



Алгоритм разработки математической модели МЭК на базе паропоршневых электростанций

Рецензия эксперта на статью получена 04.04.2024 [The expert review of the article was received on April 4, 2024]

Введение

В связи с уменьшением запасов углеводородного топлива на планете вопрос создания и реализации планов по разработке альтернативных энергетических комплексов, способных работать на возобновляемом топливе, становится актуальным. Одной из таких энергетических установок может быть многофункциональный энергетический комплекс (МЭК) на базе паровой поршневой машины.

История развития паровых поршневых машин

Анализ применения паровой поршневой машины в исторической перспективе показывает, что это устройство нашло своё применение в самых различных областях, начиная от добычи полезных ископаемых на глубине 100 м и заканчивая использованием на самодвижущихся устройствах, например, на прототипах современных автомобилей.

Наиболее длительный период применения паровых поршневых машин (ППМ) связан с паровозами, которые сыграли зна-

чительную роль в истории, перевоза миллионов пассажиров и тонны различных грузов. Эти паровозы продолжают свою работу и по сей день. В работе [1] подробно описано основное устройство паровоза, включая паровой котёл, паровую машину и экипажную часть. Паровые машины также пробовали использовать в качестве привода для подъёма самолётов в воздух, а также для создания ряда других устройств и комплексов, например автомобиля с паровым двигателем [2].

Однако с развитием более совершенных устройств, включая двигатели внутреннего сгорания, энергетические комплексы на базе паровых поршневых машин постепенно ушли в прошлое.

Анализ применения паровой поршневой машины в исторической перспективе показывает, что это устройство нашло своё применение в различных областях, начиная от добычи полезных ископаемых

УДК 621.1. Научная специальность: 2.4.5.

Алгоритм оценки экономической эффективности применения многофункционального энерготехнологического комплекса

И.Я. Редько, д.т.н., профессор, Почётный энергетик Минэнерго России, вице-президент Национального союза энергосбережения (НСЭ); **А.В. Разуваев**, д.т.н., доцент, Почётный энергетик РФ, профессор кафедры «Атомная энергетика», Балаковский инженерно-технологический институт (БИТИ) — филиал Национального исследовательского ядерного университета (НИЯУ) «МИФИ» (г. Балаково, Саратовская область)

В работе представлены требования и алгоритм разработки математической модели работы многофункционального энерготехнологического комплекса (МЭК) на базе паровой поршневой машины (ППМ). Это способствует повышению надёжности при применении данного оборудования на объекте. Представлена краткая история применения паровых машин, которые способствовали ускоренному развитию мирового производства, особо отмечается использование паровых машин в качестве силового привода на паровозах. Обоснована актуальность применения ППМ в настоящее время и, в частности, использование их в составе многофункциональных энерготехнологических комплексов. Разработан и представлен алгоритм расчёта технико-экономического обоснования применения МЭК на конкретном объекте по согласованному с заказчиком техническому заданию. Кратко проанализировано влияние экономических параметров на конечный результат использования МЭК.

Ключевые слова: паровая поршневая машина, многофункциональный энерготехнологический комплекс, экономическая эффективность, срок окупаемости, математическая модель.

UDC 621.1. The number of scientific specialty: 2.4.5.

Algorithm for assessing the economic efficiency of application multifunctional energy and technological complex

I. Ya. Redko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honorary Power Engineer of the Ministry of Energy of the Russian Federation, Vice-President of the National Union of Energy Saving (NUES); **A. V. Razuvaev**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Honorary Power Engineer of the Russian Federation, Professor of the Department of Atomic Energy, Balakovo Institute of Engineering and Technology (BIET) — branch of the National Research Nuclear University (NRU) "MEPhI" (Balakovo city, Saratov region)

The paper presents the requirements and algorithm for the development of a mathematical model for the operation of a multifunctional energy technology complex (METC) based on a steam piston engine (SPE). This contributes to increased reliability when using this equipment at the facility. A brief history of the use of steam engines, which contributed to the accelerated development of world production, is presented, the use of steam engines as a power drive on steam locomotives is particularly noted. The relevance of the use of SPE at the present time and, in particular, their use as part of multifunctional energy technology complexes is substantiated. An algorithm has been developed and presented for calculating the feasibility study of the use of METC at a specific facility according to the technical specification agreed with the customer. The influence of economic parameters on the final result of using the METC is briefly analyzed.

Key words: steam piston engine, multifunctional energy-technological complex, economic efficiency, payback period, mathematical model.

Применение паровых машин в настоящее время

В настоящее время использование паровых поршневых машин в составе энергетического комплекса связано прежде всего с возможностью использования возобновляемых и предпочтительно местных источников топлива вместо ограниченных запасов углеводородного топлива, находящихся в недрах нашей планеты [3]. Это позволяет рассматривать ППМ как альтернативные энергетические комплексы для привода различных устройств. Более подробную информацию на эту тему можно найти в работах [4, 5].

С одной стороны, известно, что эффективность использования ППМ на паровом составе составляет примерно 8%. С другой стороны, при использовании паровой поршневой машины, с учётом конденсации пара и возврата конденсата в рабочий цикл, эффективность может достигать около 40%. Этот уровень эффективности заслуживает внимания, особенно учитывая тот факт, что ППМ могут использо-

вать тепло не только для генерации электроэнергии, но и для отопления помещений на месте эксплуатации или обеспечения горячим водоснабжением. Параметры энергоснабжения и необходимое количество тепла могут быть настроены в соответствии с потребностями конкретного потребителя.

Учитывая гибкость применения ППМ для выполнения различных задач в составе необходимого оборудования, получаемая система может рассматриваться как многофункциональный энерготехнологический комплекс.

Создаваемый многофункциональный энерготехнологический комплекс

Таким образом, разнообразное применение МЭК и его эксплуатационные характеристики потребуют использования различного комплектующего оборудования. Поэтому параметры необходимого оборудования должны быть оптимизированы в соответствии с конкретной задачей, стоящей перед МЭК.

димой электроэнергии (например, в случае использования ППМ с генератором). Поэтому необходимо разработать алгоритм расчёта экономической целесообразности выбора конкретного варианта МЭК с учётом его назначения и соответствующей комплектации.

При создании такого энерготехнологического комплекса сегодня необходимо, чтобы он соответствовал всем современным требованиям. Для этого требуется разработка математической модели многофункционального энерготехнологического комплекса с учётом выбора оптимальных комплектующих и их эффективного функционирования в процессе эксплуатации.

Основные требования к разработке математической модели МЭК

Алгоритм разработки математической модели МЭК на основе паропоршневых электростанций включает в себя следующие этапы:

1. Разработка технологической схемы обобщённого МЭК, включая концепцию тягово-энергетического развития средств механизации и электрификации растениеводства, а также гибридной генерации МЭК с множеством каналов передачи энергии к потребителям различной физической природы.
2. Выработка основных технических требований к МЭК на основе паропоршневой электростанции.
3. Создание математической модели обобщённого МЭК на основе паропоршневой электростанции.

Технологическая схема обобщённого МЭК

Технологическая схема мобильного многофункционального энерготехнологического комплекса была построена на основе логического анализа и состоит из трёх подсистем: подсистема факторов внешних условий; подсистема общих конструктивно-компоновочных решений; подсистема энергетических и эксплуатационных свойств мобильного МЭК.

Между этими подсистемами и элементами системы установлены энергетические связи.

Следует отметить, что к подсистеме факторов внешних условий относятся прежде всего климатические условия — температура, плотность и влажность воздуха, показатели качества энергоресурсов (в том числе теплота сгорания различных возобновляемых топлив), графики нагрузок (суточный, месячный, сезонный и годовой), параметры почвы, размеры поля и многое другое.



вать возобновляемое топливо для генерации пара в паровых котлах.

В качестве возобновляемого источника топлива можно использовать древесину, которая широко распространена на территории нашей страны, с описанием и параметрами, представленными в работе [6].

Интеграция ППМ в состав энергетического комплекса может применяться для привода генератора (для производства электроэнергии), компрессора (для получения сжатого воздуха для технологических нужд потребителя), насоса (для перекачивания воды или жидкости), а также в качестве замены электродвигателя для привода лесопилки, конвейера, других устройств и агрегатов. Кроме того, есть потенциал использования отходяще-

Из схемы МЭК видно, что существуют различные параметры комплектующих изделий, которые взаимосвязаны и должны реагировать на изменение конкретного режима эксплуатации многофункционального энерготехнологического комплекса. При этом важно учитывать инерцию реагирования соответствующего оборудования и его параметров друг на друга. Подбор параметров комплектующей техники и различных изделий должен соответствовать параметрам эксплуатации и комплектации МЭК в различных режимах работы приводимого оборудования.

Применение разного рода техники в составе МЭК, его комплектация и параметры будут влиять на общую стоимость. Это отразится на себестоимости произво-

К подсистеме общих конструктивно-компоновочных решений относятся типы МЭК и энергоустановок, элементы системы: паровые котлы, ППМ, генераторы, редукторы, системы утилизации тепла, тепловые накопители энергии, конденсаторы, каналы передачи энергии и другое.

К подсистеме энергетических и эксплуатационных свойств относятся:

- показатели качества электрической и тепловой энергии;
- мощность системы, технологического средства, тяговых модулей, мотор-колёс, системы утилизации тепла, силовых генераторов, электропривода, преобразователей частоты, накопителей энергии;
- частота вращения ППМ, силовых генераторов, трансмиссий электростанции, ходовых систем, крутящий момент ППМ и основных модулей;
- часовой и удельный расходы топлива ППМ, основных модулей и МЭК в целом;
- КПД мобильного МЭК, модулей, и каналов передачи мощности к потребителям, тяговый КПД многофункционального энерготехнологического комплекса, коэффициент использования мощности МЭК и модулей;
- коэффициенты распределения мощности МЭК между модулями и непосредственными потребителями;
- массогабаритные показатели МЭК и модулей и многие другие показатели.

На этапе проектирования возможно определить тип МЭК, оптимальные конструктивно-компоновочные решения, оптимальные режимы работы и его параметры. Новые технические решения позволяют оптимизировать распределение сцепной массы комплекса между мобильным энергосредством и тяговыми модулями

Особенность разработки данной модели мобильного МЭК заключается в том, что математическое описание энергетических связей между элементами представлено таким образом, чтобы оптимизация режимов работы системы происходила по максимуму её полного КПД в зависимости от коэффициента распределения мощности на входе или на выходе этой системы. При этом оценка энергетической эффективности каждого элемента системы может быть представлена в виде его КПД в зависимости от распределения мощности между каналами её передачи, режимов работы и его характеристик.

Основные технические требования к МЭК на базе паропоршневой электростанции

На основе анализа тенденций развития мобильной техники и систем гибридной генерации были сформулированы основные технические требования к энергокомплексам на базе паропоршневой электростанции:

1. Многофункциональность.
2. Высокий уровень интеллектуализации и роботизации.
3. Модульная компоновка на основе типизации и конструктивной унификации.
4. Многотопливность, а также обязательная энергоэффективность.
5. Высокая энергонасыщенность мобильного энергетического средства.
6. Утилизация сбросового тепла.
7. Автономная работа энергетических модулей.
8. Согласованность характеристик мобильного энергетического средства (энергетического модуля), технологических модулей и тяговых модулей.
9. Высокий коэффициент использования времени смены.
10. Возможность параллельной работы мобильного МЭК с энергосистемой.
11. Возможность использования мобильного МЭК в качестве резервного источника энергии.
12. Обеспечение высокого качества и стабильности получаемой электрической и тепловой энергии.
13. Надёжность, ресурс и эффективность функционирования мобильных МЭК.
14. Типизация и унификация мобильного парка для отраслей ТЭК и АПК, энергетического оборудования и комплектующих, топлив и моторных масел.
15. Топливная экономичность, затраты на техническое обслуживание и ремонт.
16. Оптимальное уплотнение движителями почвы.
17. Устойчивость движения МЭК.
18. Всесторонняя защита окружающей среды при использовании энергетического оборудования.
19. Ремонтопригодность.
20. Транспортабельность.
21. Демпфирование колебаний в конструкции.
22. Возможность параллельной работы мобильного МЭК с энергосистемой.

Математическая модель обобщённого МЭК на базе паропоршневой электростанции

В качестве основы для разработки математической модели обобщённого мобильного многофункционального энергетического комплекса, имеющего множе-

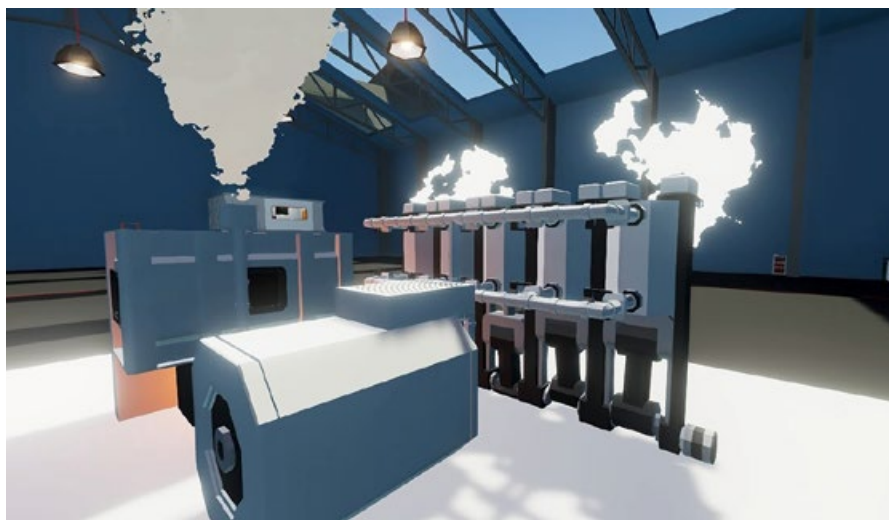
ство каналов передачи энергии к потребителям различной физической природы (а именно n каналов на тяговые модули, m каналов на активные рабочие органы, а также k каналов на электронно-ионные технологии) был применён разработанный дифференцированный метод оценки энергоэффективности использования энергоресурсов в комплексе.

Эта модель позволяет:

1. Обосновать и оптимизировать конструктивно-компоновочные решения мобильных МЭК различных типов с использованием многотопливных паропоршневых машин в зависимости от условий эксплуатации по критериям энергетической, технико-экономической эффективности и экологической безопасности.
2. Усовершенствовать структуру и распределение мощностных потоков и сцепной массы в мобильном МЭК на основе его математической модели.
3. Разработать принципы управления и интеллектуализации МЭК.
4. Разработать принципы и способы интеграции МЭК в состав энергетических систем для изолированных энергорайонов для повышения надёжности и эффективности их функционирования в интегрированных энергетических системах.
5. На этапе проектирования определить тип МЭК, оптимальные конструктивно-компоновочные решения, оптимальные режимы работы и его параметры. Новые технические решения позволяют оптимизировать распределение сцепной массы комплекса между мобильным энергетическим средством и тяговыми модулями для уменьшения воздействия на почву.
6. Оптимизировать рабочий цикл паропоршневого МЭК, работающего на возобновляемых видах топлива, для повышения управляемости, топливной экономичности и снижения выбросов вредных веществ в окружающую среду.

Таким образом, математическая модель обобщённого мобильного МЭК позволяет:

- рассмотреть с единых позиций технологические и энергетические процессы при работе комплекса любого типа;
- наметить и реализовать пути повышения эффективности мобильных МЭК и гибридной генерации благодаря обоснованию оптимальных общих конструктивно-компоновочных решений, оптимизации скоростных и силовых режимов;
- дать комплексную оценку последствий принимаемых решений в части формирования эксплуатационных характеристик МЭК или определить качества комплексов и предпочтительные условия их использования.



Она позволяет не только разработать методику по определению оптимальных параметров мобильных МЭК, но и создать основу для создания интеллектуальных мобильных МЭК. Достоинства такой модели заключаются прежде всего в том, что оптимальные параметры МЭК в целом и элементов системы в частности определяются в автоматическом режиме в реальном масштабе времени при наличии необходимых количественных характеристик внешних условий.

Экономическое обоснование применения МЭК

Кроме создания и внедрения математической модели МЭК, для реализации инновационного проекта необходимо и экономическое его обоснование.

Данное обстоятельство вынуждает разрабатывать технико-экономическое обоснование (ТЭО) для проекта МЭК в соответствии с согласованным с основным заказчиком техническим заданием (ТЗ). В данном ТЗ указываются назначение и все основные параметры эксплуатации и величины ресурсов эксплуатации необходимого комплекса. При этом используется математический аппарат с прогнозируемыми параметрами.

В типовой состав комплекса входят: паровой котёл, ППМ с генератором, регулятор пара, система подачи (хранения) топлива, конденсатор (радиатор) с регулируемым по оборотам вентилятором, конденсатный насос с электродвигателем, система управления и контроля, комплект трубопроводов и арматуры, комплект кабельной продукции.

Специфика и алгоритм расчёта ТЭО МЭК

При расчёте ТЭО необходимо учитывать и другие параметры, связанные с эксплуатацией МЭК, такие как пусконаладочные работы, текущее техническое обслуживание ППМ, проведение регламентных работ, вариант размещения МЭК (стацио-

нарное в капитальном здании или помещении либо в блок-контейнерном исполнении), а также другие работы, требующие обслуживания комплектующих.

Технико-экономическое обоснование также включает затраты на текущий контроль за работой энерготехнологического комплекса с участием оператора (или операторов) в зависимости от количества смен его эксплуатации.

Для расчётов ТЭО применения МЭК на конкретном объекте для привода генератора и обеспечения электроснабжения принимаем следующие исходные данные: мощность МЭК (электрическая) — 150 кВт, расход пара — 1890 кг/ч, работа круглосуточно — 24 ч.

Осуществляем подбор необходимого оборудования для обеспечения работы МЭК и, опираясь на цены, доступные в интернете (на момент расчёта), определяем один из основных показателей — срок окупаемости. Для ускорения расчётов методика ТЭО была перенесена на простую компьютерную программу, что позволяет быстро получать результаты при варьировании введённых данных.

Результаты расчёта показывают следующее: относительные затраты на топливо составляют около 1,5 %, фонд оплаты труда операторов — 56 %, текущие затраты на обслуживание паропоршневой машины и расходные материалы — 56 %.

Используя программу расчёта, уменьшаем размер оплаты труда операторов в два раза (например, используя совместительство), что приводит к следующим данным: срок окупаемости составляет 1,4 года, относительные затраты на оплату труда операторов снижаются до 38,8 %.

Кроме того, можно применить пеллеты с более высокой теплотой сгорания и более низкой стоимостью, что также принесёт положительный эффект. Следует отметить, что использование пеллет в качестве топлива позволяет автоматизировать процесс их подачи непосредственно в топку парового котла.

Существуют и другие возможности изменения параметров, однако исследование по данной теме запланировано на следующем этапе работы с применением ППМ на конкретных объектах для уточнения необходимой мощности энергоустановки. Имея режимы работы установки на объекте, можно определить среднюю эксплуатационную мощность и, следовательно, расход пара и топлива.

Существует множество вариантов и комбинаций параметров МЭК для выбора оптимального решения.

Основные выводы

Разработан и представлен алгоритм математической модели многофункционального энергетического комплекса, позволяющий оценивать его как современную энергоустановку, не только обладающую обоснованными технико-экономическими показателями, но и отвечающую всем требованиям основного заказчика.

На основе проведённого анализа экономической эффективности МЭКа, используя паропоршневой двигатель для производства электроэнергии для собственных нужд потребителя, видно, что даже при имеющихся тарифах на электроэнергию имеет смысл рассматривать МЭК на основе ППД как экономически целесообразную энергоустановку.

Предложенный алгоритм расчёта технико-экономического обоснования позволяет учитывать специфику применения многофункционального энергетического комплекса на объекте и его комплектацию. Быстрый вариант расчёта при изменении одного из параметров позволяет получать варианты других показателей и, по возможности, достигать максимальной экономической эффективности применения МЭК на объектах. ●

1. Как устроен паровоз. Наглядно на примере самого массового советского паровоза в разрезе [Электр. текст]. «Город моторов» от 09.10.2022. «Яндекс.Дзен». Режим доступа: dzen.ru. Дата обращения: 15.02.2024.
2. Яров Р. Автомобилем движет... пар [Электр. текст]. «Моделист-Конструктор» от 21.02.2019. Режим доступа: modelist-konstruktor.com. Дата обращения: 10.08.2023.
3. Разуваев А.В., Редько И.Я., Краснотудский Н.В., Костин Д.А. Актуальность применения возобновляемых топлив в энергетических комплексах // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования, 2022. Т. 23. №3. С. 191–197.
4. Разуваев А.В., Редько И.Я. Актуальность создания многофункциональных энерготехнологических комплексов на базе паропоршневой машины // Журнал СОК, 2022. №2. С. 60–63.
5. Редько И.Я., Разуваев А.В. Актуальность применения паровых машин // Энергетик, 2019. №1. С. 27–30.
6. Разуваев А.В., Редько И.Я., Краснотудский Н.В., Костин Д.А. Актуальность применения возобновляемых топлив в энергетических комплексах // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования, 2022. Т. 23. №3. С. 191–197.

References — see page 78.

Algorithm for assessing the economic efficiency of application multifunctional energy and technological complex. Pp. 64–67.

Ivan Ya. Redko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honorary Power Engineer of the Ministry of Energy of the Russian Federation, Vice-President of the National Union of Energy Saving (NUES); **Alexander V. Razuvaev**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Honorary Power Engineer of the Russian Federation, Professor of the Department of Atomic Energy, Balakovo Institute of Engineering and Technology (BIET) — branch of the National Research Nuclear University (NRU) “MEPhI” (Balakovo city, Saratov region)

1. *Kak ustroen parovoz. Nagljadno na primere samogo massovogo sovetskogo parovoza v razreze* [How a steam locomotive works. This is illustrated by a cross-section of the most popular Soviet steam locomotive]. “Gorod motorov” [“Motor City”] of October 9, 2022 on “Yandex. Dzen”. Web-source: dzen.ru. Access date: February 15, 2024. [In Russian]
2. R. Jarov. *Avtomobilem dvizhet... par* [The car is driven by... steam]. “Modelist-Konstruktor” [“Modeler-Constructor”] of February 21, 2019. Web-source: modelist-konstruktor.com. Access date: August 10, 2023. [In Russian]
3. A.V. Razuvaev, I.Ja. Redko, N.V. Krasnoludsky, D.A. Kostin. *Aktual'nost' primeneniya vozobnovljajemykh topliv v jenergeticheskikh kompleksakh* [The relevance of the use of renewable fuels in energy complexes]. *Vestnik RUDN. Serija: Inzhenernye issledovanija* [Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Research]. 2022. Vol. 23. No. 3. Pp. 191–197. [In Russian]
4. A.V. Razuvaev, I.Ja. Redko. Aktual'nost' sozdaniya mnogofunktsional'nykh jenergotekhnologicheskikh kompleksov na baze paroporshevoj mashiny [The relevance of creating multifunctional energy technology complexes based on a steam piston machine]. *Zhurnal San-tekhnika, otoplenie, konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2022. No. 2. Pp. 60–63. [In Russian]
5. I.Ja. Redko, A.V. Razuvaev. *Aktual'nost' primeneniya parovykh mashin* [The relevance of the use of steam engines]. *Jenergetik* [“Power Engineer” Magazine]. 2019. No. 1. Pp. 27–30. [In Russian]
6. A.V. Razuvaev, I.Ja. Redko, N.V. Krasnoludsky, D.A. Kostin. *Aktual'nost' primeneniya vozobnovljajemykh topliv v jenergeticheskikh kompleksakh* [The relevance of the use of renewable fuels in energy complexes]. *Vestnik RUDN. Serija: Inzhenernye issledovanija* [Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Research]. 2022. Vol. 23. No. 3. Pp. 191–197. [In Russian]