

Алгоритм расчёта когенерационной установки на базе паровой поршневой машины

Рецензия эксперта на статью получена
17.11.2025 [The expert review of the article
was received on November 17, 2025]

Целью настоящей работы является обоснование актуальности создания энергетических комплексов (ЭК) на базе паровых поршневых машин (ППМ), работающих на возобновляемом топливе. Данные ЭК способны вырабатывать как электрическую, так и тепловую энергию при применении системы утилизации вторичной теплоты. Таким образом, речь идёт о «энергетических комплексах на базе ППМ» или «когенерационных установках на базе паровых поршневых машин».

Применение систем утилизации вторичных энергоресурсов от энергоустановок (двигателей внутреннего сгорания) началось при их использовании на судах. Задача при этом стояла очень простая — экономия топлива. Меньший потребный объём топлива способствует как экономии энергоресурсов, так и уменьшению объёма и веса топливных бункеров, увеличивая чистую грузоподъёмность судна (дедвейт). Судовые энергоустановки стали одновременно вырабатывать как электроэнергию, так и практически бесплатное сопутствующее (утилизируемое) вторичное тепло для внутренних нужд. Это закрывало потребности в тепловой энергии для душа, пищеблока, сушки одежды для команды, отопления помещений и т.п., причём как в режиме движения судна, так и на штатной стоянке.

Затем опыт использования вторичных энергоресурсов от энергоустановки для получения «бросовой» (утилизируемой) теплоты постепенно переняли «на суше». Такие установки получили название «когенерационные». Дальнейшее их

применение на автономных объектах выявило следующий недостаток: объёмы получаемого вторичного тепла от энергоустановки зависят от величины вырабатываемой ей электрической энергии (работы дизель-генератора на производство электроэнергии). Этот вопрос был решён относительно просто: недостающая величина теплоты компенсируется установкой дополнительного теплогенератора, в качестве которого обычно выступает водогрейный котёл. Хотя это удорожает энергоустановку, но экономит исходные энергоресурсы (топливо), в том числе с помощью алгоритмов систем автоматического управления.

Таким образом, получаемая экономия связана с использованием «бросовой» вторичной (утилизируемой) теплоты и дополнительно, при необходимости, с применением дополнительного источника тепла (водогрейного котла).

В настоящее время вопросам и проблемам когенерации, как одному из самых эффективных способов энергосбережения на автономных объектах, уделяется достаточно большое внимание.

Когенерационные системы

Так, в работах [1, 2] и других дано обоснование и определена актуальность одновременной выработки электрической и тепловой энергии когенерационной энергетической установкой (КУ). Следует отметить, что в малой энергетике в таких системах в качестве силовой установки применяются дизельные или газовые двигатели внутреннего сгорания (ДВС).

УДК 621.17.013. Научная специальность: 2.4.5.

Алгоритм расчёта когенерационной установки на базе паровой поршневой машины

Александр Валентинович Разуваев, д.т.н., доцент, профессор, кафедра «Атомная энергетика», Балаковский инженерно-технологический институт (БИТИ, г. Балаково, Саратовская область), филиал Национального исследовательского ядерного университета МИФИ (НИЯУ МИФИ), Почётный энергетик РФ; **Алена Андреевна Акинфиева**, преподаватель, кафедра «Физика и естественнонаучные дисциплины», БИТИ НИЯУ МИФИ

В статье рассмотрены основы и алгоритм расчёта когенерационной установки (КУ) на базе паровой поршневой машины. Актуальность применения когенерационных установок представлена на основе анализа применения способа когенерации на базе дизель-генератора. Дан краткий анализ эффективности применения данной схемы с обоснованием параметров её работы. Представлено обоснование актуальности применения энергетической установки на базе паровой поршневой машины (ППМ). Обоснована эффективность конвертации ППМ в когенерационную установку, представлены основы и алгоритм расчёта когенерационной установки на базе ППМ. Данная методика позволяет проводить расчёт параметров необходимого оборудования для комплектования КУ на базе ППМ, а также позволяет разработать технико-экономическое обоснование приобретения этого оборудования для конкретных условий и характеристик объекта и территории эксплуатации. Сделаны выводы и предложения по реализации когенерационных установок на базе ППМ.

Ключевые слова: когенерация, когенерационная установка, паровая поршневая машина, вторичная теплота, системы отвода теплоты, дизель-генераторы, технико-экономическое обоснование.

UDC 621.17.013. Scientific specialty number: 2.4.5.

Calculation algorithm for a cogeneration plant based on a steam piston engine

Alexander V. Razuvaev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Atomic Energy, Balakovo Institute of Engineering and Technology (BIET, Balakovo, Saratov Region, Russia Federation), branch of the National Research Nuclear University MEPhI (NRNU MEPhI), Honorary Power Engineer of the Russian Federation; **Alyona An. Akinfieva**, lecturer, Department of Physics and Natural Sciences, BIET NRNU MEPhI

The article discusses the basics and calculation algorithm of a cogeneration plant based on a steam piston engine. The relevance of using cogeneration plants is presented based on an analysis of the application of the cogeneration method based on diesel generators. A brief analysis of the effectiveness of this scheme is given with justification of the parameters of its operation. The rationale for the relevance of using a power plant based on a steam piston engine is presented. The efficiency of converting a steam reciprocating machine into a cogeneration plant is substantiated, the basics and calculation algorithm of a cogeneration plant based on a steam reciprocating machine are presented. This technique allows us to calculate the parameters of the necessary equipment for completing a cogeneration plant based on a steam piston engine, and also allows us to develop a feasibility study and the feasibility of purchasing this equipment for specific conditions and characteristics of the facility and the territory of operation. Conclusions and suggestions for the implementation of cogeneration plants based on a steam piston engine are made.

Key words: cogeneration, cogeneration plant, steam piston machine, secondary heat, heat removal systems, diesel generators, feasibility study.

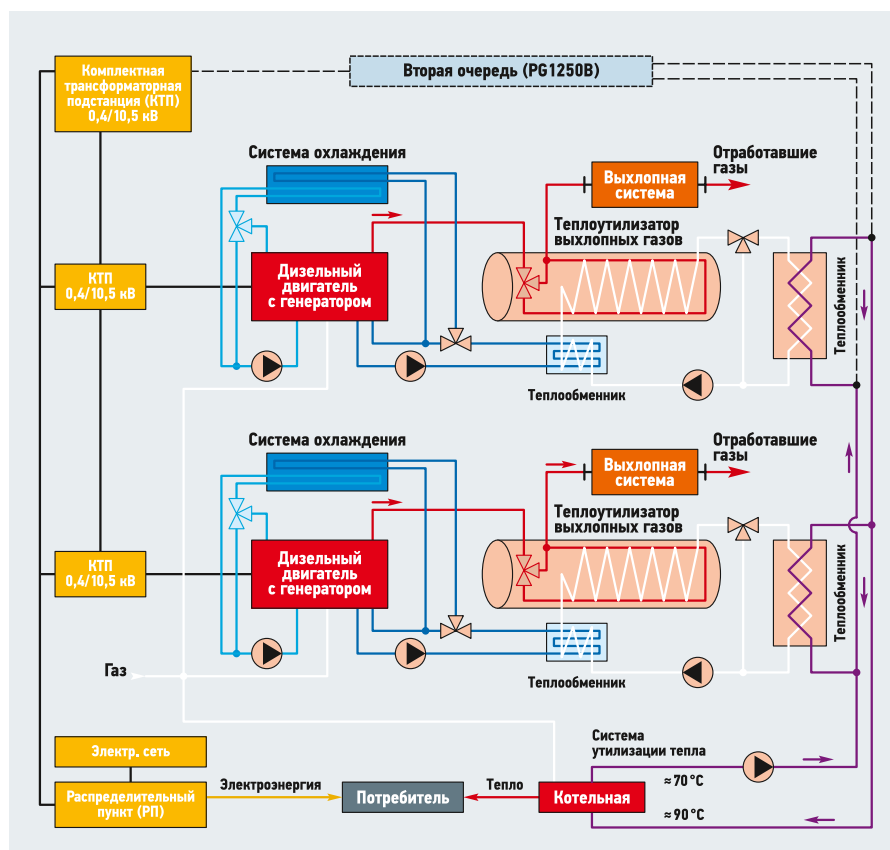


Рис. 1. Типовая схема работы дизель-генератора с системой утилизации теплоты

При проведении экспериментальных работ на действующих КУ расчёты показывают, что коэффициент полезного использования тепла топлива, введённого в ДВС, повышается практически в два раза и достигает около 80–85 %. Показатели эффективности работы КУ на базе ДВС и использования теплоты введённого топлива при этом также достаточно высоки. В технической литературе имеются методики расчёта таких систем и необходимого теплообменного оборудования, описаны алгоритмы его работы непосредственно на объекте эксплуатации КУ, определена специфика работы данных энергетических комплексов (например, [3]).

На рис. 1 представлена типовая гидравлическая схема дизель-генератора (ДГ) с системой утилизации теплоты [4].

В этой же работе [4] даны параметры этой энергетической установки с учётом утилизации вторичной теплоты, которые приведены на рис. 2.

Примеры применения когенерационных систем

Положительный опыт реализации проектов работы ДГ с системами утилизации теплоты (реализованы в Республике Башкортостан, установленная электрическая мощность 4, 8 и 10 МВт) дал основание считать необходимым использование котельных установок на автономных объектах, в частности, на санаторно-курортных предприятиях. Это позволило повысить топливную эффективность, а также способствовало повышению надёжности электроснабжения объектов. В результате

эксплуатации на объектах ОАО «Башкир-энерго» газопоршневых энергоустановок (мини-ТЭЦ) на базе двигателей фирм Jenbacher и Wärtsilä был сделан вывод, что «Наряду с очевидными преимуществами по эффективности использования топлива, первый год эксплуатации газопоршневых мини-ТЭЦ выявил особенности и недостатки новой техники».

Тепловой баланс энергоустановки

Состав теплового баланса дизель-генератора с системой утилизации тепла:

$$Q_{\text{топл}} = Q_{\text{эфф}} + Q_{\text{вг}} + Q_{\text{ож}} + Q_{\text{масл}} + Q_{\text{охл.возд}} + Q_{\text{нб}},$$

где $Q_{\text{топл}}$ — теплота, введённая с топливом; $Q_{\text{эфф}}$ — теплота, трансформированная в эффективную работу ДГ; $Q_{\text{вг}}$ — теплота, отводимая с выхлопными газами; $Q_{\text{ож}}$ — теплота, отводимая с охлаждающей жидкостью; $Q_{\text{масл}}$ — теплота, отводимая с маслом; $Q_{\text{охл.возд}}$ — теплота, отводимая с наддувочным воздухом; $Q_{\text{нб}}$ — величина небаланса теплового баланса.

Величина утилизируемой теплоты в системе утилизации:

$$Q_{\text{утил}} = Q_{\text{вг}} + Q_{\text{ож}} + Q_{\text{масл}}.$$

Тем самым возможно провести расчёт утилизируемой теплоты, отводимой от дизеля-генератора, и направить её на теплоснабжение потребителя. Следует отметить, что отводимая с наддувочным воздухом теплота $Q_{\text{охл.возд}}$ рассматривается при целесообразности использования этой небольшой величины (около 3–5 %), поскольку на её извлечение необходимы затраты (например, приобретение теплообменника, его установка и т.д.).

Более подробно этот вопрос рассмотрен в работе [2], где исследуется расширение возможности работы когенерационных установок.

Актуальность применения паровых поршневых машин

Несмотря на реально существующие и достаточно эффективные проекты КУ на базе ДВС, сегодня всё большее внимание уделяется энергетическим комплексам, обеспечивающим привод электрического генератора с помощью паровых поршневых машин (ППМ).

Так, в работе [5] отмечается: «За рубежом в малой энергетике (мини-ТЭС) вместо малых паровых турбин успешно используются паровые машины, или, как сегодня принято говорить, паропоршневые (паровые) моторы или двигатели. Основным отличительным признаком паропоршневых моторов от паровых машин — иной тип парораспределения».



Рис. 2. Схема параметров работы дизель-генератора с системой утилизации теплоты

Там же [5] констатируется, что «Технологические решения для мини-ТЭС — конденсационных мини-электростанций (мини-КЭС) и мини ТЭЦ — с использованием современных паровых машин принципиально схожи с известными, реализуемыми на паротурбинных мини-ТЭС. Это комбинированное производство электрической и тепловой энергии (когенерация на мини-ТЭЦ, в том числе создаваемых на базе котельных с паровыми котлами)».

В работе [6] дана информация о зарубежных компаниях, производящих паровые машины, и приводятся их характеристики. Эти машины в большинстве случаев используются для привода генератора с целью обеспечения потребителя электроэнергией.

Эффективный КПД паровой машины определяется отношением полезной механической работы (например, для выработки электроэнергии) по отношению к затраченному количеству тепла, которое содержится в топливе. Практический КПД ППМ составляет 1–8%. При наличии конденсатора и расширении проточной части показатель может возрасти до 25%. Во то же время КПД паровой или газовой турбины составляет 20–40%, ДВС — 20–25% (карбюраторные) и 30–36% (дизели) [7]. Но не следует забывать, что ППМ использует более дешёвое возобновляемое топливо, а не добываемые из земли углеводороды, количество которого ограничено, а стоимость подвержена резким колебаниям.

Эффективность механического привода и электрогенератора, по данным аналогов для блочных турбогенераторов такой мощности, составляет $\eta_{\text{мех}}\eta_{\text{эл}} = 0,93\text{--}0,94$.

В работе [8] приводятся данные о применении ППМ в различных секторах, а именно: «В последнее время в промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве всё более осознаётся целесообразность комбинированного производства электрической и тепловой энергии на паровых мини-теплоэлектроцентралях (мини-ТЭЦ), располагаемых в непосредственной близости от потребителя». Далее в [8] приведён фрагмент структурной схемы паровой мини-ТЭЦ (рис. 3).

Также в [8] приводятся важные показатели эксплуатации ППМ: «Ресурс до капитального ремонта паровых турбин (от 30 тыс. до 50 тыс. часов) определяется в основном ресурсом лопаток из дорогостоящих сплавов, а у паровых моторов (более 50 тыс. часов) — гораздо большим ресурсом более дешёвых узлов штатно-поршневого группы. Паровые моторы, как паровые поршневые машины, обладают высокой надёжностью. А ресурс паровых

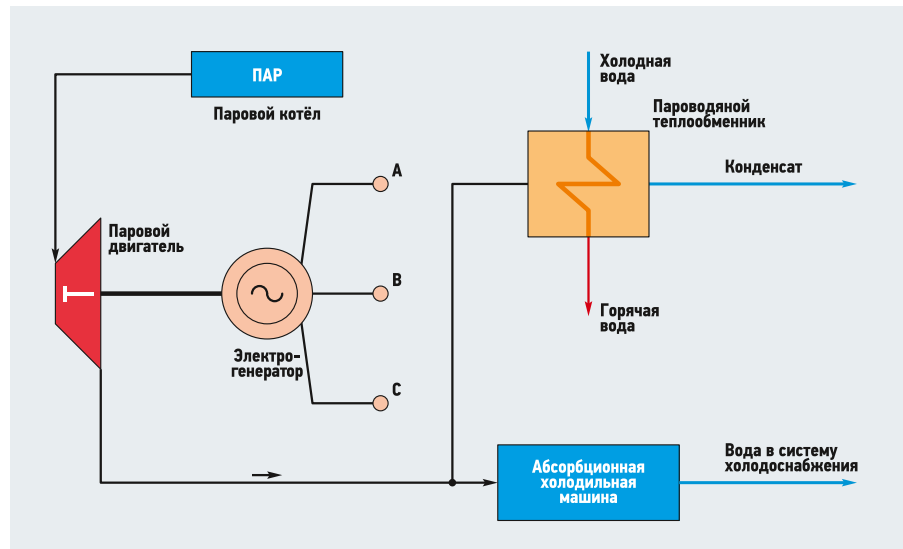


Рис. 3. Фрагмент структурной схемы паровой мини-ТЭЦ

поршневых двигателей (ППД) до капитального ремонта может быть выше, чем у исходных двигателей внутреннего сгорания (от 30 тыс. до 100 тыс. часов), так как водяной пар при работе парового двигателя, в отличие от горючей смеси, не взрывается, а расширяется и плавно давит на поршень».

В окончании работы [8] даётся следующая информация: «Итак, можно сделать следующие выводы:

1. Паромоторные мини-ТЭЦ энергоэффективнее паротурбинных. Для них удельный расход пара в электроагрегатах на выработку электроэнергии в 1,3–1,5 раза меньше, чем в паротурбинных мини-ТЭЦ, особенно при электрических мощностях до 1200 кВт.
2. Ресурс до капитального ремонта у современных паровых моторов для мини-ТЭЦ, по крайней мере, не ниже, чем у паровых турбин лопаточного и винтового типов».

В работе [9] обосновывается применение паромашинного электроагрегата в составе котельной лесопромышленного предприятия. Это мероприятие подтверждается «высоконадёжными, эффективными, оснащёнными паровыми машинами, работающими в режиме мини-теплоэлектроцентрали (мини-ТЭЦ)».

Далее в [9] приводится схема включения паромашинного электроагрегата в состав котельной (рис. 4).

Такое предложение основано на том, что в лесной промышленности относительно широко применялся пар для сушки изделий из древесины. Кроме этого, пар применялся для нагрева воды для нужд производства. Конечно, можно было бы использовать просто водогрейные котлы, но для производства пара необходимо иметь электроэнергию для обеспечения функционирования систем автоматики и водяных насосов.

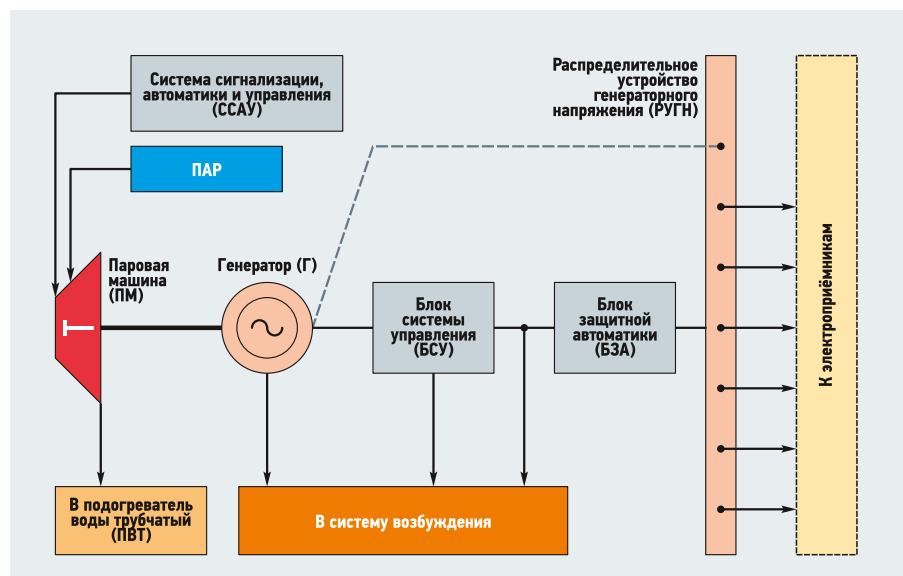
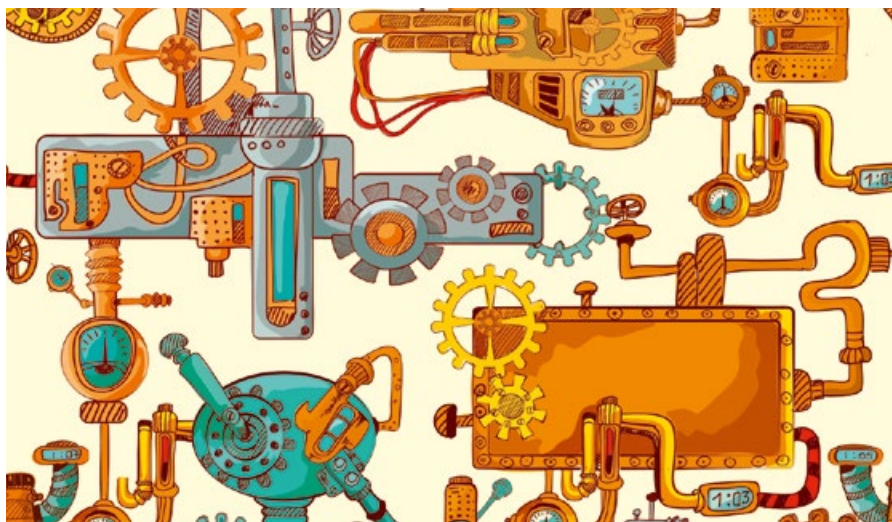


Рис. 4. Схема включения паромашинного электроагрегата в состав котельной лесопромышленного предприятия



Далее автор приводит опыт европейских стран, таких как Германия, Италия и Чехия, в том, что котельные установки необходимо оснащать генераторами электроэнергии на базе современных паровых поршневых машин. Они обладают полученной от своих предшественников достаточно высокой надёжностью и неприхотливостью при обслуживании и эксплуатации на объектах применения.

ППМ может использоваться и в качестве энергетической установки для утилизации вторичной теплоты от какого-либо источника энергии.

Причём это утилизируемое тепло будет использовано для получения пара для работы ППМ. А ППМ, в свою очередь, может применяться для привода различного оборудования, например, генератора для выработки электроэнергии, насоса для перекачки жидкости, компрессора для перемещения газов и т.д. Из этого видно, что эффективность применения ППМ для объектов с высокотемпературными выбросами вторичной теплоты достаточно высока. Об этом подробнее говорится в работе [10] на примере объектов черной металлургии.

Параметры ППМ для различных вариантов конструкций и параметров пара достаточно подробно рассмотрены в [11]. Но в этой работе автор не приводит методики расчёта или оценки этих параметров, что важно для создания энергетического комплекса (ЭК) на базе ППМ для различных объектов применения. Тем не менее, имеется определённая информация по разработке и реализации подобных ЭК, и, в связи с проявляемым интересом к ЭК на базе ППМ и возможностью создания на их базе многофункционального энергокомплекса (МЭК) [12, 13], который может работать на возобновляемом топливе с целью экономии невозобновляемого углеводородного топлива, данная задача становится актуальной.

Все перечисленные обстоятельства обосновывают актуальность и своевремен-

ность производства ППМ, что позволит не только расширить спектр отечественной машиностроительной продукции, но и будет содействовать организации производства возобновляемого топлива (биотоплива). В свою очередь, это увеличит объёмы работ в агропромышленном комплексе (АПК) и повысит эффективность российского АПК.

Таким образом, все эти и другие работы по созданию ППМ и обеспечению их возобновляемым топливом позволяют расширить многие отрасли отечественной экономики, получить дополнительный доход государству в виде налогов и повысить занятость населения. Одним из главных показателей эффективности этих мероприятий является возможность экономить углеводородное топливо с одновременным решением экологических вопросов на территориях эксплуатации подобных энергетических комплексов [13].

Так, например, в работе [14] представлен алгоритм разработки математической модели МЭК на базе паропоршневых электростанций. Далее в [15] даётся разработка методов энергосбережения элементов теплоснабжения.

Для оценки стоимости изготовления ППМ была применена методика экспертной оценки стоимости изделия. Для этого взяли дизель-генератор и ППМ с генератором одинаковой мощности. Сравнивалась трудоёмкость изготовления основ-

Опыт европейских стран показывает, что котельные установки необходимо оснащать генераторами электроэнергии на базе современных паровых поршневых машин. Они обладают полученной от своих предшественников достаточно высокой надёжностью и неприхотливостью при обслуживании и эксплуатации

ных узлов и деталей этих изделий, для чего был составлен список из более чем 30 позиций. В результате получилось, что ППМ с генератором стоит на 50% дешевле, чем ДГ той же мощности. Конечно, необходимо учитывать и требуемую комплектацию МЭК на базе ППМ.

При этом стоит отметить, что все детали паровых поршневых машин относительно просты с точки зрения их изготовления, кроме, например, винтовых ППМ. Этот вид паровых машин также относительно несложен, однако необходимость изготовления двух винтов сложной объёмно-пространственной формы (с поддержкой необходимых размеров и допусков по трём координатам) может значительно увеличить стоимость проекта.

Экономические показатели различных энергетических установок электрической мощностью 150 кВт, но различной комплектации и степени автоматизации (без блок-контейнера и комплекта оборудования для системы утилизации), оценочно составляют следующие удельные показатели: многофункциональный энергокомплекс (на базе ППМ) — 12–15 тыс. руб/кВт (с комплектом оборудования для работы); дизель-генераторы — около 10,5–21 тыс. руб/кВт; газовые двигатели с генераторами — от 40 тыс. до 50,5 тыс. руб/кВт; паровая турбина (без сопутствующего оборудования, то есть только сама турбина как агрегат) — около 1840–3680 руб/кВт; паровинтовая — около 14 тыс. руб/кВт.

Таким образом, пусть оценочно, но видно, что удельная стоимость МЭК на базе ППМ для привода генератора находится ниже средней величины по удельной стоимости комплекта представленных энергоустановок.

По некоторым данным, удельная стоимость комплекта оборудования на базе ППМ для выработки электроэнергии ППМ фирмы Spilling составляет порядка €700–1100 за 1 кВт (примерно от 63 тыс. до 99 тыс. руб/кВт), в зависимости от комплектации.

Кроме того, оценка экономической эффективности применения многофункционального энерготехнологического комплекса на базе поршневой паровой машины дана в работе [16]. Здесь экономическая эффективность от применения МЭК на объекте рассчитывалась на основании сравнения стоимости получения тепловой энергии от центральной сети теплоснабжения и стоимости получения тепловой энергии при его применении. В результате получена величина экономического эффекта около 720 тыс. руб. Срок окупаемости комплекса ориентировочно составит 1,9 года [16].

Методика расчёта КУ на базе ППМ

В рамках оценочного расчёта величины теплоты, отводимой от многофункционального энергокомплекса и затем подаваемой для нужд теплоснабжения потребителя, предлагается следующая методика (рис. 5). Величина энтальпии пара на выходе из парового котла $I_1^{\text{ПК}}$ будет равна энтальпии пара на входе в паровую машину $I_1^{\text{ППМ}}$ (паровая труба покрыта термоизоляцией, и потери теплоты по паропроводу минимальны). Величина теплоты, израсходованной в ППМ на превращение её в механическую работу и далее в электрическую энергию, составит:

$$Q_{\text{пара}} = G_{\text{пара}}(I_1^{\text{ППМ}} - I_2^{\text{ППМ}}), \quad (1)$$

где $G_{\text{пара}}$ — расход пара, сгенерированного в паровом котле; $I_1^{\text{ППМ}}$ — величина энтальпии пара на входе в ППМ; $I_2^{\text{ППМ}}$ — величина энтальпии пара на выходе из паровой поршневой машины.

Таким образом, механическую энергию ППМ можно определить как:

$$Q_{\text{пара}} = G_{\text{пара}}(I_1^{\text{ППМ}} - I_2^{\text{ППМ}})\eta_{\text{мех}}, \quad (2)$$

где $\eta_{\text{мех}}$ — механический КПД паропоршневой машины.

Величины энтальпий пара берутся справочно при известной его температуре, определяемой по теплотехническому расчёту ППМ. Величину теплоты, отводимой от конденсатора в систему отвода тепла (СОТ), можно рассчитать следующим образом (со стороны конденсатора):

$$Q_{\text{СОТ}} = G_{\text{пара}}(I_2^{\text{ППМ}} - I_2^{\text{К}}), \quad (3)$$

где $G_{\text{пара}}$ — расход пара, сгенерированного в паровом котле; $I_2^{\text{ППМ}}$ — величина энтальпии пара (на выходе) из ППМ; $I_2^{\text{К}}$ — величина энтальпии питательной воды (конденсата). Также величину теплоты, отводимой от конденсатора, но уже в системе отвода тепла, можно рассчитать как:

$$Q_{\text{СОТ}} = c_{\text{воды}} G_{\text{воды}}^{\text{СОТ}}(t_2^{\text{СОТ}} - t_1^{\text{СОТ}}), \quad (4)$$

где $G_{\text{воды}}^{\text{СОТ}}$ — расход воды в системе отвода теплоты; $c_{\text{воды}}$ — теплоёмкость воды в СОТ; $t_2^{\text{СОТ}}$ — температура воды на выходе из СОТ; $t_1^{\text{СОТ}}$ — температура воды на входе в СОТ.

Данная теплота может быть использована на полезные нужды, например, направлена в системы отопления или горячего водоснабжения объекта с учётом величин температур на входе и на выходе из теплообменника конденсатора.

Подбор типа парового котла осуществляется по параметрам пара, необходимым для работы ППМ по соответствующему теплотехническому расчёту. Топливо используется возобновляемое и, как правило, местное, с учётом возможности

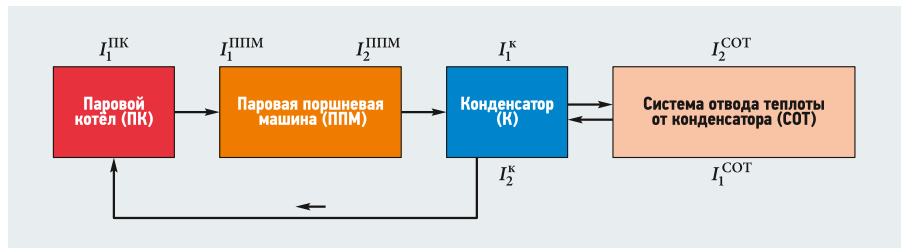


Рис. 5. Принципиальная технологическая схема алгоритма расчёта системы отвода теплоты

его использования в выбранном паровом котле. Необходимая тепловая мощность котла, учитывая марку топлива:

$$Q_{\text{ПК}} = G_{\text{топл}} r \eta_{\text{ПК}}, \quad (5)$$

где $G_{\text{топл}}$ — расход топлива; r — теплота сгорания выбранного топлива; $\eta_{\text{ПК}}$ — КПД парового котла.

Для оценки термической эффективности использования тепла топлива, введённого в паровой котёл, или коэффициента использования тепла топлива (КИТТ), можно использовать формулу:

$$\text{КИТТ}_{\text{ППМ}} = \frac{G_{\text{пара}}(I_1^{\text{ППМ}} - I_2^{\text{ППМ}})}{Q_{\text{ПК}}}, \quad (6)$$

а с учётом использования утилизируемой теплоты по формуле:

$$\text{КИТТ}_{\text{СОТ}} = \frac{G_{\text{пара}}(I_1^{\text{ППМ}} - I_2^{\text{ППМ}}) + Q_{\text{СОТ}}}{Q_{\text{ПК}}}, \quad (7)$$

тем самым представляется возможность оценить этот показатель.

Выводы

Таким образом, представленный алгоритм и методика теплового расчёта когенерационной установки на базе паропоршневой машины обладают следующими преимуществами:

1. Возможно подобрать оптимальные параметры необходимого теплообменного оборудования для работы ППМ в составе когенерационной установки (КУ) на автономном объекте эксплуатации.
2. Сама ППМ может выполнять роль силовой установки в качестве привода как генератора, так и другого необходимого оборудования (компрессоров, насосов, пилорам, конвейеров и т.п.).
3. Теплота, полученная в системе отвода теплоты (от ППМ), может применена в системе отопления объекта эксплуатации, горячего водоснабжения для нужд обслуживающего персонала или технологического оборудования.
4. Параметры (расходы, температуры) пара и циркуляционной воды, полученной в результате этих расчётов, дают возможность проводить подбирать и оптимизировать параметры комплекта оборудования когенерационной установки на базе ППМ.
5. Теплотехнические расчёты оборудования, необходимого для КУ на базе ППМ, обеспечивают возможность проведения технико-экономического обоснования (ТЭО) приобретения и эксплуатации этого оборудования для конкретных условий и характеристик объекта и территории эксплуатации.

1. Разуваев А.В., Бурлаков В.И. Применение когенерационной установки для автономных объектов в полевых условиях // Вестник КРСУ, 2020. Т. 20. №12. С. 94–99.
2. Разуваев А.В. Расширение возможности работы когенерационных установок // Транспорт на альтернативном топливе, 2024. №3. С. 73–78.
3. Разуваев А.В. Анализ энергопотребления объектов и характеристик когенерационной установки // Промышленная энергетика, 2025. №1. С. 11–15.
4. Салтыков М.И., Новиков Д.В., Борисов А.В. Максимум энергии для завода «Тверстеклопластик» // Турбины и дизели, сентябрь — октябрь 2006. С. 2–5.
5. Передерий С. Паровые установки для выработки электро- и тепловой энергии // ЛесПромИнформ, 2017. №6. С. 126–128.
6. Паровые машины и сила пара в Европе [Электр. текст]. «Яндекс. Дзен» от 22.12.2023. Режим доступа: dzen.ru. Дата обрац.: 02.10.2025.
7. КПД парового двигателя: таблица [Электр. текст]. «Таблицы и значения». Режим доступа: tabl.god-tiga.ru. Дата обрац.: 05.11.2025.
8. Трохин И.С. Мини-ТЭЦ с паровыми моторами — реальность XXI века // Энергосбережение, 2012. №2. С. 62–68.
9. Трохин И.С. Паромашинные мини-ТЭЦ на базе котельных предприятий ЛПК // ЛесПромИнформ, 2013. №2. С. 170–171.
10. Дубинин В.С., Степанова Т.А., Скарупа С.О., Крупский В.П. Новые способы производства электроэнергии с использованием пара систем испарительного охлаждения высокотемпературных установок чёрной металлургии // Чёрные металлы, 2022. №4. С. 57–62.
11. Жигалов В.А. Малая тепловая электростанция — это реально // Новости теплоснабжения, 2006. №1. С. 36–39.
12. Разуваев А.В., Редько И.Я. Актуальность создания МФЭТК на базе паропоршневой машины // Журнал СОК, 2022. №2. С. 60–63.
13. Разуваев А.В., Редько И.Я. Актуальность создания отечественных энергетических комплексов на базе паровых поршневых машин // Журнал СОК, 2025. №3. С. 52–56.
14. Редько И.Я., Разуваев А.В. Алгоритм разработки математической модели МЭК на базе паропоршневых электростанций // Журнал СОК, 2024. №3. С. 64–67.
15. Разуваев А.В., Редько И.Я., Разуваев В.А. Разработка методов энергосбережения элементов теплоснабжения // Журнал СОК, 2023. №8. С. 32–36.
16. Razuvaev A.V., Kobzev R.A., Redko I.Ya. Economic efficiency evaluation of applying the general-purpose heat and power plant based on the reciprocating steam engine. Proc. of the 15th International Scientific and Technical Conference (PESPC-2020), October 6–9, 2020, Saratov, Russia. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1652. References — see page 80.

Calculation algorithm for a cogeneration plant based on a steam piston engine. Pp. 68–72.

Alexander V. Razuvaev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Atomic Energy, Balakovo Institute of Engineering and Technology (BIET, Balakovo, Saratov Region, Russia Federation), branch of the National Research Nuclear University MEPhI (NRNU MEPhI), Honorary Power Engineer of the Russian Federation; **Alyona An. Akinfieva**, lecturer, Department of Physics and Natural Sciences, BIET NRNU MEPhI

1. A.V. Razuvaev, V.I. Burlakov. *Primenenie kogeneratsionnoj ustanovki dlya avtonomnykh ob#ektov v polevykh usloviyakh* [Application of a cogeneration unit for autonomous facilities in the field]. *Vestnik KRSU* [Bulletin of the Kyrgyz-Russian University]. 2020. Vol. 20. No. 12. Pp. 94–99. [In Russian]
2. A.V. Razuvaev. *Rasshirenie vozmozhnosti raboty kogeneratsionnykh ustanovok* [Expanding the capabilities of cogeneration units]. *Transport na al'ternativnom toplive* ["Alternative Fuel Transport" Magazine]. 2024. No. 3. Pp. 73–78. [In Russian]
3. A.V. Razuvaev. *Analiz energopotrebleniya ob#ektov i kharakteristik kogeneratsionnoj ustanovki* [Analysis of energy consumption of facilities and characteristics of a cogeneration unit]. *Promyshlennaya energetika* ["Industrial Energy" Magazine]. 2025. No. 1. Pp. 11–15. [In Russian]
4. M.I. Saltykov, D.V. Novikov, A.V. Borisov. *Maksimum energii dlya zavoda "Tver'stekloplastik"* [Maximum energy for the "Tver'stekloplastik" factory]. *Turbiny i dizeli* ["Turbines and Diesels" Magazine]. September–october 2006. Pp. 2–5. [In Russian]
5. S. Pedereriy. *Parovye ustanovki dlya vyrabotki elektro- i teplovoj energii* [Steam plants for generating electric and thermal energy]. *LesPromInform* ["LesPromInform" Magazine]. 2017. No. 6. Pp. 126–128. [In Russian]
6. *Parovye mashiny i sila para v Evrope* [Steam engines and steam power in Europe]. "Yandex. Dzen" of December 22, 2023. Web-source: dzen.ru. Access date: October 2, 2025. [In Russian]
7. *KPD parovogo dvigatelya: tablitsa* [Steam engine efficiency: A table]. "Tables and Values". Web-source: tabl.god-tigra.ru. Access date: November 5, 2025. [In Russian]
8. I.S. Trokhin. *Mini-TETs s parovymi motorami — real'nost' XXI veka* [Mini-heat and power plants with steam engines — a reality of the 21st century]. *Energoberezhenie* ["Energy Saving" Magazine]. 2012. No. 2. Pp. 62–68. [In Russian]
9. I.S. Trokhin. *Paromashinnye mini-TETs na baze kotel'nykh predpriyatij LPK* [Steam-powered mini-heat and power plants based on boiler houses of forest industry enterprises]. *LesPromInform* ["LesPromInform" Magazine]. 2013. No. 2. Pp. 170–171. [In Russian]
10. V.S. Dubinin, T.A. Stepanova, S.O. Skarupa, V.P. Krupsky. *Novye sposoby proizvodstva elektroenergii s ispol'zovaniem para sistem isparitel'nogo okhlazhdeniya vysokotemperaturnykh ustanovok chernoy metallurgii* [New methods of electricity generation using steam from evaporative cooling systems of high-temperature ferrous metallurgy installations]. *Chernye metally* ["Ferrous Metals" Magazine]. 2022. No. 4. Pp. 57–62. [In Russian]
11. V.A. Zhigalov. *Malaya teplovaya elektrostantsiya — eto real'no* [Small thermal power plant — it's real]. *Novosti teplosnabzheniya* ["Heat Supply News" Magazine]. 2006. No. 1. Pp. 36–39. [In Russian]
12. A.V. Razuvaev, I.Ya. Red'ko. Aktual'nost' sozdaniya MFETK na baze paro-porshnevoj mashiny [Relevance of creating multifunctional energy complexes based on a steam piston engine]. *Zhurnal Santechnika, Otoplenie, Konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2022. No. 2. Pp. 60–63. [In Russian]
13. A.V. Razuvaev, I.Ya. Red'ko. Aktual'nost' sozdaniya otechestvennykh energeticheskikh kompleksov na baze parovykh porshnevykh mashin [Relevance of creating domestic energy complexes based on steam piston engines]. *Zhurnal Santechnika, Otoplenie, Konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2025. No. 3. Pp. 52–56. [In Russian]
14. I.Ya. Red'ko, A.V. Razuvaev. Algoritim razrabotki matematicheskoy modeli MEK na baze paroporshnevykh elektrostantsij [Algorithm for developing a mathematical model of multifunctional energy complexes based on steam piston power plants]. *Zhurnal Santechnika, Otoplenie, Konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2024. No. 3. Pp. 64–67. [In Russian]
15. A.V. Razuvaev, I.Ya. Red'ko, V.A. Razuvaev. Razrabotka metodov energoberezheniya elementov teplosnabzheniya [Development of energy saving methods for heat supply elements]. *Zhurnal Santechnika, Otoplenie, Konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2023. No. 8. Pp. 32–36. [In Russian]
16. A.V. Razuvaev, R.A. Kobzev, I.Ya. Redko. Economic efficiency evaluation of applying the general-purpose heat and power plant based on the reciprocating steam engine. Proc. of the 15th International Scientific and Technical Conference (PESPC-2020). October 6–9, 2020. Saratov, Russia. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1652. No. 012023.