопереработки). Высокая эффективность будет достигнута благодаря разработке оригинальных конструкций топочных камер и схем подвода окислителя и топлива. Суть нововведений состоит в организации ступенчатого сжигания твердого топлива в слое, предполагающего дожигание летучих компонент в закрученном потоке. Закрутка потока будет обеспечиваться особой схемой расположения сопел вторичного дутья и организацией внутри топки ускорения движения горячих газов. Показателем эффективности указанного решения является содержание монооксида углерода, содержащийся в уходящих газах. Средний уровень этого показателя котлом малой мощности достигает 1000-2000 ppm (согласно статье Buczyński R., Weber R., Szlęk A. Innovative design solutions for small-scale domestic boilers: Combustion improvements using a CFD-based mathematical model //Journal of the Energy Institute. – 2015. – Т. 88. – №. 1. – С. 53-63). Топка биокотла, которая будет разработана в рамках проекта обеспечит концентрацию CO на выходе из топочной камеры не более 500 ppm. Данный эффект будет достигнут без увеличения коэффициента избытка окислителя.

В целях борьбы с уносом – одной из ключевых проблем в котлах со слоевым сжиганием, будут исследованы и предложены решения, во-первых, частично предотвращающие отрыв крупных частиц несгоревшего топлива от основного слоя, во-вторых, создающие газовую завесу, предотвращающую выход частиц топлива из зоны активного горения, и, тем самым, минимизирующие химический и механический недожег при минимальных избытках окислителя. Предложенные решения пока не запатентованы и не реализованы ни в одном котельном агрегате, доступном на открытом рынке.

2. Двигатель Стирлинга с эффективной теплообменной системой. Установка в качестве источника теплоты для двигателя Стирлинга компактных эффективных теплообменных систем, созданных на базе капиллярной архитектуры, позволит решить две проблемы:

* повысить частоту работы двигателя и, соответственно, увеличить его удельную мощность, снизить габариты;
* увеличить эффективность выработки электроэнергии за счет снижения недогрева между горячим/холодным источником и рабочим телом. Данная проблема также будет решения путем подбора оптимальных рабочих тел, характеризующихся высокой теплопроводностью, теплоемкостью и низкой кинематической вязкостью.

Использование аддитивных установок при изготовлении компактных теплообменных устройств снимет многие технологические ограничения и позволит создать более сложную теплообменную систему с развитой поверхностью теплопередачи, не создающую существенного гидравлического сопротивления при истечении греющей среды (горячих газов). В частности, могут быть легко изготовлены и испытаны теплообменные аппараты с трубками, например, плавникового типа, позволяющие нивелировать негативное влияние отрыва потока в теневой зоне при поперечном омывании пучков труб. Кроме того, шероховатость поверхности деталей, изготовленных аддитивным способом, выше и при определенных значениях чисел Рейнольдса происходит увеличение теплового потока конвекцией (при значениях l/d = 10-25). Следовательно, применение аддитивных установок открывают большие перспективы с точки зрения создания теплообменных систем.

3. Пневматический аккумулятор электрической энергии. Эксплуатация пневматических аккумуляторов в Арктической зоне будет затруднена низкими температурами и, как следствие, возможным частым обледенением рабочего колеса компрессора и турбины. Для решения данной проблемы будет разработана оригинальная антиобледенительная система, обеспечивающая подогрев холодного воздуха уходящими газами из биокотла путем подачи их во входной конфузор компрессора. Также планируется разработка воздушного регулирующего клапана, осуществляющего поддержание расхода воздуха на турбину, имеющего минимальное аэродинамическое сопротивление на всех степенях открытия (потери давления при степени открытия 0,5 не более 3%). Снижение сопротивления будет обеспечено специальным профилированием конфузорно-диффузорного канала, через который истекает воздух.

Существующие когенерационные установки на базе двигателя Стирлинга ENEX S (приняты в качестве аналога), реализуемые в России компанией «БПЦ Инжиниринг» обладают электрической мощностью 3,5 кВт, тепловой 15 кВт и электрическим КПД равным 25%, в качестве топлива используют природный газ среднего давления. Установка не оборудована тепловым или электрическим аккумулятором. В рамках выполнения проекта будут достигнуты следующие характеристики перспективной установки и её отдельных компонентов: тепловая мощность не менее 12 кВт (с возможностью суточного регулирования от 6-18 кВт); электрическая мощность не менее 4 кВт (с возможностью суточного регулирования от 1-7 кВт); выбросы СО не более 500 ppm; КПД котельного агрегата: не менее 93 %, КПД по выработке электрической энергии: не менее 26 %. Удельная мощность двигателя Стирлинга будет на 14% выше, чем у аналога. Повышение характеристик двигателя обеспечит разрабатываемой технологии конкурентные преимущества перед аналогами.

При разработке технологии будут применены следующие методы:

1. Определение конструктивного облика элементов когенерационного энергетического модуля будет выполняться путем моделирования различных вариантов тепловых схем, имитационного моделирования функционирования оборудования в децентрализованных энергосистемах с различной структурой потребления энергии. В результате будут определены оптимальные параметры и структура тепловой схемы модуля и сформулированы дополнительные технические требования к каждому из узлов установки, выполнение которых обеспечит успешную эксплуатацию КАЭМ в арктических условиях.
2. Разработка технических решений по увеличению удельной мощности двигателя Стирлинга будут включать в себя с одной стороны выбор наилучшего рабочего тела и оптимальных термодинамических параметров (температуры и давления в каждой фазе работы двигателя). Данная часть работ будет реализована путем выполнения теоретических исследований с использованием методов термодинамического анализа: эксергетический метод, метод тепловых и материальных балансов. С другой стороны, будут разработаны конструкции теплообменных аппаратов со сложной системой капиллярных каналов и регенератора, обеспечивающих нагрев рабочего тела до заданных значений при высоких частотах работы двигателя. Для достижения высокого качества и достоверности результатов будут применены как методы численного моделирования процессов тепломассопереноса (рабочего тела внутри «мертвого» объема двигателя и его рабочих полостей) и физические эксперименты, в рамках которых будут моделироваться различные условия подвода теплоты при различных режимах функционирования двигателя, что позволит определить реальную эффективность новых теплообменных систем и фактическое приращение электрической мощности. Разработка конструкции эффективного топочного устройства, схем подвода топлива и окислителя, будет базироваться на проведении теоретических исследований (инженерные методы анализа, математическое моделирование в программных пакетах Ansys CFX и Fluent) и физических экспериментов с активным применением высокочувствительных датчиков давления ICP, высокоточных температурных датчиков, телевизионной камеры и газоанализаторов, позволяющих определить концентрацию монооксида и диоксида углерода, кислорода, оксидов азота, водяного пара.

Патентоспособность будущего продукта подтверждается тем, что его техническая сущность является новой и неизвестной ранее, промышленная применимость очевидна. Результаты проекта помимо использования их для создания автономной когенерационной установки могут быть применены для разработки и практического внедрения отдельных его элементов: твердотопливный биокотел для индивидуального или коллективного энергоснабжения; двигатель Стирлинга с эффективной теплообменной системой, обеспечивающей возможность его применения в транспортных средствах различного назначения (автотехника, водный транспорт); компактные эффективные теплообменные системы созданные на базе капиллярной архитектуры, имеющие широкую сферу применения – системы утилизации теплоты в энергетических и промышленных агрегатах, в частности микротурбинных установках, системах теплоснабжения и транспортных средствах; нехимические аккумуляторы тепловой и электрической энергии, характеризующиеся высокой эффективностью, ресурсом и минимальными эксплуатационными издержками.

1. **Ожидаемые результаты**

В рамках выполнения проекта планируется достижение следующих результатов:

1. Будут разработаны (не менее трех) математические модели тепловых схем когенерационного энергетического модуля, обеспечивающие возможность глубокого регулирования тепловой и электрической нагрузки независимо друг от друга: суточное регулирование тепловой нагрузки в пределах от 6 до 18 кВт, электрической – от 1 до 7 кВт. Результаты исследований будут представлены в научных отчетах в виде математических моделей и алгоритмов расчета и научных статьях.

2. Будут разработаны технические решения по повышению удельной мощности двигателя Стирлинга не менее чем на 14% (по сравнению с аналогом ENEX S – 19,14 кг/кВт) за счет выбора оптимального рабочего тела и повышенной частоты работы двигателя, обеспеченной эффективным подводом и отводом теплоты от рабочего тела. При этом будет обеспечено повышение КПД по выработке электрической энергии до 26%. Результаты будут представлены в научных отчетах в виде совокупности результатов теоретических исследований, численных и физических экспериментов. Планируется разработка тепловой модели двигателя Стирлинга. Будет разработана ЭКД на экспериментальный стенд для исследования термодинамических процессов в рабочих полостях двигателя Стирлинга и ЭКД на экспериментальный образец двигателя Стирлинга.

3. Будет разработана конструкция (прототип) эффективной теплообменной системы, базирующейся на капиллярной архитектуре, обеспечивающей нагрев рабочего тела двигателя Стирлинга до заданных значений (600-700оС) при повышении частоты работы двигателя не менее чем до 2000 об/мин. Будут разработаны эскизная конструкторская документация на экспериментальный образец теплообменной системы и экспериментальный стенд для проверки эффективности разработанной конструкции. Результаты разработок будут представлены в научных отчетах и статьях. Будет подана патентная заявка на изобретение «Теплообменная система на базе капиллярной архитектуры».

4. Будут разработаны технические решения, обеспечивающие возможность создания эффективного пневматического аккумулятора с оригинальной антиобледенительной системой для функционирования в составе КАЭМ в арктических условиях. В составе аккумулятора будут разработаны конструктивные решения, обеспечивающие повышение аэродинамической эффективности компрессора и турбины (на 5% по сравнению с существующими аналогами), снижение аэродинамического сопротивления регулирующего клапана до 3 % (при степени открытия 0,5). Результаты будут представлены в научных отчетах, статьях, ЭКД на экспериментальный образец пневматического аккумулятора электрической энергии и ЭКД на экспериментальный стенд. А также будет подана патентная заявка на полезную модель: «Антиобледенительная система для пневматических аккумуляторов электрической энергии, работающих в климатических условиях Арктической зоны».

5. Будет разработана новая конструкция эффективного топочного устройства для преобразования химически связанной энергии биотоплива в тепловую энергию путем двухступенчатого сжигания твердого топлива, предполагающая дожигание летучих компонентов в закрученном потоке. Буду предложены и апробированы на экспериментальном стенде технические решения для борьбы с уносом твердых частиц топлива из зоны активного горения. Совокупность решений обеспечит полноту сжигания топлива (уровень выбросов CO не более 500 ppm) и высокий КПД по выработке тепловой энергии 93 %. Результаты будут представлены в научных отчетах, статьях, ЭКД на экспериментальный образец топочной камеры биокотла и ЭКД на экспериментальный стенд для верификации результатов теоретических исследований. А также будет подана патентная заявка на полезную модель: «Конструкция топочной камеры для сжигания летучих газов в закрученном потоке».

В целом полученные результаты позволят создать технологию когенерационной выработки энергии на базе автономного энергетического модуля малой мощности, пригодного для транспортировки в удаленные регионы и способного работать на местных низкокалорийных энергетических ресурсах в экстремальных условиях Арктической зоны РФ.

1. **Технические требования на выполнение НИОКТР**

по теме «Разработка технологий автономного производства тепловой и электрической энергии за счет использования местных низкокалорийных энергетических ресурсов Арктической зоны России для энергоснабжения индивидуальных и коллективных потребителей в условиях децентрализованных энергосистем»

1. Требования по назначению научно-технических результатов ПНИ

Разработанная в рамках настоящего проекта технология автономного производства тепловой и электрической энергии за счет использования местных энергетических ресурсов Арктической зоны для энергоснабжения индивидуальных и коллективных потребителей в условиях распределенных энергосистем, должны стать основой для создания установок тепло- и электроснабжения, которые могут найти применение в населенных пунктах, входящих в Арктическую зону Российской Федерации, в которых отсутствует централизованное энергоснабжение.

Технические решения, разработанные в рамках проекта, должны обеспечивать возможность создания когенерационного энергетического модуля с характеристиками:

* тепловая мощность: не менее 12 кВт (с возможностью суточного регулирования от 6-18 кВт);
* электрическая мощность не менее 4 кВт (с возможностью суточного регулирования от 1-7 кВт);
* выбросы СО не более 500 ppm;
* КПД котельного агрегата: не менее 93 %;
* КПД по выработке электрической энергии: не менее 26 %;
* удельная мощность двигателя Стирлинга должна быть на 14% выше, чем у аналога – 16,5 кг/кВт (без учета охладителя).

2. Требования к показателям и техническим характеристикам научно-технических результатов ПНИЭР:

2.1. Требования к экспериментальным образцам и стендам:

2.1.1. Требования к экспериментальному образцу двигателя Стирлинга с эффективной теплообменной системой, базирующейся на капиллярной архитектуре

* экспериментальный образец должен обеспечивать возможность проведения экспериментальных исследований процессов теплообмена для различных рабочих тел в двигателе Стирлинга;
* экспериментальный стенд должен обеспечивать возможность регистрации выходной мощности, частоты тока и количества подведенной/отведенной теплоты;
* электрическая мощность экспериментального образца должна быть не менее 1 кВт;
* экспериментальный образец должен обеспечивать возможность легкой замены теплообменной системы, рабочего газа и рабочего давления (в пределах до 40 атм).
* экспериментальный образец должен соответствовать требованиям техники безопасности.

2.1.2. Требования к экспериментальному образцу пневматического аккумулятора:

* экспериментальный образец должен обеспечивать возможность проведения испытаний при максимальном давлении 40 атм.;
* экспериментальный образец должен быть совместим с экспериментальным стендом для исследования рабочих характеристик пневматического аккумулятора;
* экспериментальный образец должен обеспечивать возможность выработки электроэнергии в течение не менее 15 часов;
* экспериментальный стенд должен состоять из устройства нагнетания давления, бака-ресивера, холодильного устройства, турбинной установки, антиобледенительной системы, генератора электроэнергии, а также запорно-регулирующей арматуры;
* экспериментальный образец должен быть функционален при температуре воздуха до - 60оС;
* экспериментальный образец должен соответствовать требованиям техники безопасности.

2.1.3. Требования к экспериментальному образцу теплообменной системы:

* экспериментальный образец должен состоять из теплообменного аппарата «уходящие газы/рабочее тело» и соединительных трубок;
* экспериментальный образец должен быть изготовлен из сплава, способного в течение 500 часов при температуре до 700 оС и давлении до 40 атм. обеспечивать целостность конструкции;
* экспериментальный образец должен предусматривать возможность установки термопар, датчиков давления и расходомера;
* экспериментальный образец должен обеспечивать нагрев рабочего тела двигателя Стирлинга до 700 оС при частоте работы 2000 об/мин;
* экспериментальный образец должен соответствовать требованиям техники безопасности.

2.1.4. Требования к экспериментальному образцу топочной камеры биокотла с сжиганием летучих веществ в закрученном потоке:

* экспериментальный образец должен быть оборудован тепловой изоляцией, обеспечивающей температуру поверхности корпуса топочного устройства не более 30 оС;
* экспериментальный образец должен обеспечивать возможность измерения концентрации монооксида углерода, кислорода и оксида азота на выходе из топочного устройства, температуру газов на выходе из газового тракта;
* экспериментальный образец должен быть оборудован смотровым окном, обеспечивающим возможность проведения высокоскоростной съемки процесса горения;
* экспериментальный образец должен предусматривать возможность изменения подачи воздуха в зону горения в целях моделирования режимов работы котла от 30 до 100%;
* экспериментальный образец должен обеспечивать возможность сжигания биотоплив разного состава;
* экспериментальный образец должен обеспечивать возможность установки экспериментального образца теплообменной системы и их совместной работы;
* концентрация CO на выходе из топочной камеры не должна превышать 500 ppm.
* система по предотвращению уноса несгоревших частиц топлива из топочной камеры должна задерживать до 70% частиц (по массе);
* экспериментальный образец должен предусматривать возможность изменения схемы подачи воздуха, толщины топливного слоя и соотношения расхода окислителя между ступенями;
* экспериментальный образец должен соответствовать требованиям техники безопасности.

2.1.5. Требования к экспериментальному стенду для исследования рабочих характеристик двигателя Стирлинга:

* экспериментальный стенд должен быть оборудован измерительной аппаратурой, позволяющей проводить измерения давления и температуры рабочего тела в каждой фазе цикла работы двигателя;
* экспериментальный стенд должен обеспечивать возможность легкой замены состава рабочего тела;
* экспериментальный стенд должен иметь возможность подключения дополнительных измерительных приборов;
* экспериментальный стенд должен обеспечивать возможность регистрации выходной мощности, количества подведенной/отведенной теплоты и частоты генерируемого тока;
* экспериментальный стенд должен отвечать требованиям техники безопасности.

2.1.6. Требования к экспериментальному стенду для исследования эффективности подвода теплоты к двигателю Стирлинга с помощью новых теплообменных систем:

* экспериментальный стенд должен обеспечивать возможность определения количества теплоты, воспринятой в теплообменном аппарате «уходящие газы/рабочее тело»;
* экспериментальный стенд должен обеспечивать возможность легкой замены экспериментального образца теплообменной системы;
* стенд должен отвечать требованиям техники безопасности;
* экспериментальный стенд должен обеспечивать возможность проведения экспериментальных исследований теплообменной системы, изготовленной в масштабе 1:1;
* экспериментальный стенд должен обеспечивать возможность осуществлять тепловизионную съемку поверхностей нагрева теплообменного аппарата;
* экспериментальный стенд должен обеспечивать возможность определения гидравлического сопротивления теплообменной системы;
* экспериментальный стенд должен обеспечивать возможность регулирования температуры подвода теплоты. Максимальная температура подвода теплоты не должна быть ниже 700 оС.

2.1.7. Требования к экспериментальному стенду для исследования рабочих характеристик пневматического аккумулятора:

* экспериментальный стенд должен обеспечивать возможность регистрации значений силы, напряжения и частоты вырабатываемого тока.
* экспериментальный стенд должен обеспечивать возможность охлаждения, рабочего воздуха до -60 °С;
* экспериментальный стенд должен предусматривать возможность измерения давления и температуры в баке-ресивере, в выходном канале регулирующей арматуры, на выхлопе воздушной турбины и в нескольких точках входного патрубка компрессора при включенной антиобледенительной системе;
* экспериментальный стенд должен обеспечивать возможность изменения давления в баке-ресивере и расхода воздуха на турбину;
* стенд должен обеспечивать возможность измерения толщины корки льда, образующейся на поверхности рабочих колес турбины и компрессора.
* стенд должен обеспечивать возможность регулирования температуры воздуха внутри бака-ресивера;
* экспериментальный стенд должен отвечать требованиям техники безопасности.

2.1.8. Требования к экспериментальному стенду для исследования топочных процессов при стадийном контролируемом сжигании топлива и низкосортного угля:

* экспериментальный стенд должен состоять из топочной камеры, колосниковой решетки, системы подачи первичного и вторичного окислителя, запорно-регулирующей арматуры, вентилятора, циклона (для золоулавливания), охладителя горячих газов, а также средств измерения.
* системы подачи первичного и вторичного окислителя должна обеспечивать возможность регулирования коэффициента избытка окислителя в диапазоне от 0,2 до 1,5;
* экспериментальный стенд должен предусматривать возможность изменения геометрии топочного пространства;
* экспериментальный стенд должен предусматривать возможность изменения угла подачи вторичного дутья в двух осях;
* экспериментальный стенд должен иметь возможность определения компонентного состава газов;
* экспериментальны стенд должен обеспечивать возможность изменения плоских температурных полей на 3-х отметках по высоте топки;
* экспериментальный образец должен обеспечивать возможность измерения отпускаемой тепловой энергии;
* экспериментальный стенд должен включать в себя систему золоулавливания, позволяющую определить массу уноса;
* экспериментальный стенд должен предусматривать возможность установки дополнительных измерительных средств;
* экспериментальный стенд должен отвечать требованиям техники безопасности