

МИКРОТУРБИННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

*Ефимов Н.Н., Паршуков В.И., Папин В.В., Безуглов Р.В., Янченко И.В.,
Клиников Р.А., Чумаков Д.Ю., Трофименко Е.С.*

Строительство малоэтажных домов особенно актуально в последнее время для сельской местности, где необходимо предусматривать возможность организации малых фермерских хозяйств удаленных от центрального энергообеспечения. Доля такой недвижимости уже к 2015 году, как подтверждают планы правительство РФ, будет доведена до 60% (что составляет около 54 млн м² в год). Удаленное децентрализованное энергообеспечение потребителей должно предусматривать эффективное энергоснабжение электроэнергией, теплом и водой.

В этих условиях актуальным становится разработка и создание микроэнергокомплексов способных обеспечивать электроэнергией от 5 до 30 кВт, теплом до 200 кВт и холодом (кондиционирование воздуха) до 40 кВт.

Эффективное энергоснабжение для индивидуального автономного энергопотребления в настоящее время в основном рассматривается в контексте использования в той или иной степени возобновляемых источников энергии. В электроснабжении – это применение фотопреобразователей; в теплоснабжении – использование тепловых насосов для отопления и солнечных нагревателей для горячего водоснабжения.

При разработке эффективного энергоснабжения как крупных так и малых энергопотребителей используются когенерационные и тригенерационные установки на базе газотурбинных и газопоршневых агрегатов, способных обеспечить комплексное производство электроэнергии и тепла.

Энергоэффективности при большом количестве потребителей добиваться, нам представляется, гораздо проще, поскольку расширяются возможности маневрирования при энергообеспечении. В этом случае, как правило, в

энергообеспечении участвуют несколько энергоагрегатов (котлов, энергоустановок электростанций), которые могут останавливаться на некоторое время, а затем вновь запускаться или снижать нагрузку, обеспечивая оптимальное энергообеспечение потребителей с наименьшими потерями энергии при производстве и передаче. Сложнее обеспечивать маневренность в потреблении электрической и тепловой энергии автономного, индивидуального энергопотребителя. В этом случае маневренность в энергопотреблении приходится обеспечивать от одной энергоустановки, производящей либо электричество, либо тепло.

При максимальном разрешенном электропотреблении для индивидуального потребителя в 10 кВт и при полном наборе приборов, потребляющих электроэнергию, мощность агрегатов может достигать $5 - 8 \text{ кВт}$. Таким образом, в месяц можно получить 3600 кВт ч . Однако реально семья потребляет $200 - 500 \text{ кВт ч}$ в месяц, т.е. $5,5 - 14 \%$ от максимально возможной мощности. Отсюда среднесуточная мощность электрогенератора составляет $200 - 800 \text{ Вт}$, и по электропотреблению энергоустановка должна иметь возможность изменять свою нагрузку на $86 - 94,5 \%$. При этом полностью останавливать энергоагрегат не представляется возможным, поскольку в семьях имеются приборы, которые работают постоянно (например, холодильник).

Электрическая нагрузка в течение суток при индивидуальном автономном энергопотреблении в любой период года изменяется крайне неравномерно. Минимальное энергопотребление приходится на ночное время в осенний и весенний периоды, когда работает только холодильник. Максимальное электропотребление в эти периоды происходит в дневное время, когда начинается приготовление пищи, стирка и другие операции на электроприборах. Однако ночная и дневная нагрузки начинают возрастать, если появляется необходимость включать кондиционирование (летом), или отопление (зимой). В такие периоды потребляемая электрическая мощность достигает своего максимума $5 - 8 \text{ кВт}$.

Нагрузка на отопление, в отличие от обеспечения электроэнергией, при теплоснабжении индивидуальных, автономных потребителей практически не изменяется в течение суток. Тепловая отопительная нагрузка изменяется сезонно в обратной зависимости от температуры наружного воздуха. Требуемая максимальная отопительная нагрузка возникает при минимальной температуре зимой и определяется теплопотерями через внешние ограждения здания. Например, для здания площадью 200 м² при относительно хорошо утепленной конструкции (класс А и В⁺⁺) она примерно составляет 5 - 12 кВт для умеренной климатической зоны. В таблице 1 даны характеристики классности зданий по критерию теплопотерь.

Таблица 1 - Требования к потреблению энергии зданиями различного класса энергоэффективности СНиП 23-02-2003

Обозначение класса	Наименование класса энергетической эффективности	Величина отклонения расчетного (фактического) удельного расхода тепловой энергии на отопление здания от нормативного, %	Рекомендуемые мероприятия органами администрации субъекта РФ
Для новых и реконструируемых зданий			
Очень высокий	А ⁺	ниже -60	Экономическое стимулирование
	А	от -45 до -59,9	
Высокий	В ⁺⁺	от -35 до -44,9	То же
	В ⁺	от -25 до -34,9	
	В	от -10 до -24,9	
Нормальный	С	от +5 до -9,9	—
Для существующих зданий			
Пониженный	Д	от +5,1 до +50	Модернизация здания
Низкий	Е	более +50	Требуется утепление здания

Горячее водоснабжение в течение суток потребляется также неравномерно, как и электроэнергия. Однако энергии на нагрев такого количества воды требуется незначительно. Днем горячая вода расходуется для мытья посуды, купания и стирки. Считается, что в среднем на одного человека требуется 100 л. воды в сутки или примерно 0,15-0,25 кВтч мощности на нагрев

воды для человека в день. Для семьи из 6 человек это значит 1,2 – 1,5кВтч нагрузки в день. В ночное время горячее водоснабжение не требуется. Результаты проведенного анализа приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Энергообеспечение жилого дома площадью 200 м² класса энергоэффективности А – В⁺⁺

Наименование		Газопоршневая энергоустановка	Газотурбинная установка	Паросиловая установка
Максимальная часовая нагрузка	Электрическая, кВт	5 - 10		
	Тепловая отопительная, кВт	10 - 15		
	Горячее водоснабжение в сутки, кВт ч	1,2 – 1,5		
Потребляемая (требуемая) нагрузка в холодные зимние дни				
Средняя часовая нагрузка	Электрическая, кВт	0,5 – 0,8		
	Тепловая отопительная, кВт	8,0 – 12,0		
	Горячее водоснабжение в сутки, кВт ч	1,2 – 1,5		
Потребляемая (требуемая) нагрузка в жаркие летние дни				
Средняя часовая нагрузка	Электрическая, кВт	0,4 – 0,6		
	Тепловая отопительная (на кондиционирование), кВт	5,0 – 8,0		
	Горячее водоснабжение в сутки, кВт ч	1,0 – 1,2		
Нагрузка, которую могут обеспечить энергоустановки				
Электрическая, кВт		0,4 – 0,8		
Тепловая (отопление + кондиционирование + горячее водоснабжение), кВт		0,6 – 1,0	0,75 – 1,5	5,0 – 12,0

Из анализа таблицы видно, что паросиловая энергетическая установка более приспособлена для комбинированного производства электроэнергии и тепла при автономном энергообеспечении индивидуального децентрализованного потребителя, чем газопоршневые и газотурбинные агрегаты.

Учитывая вышеизложенное, разработаны микротурбинные установки мощностью 5 и 30кВт, работающие на влажном паре со следующими параметрами: давление пара 0,6 МПа, температура пара 160 °С, удельный расход влажного пара на турбину в зависимости от мощности турбины (5 – 30 кВт) -

0.03 – 0,1 кг/с. Такая микроэнергоустановка предназначена для эффективного энергоснабжения жилого дома площадью 200 – 400 м².

Разрабатываемый микроэнергокомплекс (МЭК) малой мощности предназначен для работы в качестве микро-ТЭЦ с целью обеспечения эффективного энергоснабжения, распределения электроэнергии, ее комплексного учета, контроля и управления в сетях энерго- и жизнеобеспечения. МЭК необходим для систем автономного энергоснабжения на основе комбинированного использования влажно-паровой микротурбины, аккумуляторов-парогенераторов, получающих тепло от котлов малой мощности или/и солнечных нагревателей, которые являются элементами общей системы энергопроизводства.

Влажно-паровая микротурбинная установка состоит из следующих устройств:

- сама влажно-паровая турбина, на валу которой закреплено центростремительное рабочее колесо;

- электрогенератор, находящийся в едином корпусе с микротурбиной и, в свою очередь, состоящий из ротора находящегося на едином валу с ротором микротурбины, системы оригинальных, воздушных, лепестковых опорно-упорных подшипников, системы охлаждения статора и системы управления и распределения электроэнергии;

- герметичный конденсатор, система охлаждения которого предназначена для конденсации пара после рабочего колеса турбины и для выделения тепла на отопление и горячее водоснабжение.

Анализ используемых в настоящее время энергоустановок показал преимущества паросиловой установки перед газопоршневыми (ГЗПУ) и газотурбинными (ГТУ) установками по следующим критериям:

1. При использовании когенерации или даже тригенерации применяются разные турбомашины с проточной рабочей средой, которые способны создавать вполне определенные соотношения по производству

электроэнергии и тепла. Существуют следующие схемы производства электроэнергии и тепла, в том числе и для микроэнергокомплексов.

- газопоршневые агрегаты способны производить на 1 кВт электрической энергии 1,2 – 1,5 кВт тепловой;

- газотурбинные турбомашин имеют возможность увеличить это соотношение – на 1 кВт электрической энергии до 1,5 – 2,0 кВт тепловой;

- еще большего соотношения можно добиваться при использовании паросиловых установок - на 1 кВт электрической энергии 5,0 – 15,0 кВт тепловой.

Таким образом, микропаросиловые турбомашин найдут свою нишу при использовании их в индивидуальном, децентрализованном энергоснабжении электричеством и теплом [1].

2. ГЗПУ и ГТУ работают только на жидком и газообразном топливе, в то время как влажно-паровая установка может использовать, как газообразное и жидкое топливо, но также твердое (в том числе пилеты) и даже солнечные нагреватели. Так на Гавайях установлена паросиловая турбина, работающая от солнечных нагревателей.

3. ГЗПУ и ГТУ имеют достаточно высокие параметры в проточной части (900 – 1000 °C). Это делает их пожароопасными, в то время как паровые турбины на входе имеют температуру не более 160 °C. В котле температура газов высокая, те же 900 – 1000 °C, однако он не имеет сложных вращающихся элементов и может быть вынесен на требуемое расстояние от объектов энергопотребления.

4. Моторесурс влажно-паровой турбины составляет 200-300 тыс. часов, в то время как у ГТУ он не выше 200 тыс. часов, а у ГЗПУ моторесурс не превышает 50 тыс. часов.

5. Изменение электрической нагрузки в ГЗПУ и ГТУ неизбежно вызывает пропорциональное изменение тепловой энергии, что потребует применения сложной системы регулирования тепловой нагрузки агрегата.

Паросиловая установка способна регулировать количества электрической и тепловой энергий отдельно, то есть независимо одно от другого.

6. Поскольку температуры в проточной части паровой турбины низкие в сравнении с ГЗПУ и ГТУ, то и стоимость ее изготовления будет ниже.

7. В схеме паровой микротурбины удобно использовать тригенерацию, установив абсорбционные холодильные машины в тепловую схему энергокомплекса.

Применяя паросиловую турбину малой мощности (5 – 30 кВт) создается МЭК по технологической схеме «солнечный коллектор (или резервный парогенератор) – аккумулятор-сухопарник – паровая турбина – конденсатор – бойлер». Такая схема производства энергий представлена на рисунке 1.

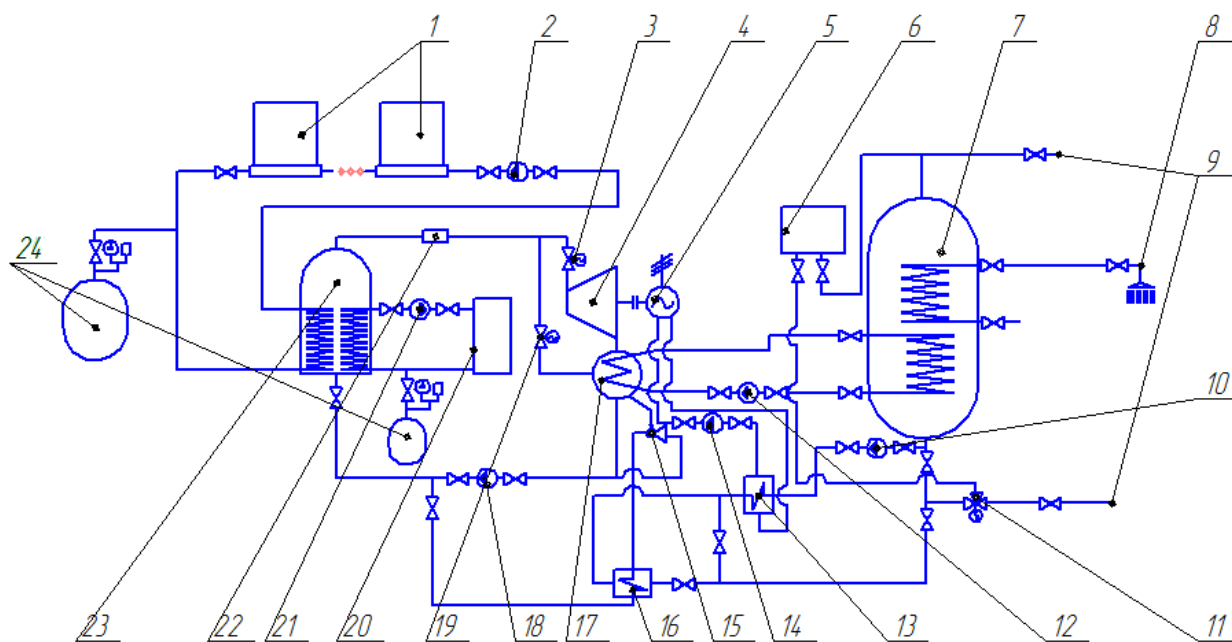


Рисунок 1 – Развернутая схема энергокомплекса: 1 – группа солнечных коллекторов, 2 – циркуляционный насос солнечного контура, 3 – регулирующий паровой клапан, 4 – турбина, 5 – электрогенератор, 6 – теплообменник охлаждения конденсатора турбины наружным воздухом, 7 – накопительная емкость, 8 – приборы ГВС, 9 – на отопительные приборы, 10 – циркуляционный насос системы отопления, 11 – трехходовой клапан системы охлаждения конденсатора турбины, 12 – циркуляционный насос системы охлаждения

турбины, 13 – теплообменник охлаждения генератора, 14 – циркуляционный насос охлаждения генератора, 15 – эжектор, 16 – теплообменник охлаждения воды для эжектора, 17 – конденсатор турбины, 18 – питательный насос, 19 – байпас пара напрямую в конденсатор, 20 – парогенератор на органическом топливе, 21 – циркуляционный насос парогенератора на органическом топливе, 22 – блок контрольно-измерительной аппаратуры свежего пара, 23 – парогенератор-аккумулятор, 24 – расширительные емкости.

В группе вакуумных солнечных коллекторов 1, через их поверхность теплообмена, циркулирует промежуточный теплоноситель (вода/масло), при температуре 180 -200 °С, передавая свою теплоту питательной воде, которая закипает и направляется через регулирующий клапан 3 в паровую турбину 4.

При недостаточной мощности солнечных коллекторов включается дополнительный источник на органическом топливе 20.

Байпасная линия 19 используется в пусковом режиме и в случае пониженной нагрузки на турбину, при необходимости выработки теплоты. На паропроводе свежего пара установлен блок 22 контрольно измерительной аппаратуры, показания которого используются в процессе пуско-наладки и испытаний. Трехходовой клапан 11, переключает охлаждение конденсатора турбины с системы отопления на теплообменник 6 наружного охлаждения при отсутствии необходимости в отоплении. Через теплообменник 16 происходит охлаждение воды, подаваемой на эжектор 15, Через теплообменник 13 происходит охлаждение генератора 5 и подогрев обратной линии системы отопления.

Конструктивно влажно-паровая турбина может выполняться в *горизонтальном* и *вертикальном* исполнениях. В предлагаемом проекте принята вертикальная конструктивная схема выполнения микротурбины. Вертикальная конструкция микротурбины позволяет:

- облегчить нагрузку на опорные подшипники, что дает возможность применить воздушные, газодинамические, лепестковые подшипники и

отказаться, таким образом, от традиционной смазки подшипников турбинным маслом;

- создать герметичный корпус, в котором находится сама влажно-паровая турбина, конденсатор турбины и электрогенератор, что предотвращает утечки рабочей среды из внутренней части паросиловой установки.

Технологическая схема движения пароводяной среды в проточной части микротурбины может выполняться *осевой, центробежной и центростремительной*. В энергетике традиционно применяется осевая проточная схема движения рабочей среды. Известно, что такая схема способна перерабатывать большие расходы рабочей среды. Однако такая схема не рассчитана на использование больших рабочих напоров. Поэтому в данном проекте используется центростремительная схема проточной части микротурбины. Как показали расчеты, центростремительная конструктивная схема проточной части способна перерабатывать заданный теплоперепад в одной ступени давления турбомшины, в то время как при осевом выполнении проточной части турбомшины и аналогичном теплоперепаде требуется две ступени давления или двухвенечная ступень диска Кертиса.

При принятой конструкции микротурбинной установки применены воздушные лепестковые опорно-упорные подшипники при большой скорости вращения ротора турбины (35000 об/мин). И хотя такие подшипники могут работать и при больших скоростях вращения ротора турбины (известны случаи применения более 100000 об/мин), такая конструкция оказалась уникальной. Для создания воздушного клина на лепестках подшипников потребовалось создание стабильного давления воздуха в полости подшипника. Для этого во внутренние объемы подшипников и электрогенератора подводится воздух давлением 0,1 МПа для надежной работы подшипника и для охлаждения статора и ротора электрогенератора. В конструкции микротурбины предусмотрено также водяное охлаждение корпуса генератора и подшипников.

Бойлер получает тепло от замкнутого контура охлаждения конденсатора микротурбины. Он способен аккумулировать тепло равномерно нагружая систему отопления и горячего водоснабжения, при неравномерном поступлении тепла при конденсации пара в конденсаторе.

Статья подготовлена в рамках работ по государственному контракту № 16.526.11.6012 для Министерства образования и науки РФ.

Список использованных источников

1 Кузнецова О. Р. Экономическая эффективность систем децентрализованного энергоснабжения: на примере Хабаровского края / О. Р. Кузнецова: дисс. канд. экон. наук: 08.00.05.- Комсомольск-на-Амуре, 2002. -180 с.