

Паропоршневые технологии в малых когенерационных установках

А. Кропачев

Малая когенерация в частном жилом секторе имеет большие перспективы по энергосбережению и экономии энергоресурсов в масштабах всего общества. Применение паропоршневых технологий в домашних когенерационных установках имеет свои преимущества и может стать основным направлением в развитии малой когенерации. В статье анализируется опыт разработок и внедрения в производство микро-КГУ на паровых двигателях в России и в мире на примерах.

Когенерация – совместное производство тепловой и электрической энергии – является наиболее экономичным способом использования всей энергии, содержащейся в топливе. Как есть «большая» когенерация в виде ТЭЦ в крупных городах, так существует и «малая» когенерация в виде микро-КГУ (когенерационные установки), обеспечивающих частные дома электричеством и тепловой энергией для отопления и горячего водоснабжения. Известны несколько основных типов микро-КГУ, различающихся по способу преобразования газового топлива в электрическую энергию (КГУ для дома на других видах топлива – пеллетах, угле, дровах и так далее – пока не созданы). Это небольшие газопоршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС), топливные ячейки, двигатели Стирлинга

и паровые двигатели (последние два вида можно объединить как двигатели внешнего сгорания). Несмотря на то, что сегодня микро-КГУ с паровым двигателем еще остаются в статусе экспериментальных разработок, потенциально они обладают несомненными преимуществами:

- возможность работы практически на любом сгораемом топливе, в том числе на отходах и биотопливе;
- наиболее полное сгорание топлива (по сравнению с ДВС) и, как следствие, крайне низкие выбросы;
- низкий шум (по сравнению с ДВС);
- высокий общий КПД в режиме когенерации (тепло + электричество);
- низкая стоимость при массовом серийном производстве.

Учитывая эти весомые достоинства, доведенная до серийного производства паропоршневая микро-КГУ может составить достойную конкуренцию другим типам КГУ и внести свой вклад в энергосбережение и экономию ресурсов не только для отдельного домохозяйства, но и всего общества.

Паровые поршневые двигатели в когенерации

Применение паровых двигателей в когенерационных установках имеет давние традиции. Например, в нашей стране в первой половине 20-го века массово производились так называемые локомотивы для использования в районах с недостаточным обеспечением электроэнергией. Это были компактные энергоагрегаты на стационарном или колесном шасси, имеющие в составе объединенные в один блок паровой котел и паровой двигатель, часто с электрогенератором. Как правило, они работали на угле, дровах или сельскохозяйственных отходах и применялись для привода механизмов или выработки электроэнергии. Кроме того, остаточное тепло отработанного пара использовалось для отопления, горячего водоснабжения, сушки сельскохозяйственной продукции и т. д. В СССР такое совмещенное производство и использование тепла и электричества называлось теплофикацией, что по сути аналогично современному понятию когенерации.

Для примера приведем технические данные типового

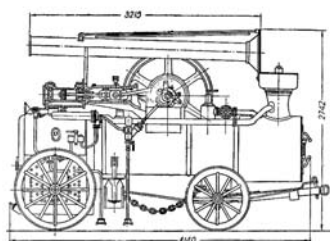


Рис. 1. Локомотив П-25

малого локомотива П-25 (рис. 1), серийно выпускавшегося Людиновским локомотивным заводом: мощность – 25 л.с., число оборотов – 300 об/мин., давление пара – 12 атм, температура пара 300 °С, шасси – колесный прицеп, вес – 4100 кг.

Но со второй половины 20-го века началось масштабное освоение новых месторождений нефти и стоимость дизельного топлива и бензина значительно снизилась. Кроме того, было освоено массовое производство дизельных и бензиновых двигателей для приводов электрогенераторов и различных агрегатов, налажена доставка топлива в самые отдаленные районы страны. Оказалось, что по сравнению с паровыми двигателями ДВС менее материалоемки и имеют больший КПД, топливо из нефти более энергоемко и для него проще организовать логистику, ДВС легче автоматизировать и встроить в различную технику. В результате локомотивы экономически проиграли ДВС и их производство было свернуто.

С наступлением 21 века ситуация изменилась: появились новые материалы и технологии обработки, автоматизация оборудования с применением компьютерных технологий вышла на новый уровень. Теперь появились возможности разработать паровой двигатель нового поколения, который сохранил бы свои принципиальные преимущества, а по основным техническим характеристикам вышел бы на уровень или приблизился к ДВС. Доказательным примером такого подхода стал проект немецкой компании Spilling, которая разработала и производит паровые поршневые машины, работающие в режиме когенерации и выдающие от 100 до 1200 кВт электрической мощности.

Но наиболее актуальной сферой применения подобного двигателя может стать микро-КГУ для индивидуальных домохозяйств. Многие

научные коллективы и промышленные компании по всему миру ведут разработки в области паропоршневых технологий и их приложений к малой когенерации.

КГУ Lion Powerblock

Наиболее известным примером использования парового двигателя в малой когенерации стала микро-КГУ немецкой фирмы OTAG Vertribes под названием Lion Powerblock (рис. 2). Установка была разработана в 2000-х годах и выпущена небольшой пилотной партией. К сожалению, потом производство было прекращено, но до сих пор в Европе можно найти в продаже бывшие в употреблении Lion Powerblock.

Конструктивно эта КГУ сильно отличается от традиционных подходов: в основе лежит двухцилиндровый свободнопоршневой паровой двигатель. Цилиндры сориентированы оппозитно в одну линию и развернуты крышками наружу, через которые поступает рабочий пар. Внутри цилиндров возвратно-поступательно движется единый поршень. Поршень представляет собой блочную конструкцию вместе с ротором линейного электрогенератора. На корпусе цилиндров расположены обмотки статора электрогенератора. В остальном установка более традиционна: в качестве источника тепла используется надувная газовая горелка, в котле применяется стальной змеевик, в котором вода нагревается до пара с давлением 25–30 бар и температурой до 350 °С.

КГУ Lion Powerblock работает следующим образом (рис. 3): в цилиндры поочередно подается свежий пар, поршень движется вместе с ротором, который, проходя мимо обмоток статора, возбуждает в них электрический ток. Двигатель – прамоточного типа, и поршень, доходя до выпускных окон в цилиндре, открывает выход отработавшему пару в конденсационный

теплообменник. В теплообменнике циркулирует теплоноситель из отопительной системы дома, нагреваясь от конденсирующегося пара. Пар в виде конденсатной воды снова подается в змеевик котла при помощи водяного насоса.

Технические данные КГУ Lion Powerblock: корпус – моноблок с габаритными размерами 126×62×83 см. Топливо – природный газ, диапазоны мощностей: электрическая – от 0,2 до 3 кВт, тепловая – от 2 до 16 кВт. Рабочая частота: 40–75 Гц, или 2400–4500 движений поршня в минуту. Общий вес – 160 кг. Рабочий шум – 44 дБ. Выходной ток преобразуется через инвертор и выдается с напряжением 230В частотой 50 Гц.

Некоторое время назад сообщалось, что готовится к производству версия Lion Powerblock, работающая на пеллетах, но сегодня дополнительной информации нет.

Паровой двигатель Cyclone

Американская компания Cyclone Power Technologies разрабатывает многообещающий проект – целую линейку паровых двигателей под общим названием Cyclone, мощностью от единиц до



Рис. 2. КГУ lion-Powerblok

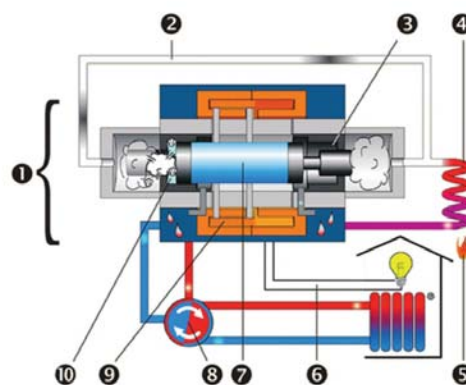


Рис. 3. Схема КГУ lion-Powerblok: 1 – паровой двигатель; 2 – паропровод; 3 – правый цилиндр; 4 – испарительная трубка; 5 – горелка; 6 – электропитание дома; 7 – сдвоенный поршень; 8 – теплообменник; 9 – электрогенератор; 10 – левый цилиндр

Рис. 4. Паровой двигатель Cyclone



сотен киловатт. Компания-разработчик заявляет о многих областях применения своих двигателей: электрогенерация на сжигаемом топливе, транспорт, военная техника и даже солнечные электростанции, но когенерационных установок среди них нет. Тем не менее этот проект находится на стадии испытаний прототипов и даже, как заявляет Cyclone Power Technologies, изготовления малых партий опытных образцов для тестирования заказчиками. Если проект окажется успешным, то при необходимости готовый небольшой двигатель серии Cyclone (как и любой другой паровой двигатель) можно будет адаптировать под микро-КГУ без особых технических проблем.

Все двигатели Cyclone (рис. 4) имеют общую конструкцию – это многоцилиндровый прямоточный паровой двигатель со звездообразным расположением цилиндров на общем валу. Все составляющие элементы – сам двигатель, горелки с наддувом, камеры сгорания с водяными трубками, конденсационные камеры и водяной насос – собраны в единый интегрированный блок. В отличие от обычного парового котла, в Cyclone вода в трубках нагревается до сверхкритического состояния, впрыскивается в цилиндры и уже в них вскипает, превращаясь в пар. Впрыскивание про-

исходит при помощи клапанов, управляемых регулируемым кулачковым механизмом, приводимым от коленчатого вала. Еще одно отличие Cyclone от прочих паровых двигателей – в конденсационных камерах. В них нет теплообменников, а отработавший пар, вышедший из цилиндров, циркулирует внутри камер и конденсируется на их стенках сложной формы. Эти стенки для охлаждения обдуваются наружным воздухом при помощи вентилятора. Далее конденсатная вода подается питающим насосом для повторного использования в двигателе. Еще одна инновация Cyclone – развитая термическая регенерация: это нагрев как внешнего воздуха, забираемого для горения топлива, так и воды, подаваемой питательным насосом в водяные трубки камеры сгорания – все за счет тепла, вырабатываемого двигателем в процессе работы. Воздух нагревается, проходя через конденсационные камеры и мимо выхлопных труб специальной формы. Вода подогревается, циркулируя по змеевикам, обернутым вокруг каждого цилиндра.

Информации о технических данных Cyclone мало и она сильно отличается в зависимости от версии двигателя. Приведем наиболее полные данные, опубликованные на электронном ресурсе (Cyclone Waste Heat Engine Specification /Cyclone Power Technologies, Inc. // URL: https://web.archive.org/web/https://web.archive.org/web/http://www.cyclonepower.com/PDF/WHE_Spec_Sheet.pdf) для одной из версий под названием Cyclone Waste Heat Engine (WHE-25): количество цилиндров – 6; рабочий объем (общий) – 0,406 л; количество оборотов – от 50 до 3000 об/мин.; рабочее давление – от 1,7 до 14 бар; мощность – 11,8 кВт при 3000 об/мин., давлении 14 бар и температуре 315 °С.

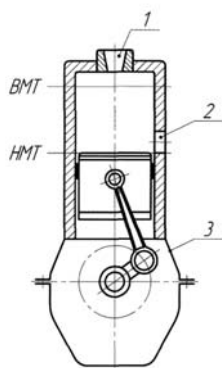
В настоящий момент подтвержденных известий о серийном производстве двигателей Cyclone пока нет.

Разработки «Промтеплоэнергетики»

В России также проводятся разработки по применению паровых поршневых машин в малой когенерации. В Москве научной группой (далее НГ) «Промтеплоэнергетика» ведутся как теоретические, так и экспериментальные исследования в этой области, разрабатываются и тестируются опытные образцы паровых двигателей. Базовая идея, лежащая в основе этих разработок, – паровой двигатель для микро-КГУ необходимо делать на основе существующих серийных двигателей внутреннего сгорания. Так, например, еще в 2004 г. группой был создан и испытан паровой двигатель на базе ДВС УД-2М. Исходно это был одноцилиндровый бензиновый 4-тактный двигатель с рабочим объемом 600 см³. После конверсии в паровую машину к двигателю был подсоединен асинхронный электрогенератор. На испытаниях была получена электрическая мощность 2,18 кВт при давлении насыщенного пара 8,2 кг/см² на оборотах 1400 об/мин. («Совершенствование систем энергоснабжения в газифицированных регионах России на базе поршневых технологий»: Дис. канд. техн. наук: 05.14.01/ Дубинин Владимир Сергеевич, НИУ «МЭИ». - М., 2013. - 242 с.). Также велись работы по конверсии в паровые машины автомобильных двигателей ВАЗ-2103 и ЗМЗ-402.

Одно из отличительных новшеств, применяемых НГ в своих паровых двигателях – газодинамическое устройство для впуска пара в цилиндр (рис. 5), запатентованное как изобретение. Устройство представляет собой сужающееся сопло в крышке цилиндра, через которое поступает свежий пар в двигатель. Выпуск отработавшего пара происходит через выпускные окна в стенках цилиндра, образуя прямоточную схему работы двигателя. Давление свежего

Рис. 5. Паровой мотор с газодинамическим устройством: 1 – сопло; 2 – выпускное окно; 3 – двигатель



пара всегда больше давления внутри цилиндра, что обеспечивает постоянную подачу пара к поршню и непрерывное движение поршня вместе с шатуном и коленвалом. Предложенное устройство позволяет отказаться от сложных органов парораспределения, таких как золотники и клапаны, а значит, упростить и удешевить сам двигатель и снизить потери мощности на работу органов парораспределения.

НГ продолжает вести работы над созданием паропоршневой КГУ и планирует провести испытания одного из своих паровых двигателей, используя пар, вырабатываемый действующей местной котельной.

Когенерационная установка «КРОПАТ»

Автором статьи с 2013 г. ведется разработка газовой когенерационной установки с паровым двигателем, предназначенной для обеспечения индивидуальных домов электроэнергией и теплом для отопления и ГВС. Этот проект получил название «КРОПАТ», и к настоящему времени (сентябрь 2017 г.) собран прототип КГУ и испытан в тестовом режиме (Кропачев А. М. ТЭЦ на вашей кухне // Техника – молодежи. - 2017. - №10. - С. 14-15).

По конструкции прототип КГУ «КРОПАТ» (рис. 6) представляет собой единый агрегат, собранный на алюминиевом каркасе размером 140×70×190 см (Ш×Г×В). В состав КГУ входят: прямой паровой котел, асинхронный электрогенератор, конденсационный блок, водяной бак, питающий насос, паровая и водяная арматура и система управления. Паровой котел состоит из стального корпуса, газовой горелки и змеевика из медных трубок. Паровой двигатель является переделкой двухтактного одноцилиндрового бензинового двигателя объемом 250 см³. Подача пара осуществляется через золотник в крышке цилиндра, а

выпуск – через выпускные окна в стенках цилиндра, образуя прямоточную схему работы двигателя. Электрогенератор сделан из трехфазного асинхронного электродвигателя путем подключения блоков конденсаторов параллельно выводам каждой фазы. Конденсационный блок состоит из трех теплообменников «пар-вода», каждый из которых заключен в отдельный корпус. Водяной питающий насос – электрический, обеспечивает высокое давление для подачи конденсатной воды из бака в котел. В систему управления входят: микрокомпьютер «Ардуино» с дисплеем, датчики давления и температуры пара, датчики уровня воды в баке, реле подключения электрической нагрузки.

Схема прототипа КГУ «КРОПАТ» приведена на рис. 7. Съем тепла с теплообменников «пар-вода» происходит при помощи воды, циркулирующей через них и внешний воздушный теплообменник. Этот теплообменник рассеивает тепло в атмосферу при помощи вентилятора, прогоняющего через него наружный воздух.

Демонстрация работы (официальный веб-сайт проекта «КРОПАТ». 2017 // URL: <https://www.kropat.ru/video>) и испытания прототипа проводились на сжиженном газе, поступавшем из бытового газового баллона. После запуска и выхода на рабочий режим, система управления подключила электрическую нагрузку в виде шести лампочек накаливания по 100 Вт. Испытания велись на насыщенном паре с давлением 12 атм и температурой 190 °С. Измеренные данные по электрическим параметрам показали мощность, достигающую 300 Вт при оборотах двигателя 450 об/мин. Прототип показал устойчивую бесперебойную работу в течение 2 ч до истечения из баллона оставшегося газа.

После успешно проведенных испытаний начат следующий этап – доработка прототипа до

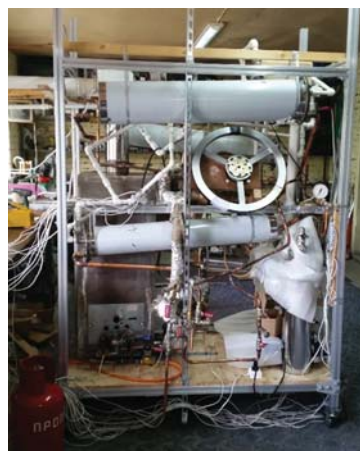


Рис. 6. Прототип КГУ «КРОПАТ»

заданных проектом рабочих параметров КГУ: от 1,5 до 2,5 кВт по электрической мощности и от 10 до 25 кВт по тепловой мощности.

Можно сделать вывод, что паропоршневые технологии являются перспективным направлением в деле создания практичного и экономичного КГУ для частного использования. Примеры исследований и внедрения в производство демонстрируют, что специалисты и компании из разных стран видят большие возможности в этом направлении и вкладывают немало сил и средств в развитие современных технологий применения пара в малой когенерации. Практика показывает, что на пути к микро-КГУ на паровом двигателе остается немало трудностей как технического, так и экономического характера. Но остается несомненным, что при совместных усилиях всех заинтересованных сторон из научных, промышленных и государственных сфер все эти препятствия можно преодолеть и потребитель получит недорогой и эффективный домашний источник тепла и электричества.



Рис. 7. Принципиальная схема прототипа КГУ «КРОПАТ»