

Особенности конструкций паровых поршневых моторов для малых и средних теплоэлектростанций

Трохин И. С., инж.

Всероссийский институт электрификации сельского хозяйства Россельхозакадемии, Москва

Рассмотрены особенности конструкций отечественных и зарубежных паровых поршневых моторов, предназначенных для эксплуатации в условиях малых и средних ТЭЦ и мини-ТЭЦ, а также в котельных. Проанализированы опыт использования за рубежом паромоторных солнечных мини-ТЭЦ мощностью 100 – 6000 кВт и перспективы их применения в России.

Ключевые слова: паровой мотор, паропоршневой двигатель, парораспределение, мини-ТЭЦ, котельная.

В последние годы на ТЭЦ малой (до 1 МВт) и средней (1 – 10 МВт) мощностей, а также в котельных устанавливают современные паровые моторы (ПМ), представляющие собой паровые поршневые двигатели с однократным расширением пара и частотой вращения выходного вала $n \approx 400 \div 3000 \text{ мин}^{-1}$ [1]. Это направление развития отечественной малой энергетики, в том числе с использованием солнечной энергии и альтернативных видов топлива (биомассы, биогаза и др.), отмечается в настоящее время, по мнению ряда авторитетных специалистов, как перспективное [2 – 4]. Положительный зарубежный опыт эксплуатации паромоторных мини-ТЭЦ подтверждает их лучшие энергетические и эксплуатационные показатели (удельный расход пара, ресурс до капитального ремонта и др.), чем у традиционных паротурбинных [1].

Прототипом ПМ следует считать быстроходные паровые машины первой половины XX века, работавшие с двукратным расширением пара и $n \approx 400 \div 1500 \text{ мин}^{-1}$ [1]. Это автомобильные двигатели братьев Дюбл (фирм “Беслер”, “Геншель”, “Борзиг”). В области создания отечественных быстроходных паровых машин пионером был создатель первого в мире полноразмерного самолета инженер А. Ф. Можайский.

Паровые моторы имеют конструкцию картерного типа, как поршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС), с надежной циркуляционной системой смазки. Отечественные ПМ оригинальной конструкции — паропоршневые двигатели (ППД) — разрабатывают под руководством В. С. Дубинина специалисты объединенной научной группы “Промтеплоэнергетика” Московского авиационного института, Всероссийского института электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ) Россельхозакадемии, Московского энергетического института, Московского института энергобезопас-

ности и энергосбережения и Королёвского колледжа космического машиностроения и технологии [1]. Паропоршневые двигатели представляют собой ПМ одностороннего давления с механизмом парораспределения одного из двух типов (ноу-хау): газодинамически-клапанным или золотниково-клапанным. Их создают на базе серийных ДВС. Мощностной ряд ППД в общем случае может охватывать диапазон от 1 кВт до 22 МВт, что соответствует номенклатуре ДВС, серийно производимых в России и странах СНГ. Для обслуживания ППД не требуется персонал высокой квалификации.

В базовом ДВС замене подлежит главным образом система топливоподачи на систему впуска и выпуска пара из цилиндров. Впуск пара может быть реализован через специальный золотник или газодинамическое устройство, а выпуск — через штатные клапаны ДВС. Например, для газодинамического впуска пара в цилиндр можно применять соответствующий механизм системы профессора И. Е. Ульянова и его учеников [5], обеспечивающий подачу газообразного рабочего тела и отличающийся простотой конструкции и высокой надежностью при эксплуатации. По сравнению с клапанными и золотниковыми механизмами он обладает меньшим гидравлическим сопротивлением. При таком впуске пар поступает в цилиндр двигателя через сужающееся коническое сопло. Конструкция последнего такова, что давление на входе в него больше $2/3$ значения, при котором обеспечивается сверхкритический перепад давлений между входом и выходом сопла. Пар подается в каждый цилиндр непрерывно. Испытания опытных образцов газодинамически-клапанных ППД показывают, что их мощность примерно соответствует мощности исходных ДВС уже при абсолютном давлении свежего пара 0,6 – 0,8 МПа.

Цилиндры и паровые коллекторы ППД, как и у зарубежных ПМ, теплоизолируют. Российские разработчики не исключают возможность применения для этой цели современного отечественного тепло-, звуко- и электроизоляционного материала SuperSil на кремнеземной основе [6], разработанного и выпускаемого московским предприятием ЗАО “РЛБ Силика”.

Следует особо отметить, что главные потери в ПМ обусловлены не дросселированием пара при впуске и выпуске (из-за гидравлического сопротивления парораспределительных механизмов), а теплообменом между паром, поверхностями парораспределительных механизмов и стенками цилиндров, а также утечками пара. Увеличение n выходного вала ПМ влечет за собой соответствующее уменьшение объема цилиндров по сравнению с классической паровой машиной (с одно- или многократным расширением пара и $n < 400 \text{ мин}^{-1}$ [1]) и, следовательно, уменьшение остальных размеров двигателя. При пропорциональном уменьшении размеров последнего объем его цилиндра уменьшается в большей степени, чем поверхность стенок, участвующих в теплообмене с паром. Поэтому в ПМ на единицу рабочего объема цилиндра приходится более значительная площадь поверхности теплообмена, чем в классической паровой машине. Это было доказано советскими учеными в начале 1950-х гг. в результате проведенных во Всесоюзном научно-исследовательском институте механизации сельского хозяйства испытаний теплофикационной паровой поршневой установки СПУ-100 ВИМ [7], первичный двигатель которой по конструктивным особенностям можно считать паровым мотором. А испытания в те же годы мотора НАМИ-012 двустороннего давления в широком диапазоне изменения n позволили установить*, что для ПМ с увеличением n механический КПД монотонно снижается из-за роста механических потерь, но относительный индикаторный КПД η_{oi} возрастает в большей степени. Это объясняется значительным уменьшением потерь от теплообмена между паром и стенками цилиндров, а также утечек пара. При этом гидравлические потери при впуске пара в цилиндр увеличиваются незначительно. Однако после достижения некоторой критической частоты вращения $n_{кр}$ наблюдается обратный эффект, когда с увеличением n гидравличе-

ские потери возрастают значительно, чем снижаются потери от теплообмена и утечек пара, что приводит к уменьшению η_{oi} . Таким образом, при изменении n ПМ его η_{oi} , относительный эффективный η_{oe} и эффективный η_e КПД увеличиваются только при $n \leq n_{кр}$. Максимальные значения этих КПД достигаются при $n = n_{кр}$.

Специалисты европейской компании “Solar Heat & Power Europe GmbH” отмечают [8], что ПМ Spilling (Германия) [9, 10] созданы с учетом достижений в области конструкций современных ДВС. Эти двигатели представляют собой рядные крейцкопфные ПМ двустороннего давления с клапанным парораспределением. При их эксплуатации исключена возможность загрязнения пара смазочным маслом. Рабочее абсолютное давление пара — от 0,6 до 6 МПа. Компания “Eco Link Power Ltd” (Англия) комплектует модульные тригенерационные установки марки AES для работы на биомассе именно с такими ПМ единичной электрической мощностью от 120 до 1200 кВт. Считается, что моторы Spilling — это высококачественное и малозатратное в обслуживании оборудование мирового класса. Кроме того, например в Австралии и Испании, паромоторные электроагрегаты Spilling применяются на солнечных мини-ТЭЦ (шкала мощностей солнечных электростанций с областью рационального использования паровых моторов: фотоэлектрические станции — от 1 до 1000 кВт, мини-ТЭЦ с паровыми моторами — от 100 кВт до 6 МВт, мини-ТЭЦ или ТЭЦ с паровыми турбинами — от 6 до 450 МВт) [8]. Солнечные коллекторы таких энергетических установок обеспечивают получение насыщенного водяного пара с температурой 260 °С. Отрабатывший в ПМ пар направляется в пароводяные теплообменники (бойлеры) для нагрева воды или в паровые абсорбционные холодильные машины. Предусмотрены также аккумуляторы пара для обеспечения работы мини-ТЭЦ в часы минимума солнечного излучения. В России перспективно применять на подобных экологически чистых мини-ТЭЦ более дешевые ППД. Отечественные солнечные коллекторы подходящих конструкций уже создают, в частности, в ВИЭСХ под руководством академика Россельхозакадемии Д. С. Стребкова. Такие энергетические установки целесообразно будет использовать для электро-, тепло- и холодоснабжения объектов, расположенных в зонах с высокой концентрацией солнечного излучения на единицу площади поверхности Земли.

* Экспериментальное исследование экономичности автомобильного парового двигателя НАМИ-012. Технический отчет / Гос. Союз. науч.-исслед. автомобильный и автомобильный ин-т. — М., 1954.

В сотрудничестве со специалистами факультета электротехники Чешского высшего технического училища и при поддержке Чешского энергетического агентства компанией “PolyComp a.s.” разработаны и построены паровые моторы PM-VS. Это рядные ПМ с клапанным механизмом парораспределения. Создают их на базе ДВС, причем маломощные моторы [11] — по бескрейцкопфной схеме с поршневой группой одностороннего давления, а моторы средней мощности [12] разработчики предлагают строить по схеме с крейцкопфом, функцию которого выполняет модифицированный поршень, и поршневой группой двустороннего давления. В конструкциях PM-VS исключена возможность загрязнения пара смазочным маслом, а циркуляционная система смазки обеспечивает внутрицилиндровую очистку масла от парового конденсата [11, 12]. Компания “PolyComp a.s.” продолжает совершенствовать свои ПМ [13].

В перспективных конструкциях ПМ целесообразно использовать самодействующие клапаны для впуска и (или) выпуска пара. Идея самодействующего парораспределения в поршневых паровых двигателях была выдвинута в 1890-х гг. инженером В. Шмидтом [14]. При таком парораспределении клапаны работают за счет воздействия на них самого рабочего тела без внешнего привода. Позже В. Шмидт разработал и испытал конструкцию самодействующих клапанов для быстроходных паровых машин и моторов высокого давления — 2 ÷ 6 МПа и более. Такие клапаны отличались компактностью, надежностью и работали практически бесшумно. Гидравлические потери при впуске пара (потери на дросселирование) были не больше, чем у принудительно действующих клапанов: расход пара на регулирование составлял всего 1–2 % общего его расхода в двигателе.

Выводы

1. Потери энергии в конструкциях паровых паропоршневых моторов преимущественно обусловлены теплообменом между паром, поверхностями парораспределительных механизмов и стенками цилиндров, а также утечками пара.

2. При изменении частоты вращения выходного вала ПМ его КПД η_{oi} , η_{oe} и η_e увеличиваются только при $n \leq n_{кр}$. Максимальные значения этих КПД достигаются при $n = n_{кр}$.

3. В современных конструкциях ПМ для мини-ТЭЦ могут применяться клапанные, золотниково-клапанные и газодинамически-кла-

панные механизмы парораспределения. Система смазки — циркуляционная с “сухим” картером.

4. В перспективных конструкциях ПМ целесообразно использовать самодействующие клапаны системы В. Шмидта для впуска и (или) выпуска пара.

5. На экологически чистых при работе солнечных мини-ТЭЦ целесообразно применение зарубежных ПМ и российских ППД.

Список литературы

1. Трохин И. С. Мини-ТЭЦ с паровыми моторами для бесперебойного энергоснабжения ответственных потребителей. — Промышленная энергетика, 2012, № 9.
2. **Инновационные** технологии возобновляемой энергетики: презентация докл. акад. Россельхозакадемии Д. С. Стребкова на 6-й Междунар. энергетич. неделе “Московский энергетический диалог” 25 октября 2011 г. — <http://www.iweek.ru/conf2011/presentations/iew-2011-MEA-Strebkov.pdf> (дата обращения: 17.07.2012).
3. **Предложения** по развитию биоэнергетики на территории Российской Федерации: презентация докл. доктора техн. наук И. Я. Редько на 3-й Общерос. конф. “Государственная политика в области энергоэффективности и энергосбережения” 26 апреля 2012 г. — <http://rosenergo.gov.ru/conf/sess4/redko.pdf> (дата обращения: 17.07.2012).
4. **О планах** инвестиционного энергоаудита и газозамещения в городах Украины: статья президента Междунар. ассоц. термозенергетич. компаний “МАТЭК” Д. А. Чубенко. — Портал-энерго: эффективное энергосбережение. <http://portal-energo.ru/articles/details/id/564> (дата публикации: 24.07.2012).
5. **А.с. SU 1753001 СССР.** Способ работы поршневого двигателя и поршневой двигатель / И. Е. Ульянов, В. С. Дубинин, В. Н. Квачев и др. — Открытия. Изобретения, 1992, № 29.
6. **Лабунский А. В.** Новый многофункциональный изоляционный материал. — Локомотив, 2009, № 3.
7. **Цукерник Л. М.** Тепловой баланс современной быстроходной паровой машины. Паровые двигатели: Сб. статей / Под общ. ред. С. Б. Минут. — М.: Mashgiz, 1955.
8. **A Flexible Robust Efficient Sustainable solar thermal cogeneration system.** — Solar Heat & Power Europe GmbH: site. URL: http://www.shp-europe.com/docs/mstpp_e.pdf (дата публикации: 29.09.2006).
9. **Pat. DE 972 093.** Gekapselte, stehende Dampfmaschine / H. Spilling. Anmeldetag: 27.02.1952.
10. **Pat. EP 1 045 128.** Wärmekraftmaschine / Spillingwerk GmbH. Anmeldetag: 14.04.2000.
11. **Pat. CZ 286918.** Parní kogenerační jednotka malého výkonu / J. Št’astný, T. Klír. Přihlášeno: 22.03.1999.
12. **Pat. CZ 11118 (užitný vzor).** Parní objemová kogenerační jednotka / T. Klír, J. Št’astný. Přihlášeno: 13.03.2001.
13. **Pat. CZ 22164 (užitný vzor).** Parní motor / M. Novák. Přihlášeno: 07.03.2011.
14. **Гартманн О. Г.** Пар высокого давления / Пер. с нем. Б. А. Люблинского; под ред. Н. А. Доллежала. — М.: Гостехиздат, 1927.