

АНАЭРОБНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ ВНЕШНЕГО СГОРАНИЯ

В. И. Карагузов

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Анаэробные, т. е. воздухонезависимые двигатели, находят применение в ракетной и космической технике, на подводных судах и в труднодоступных для регулярного обслуживания наземных объектах. В подавляющем большинстве таких приложений в ракетной и космической технике используются жидкостные и твердотопливные ракетные и реактивные двигатели. В наземных и подводных объектах применяются анаэробные двигатели на атомной энергии, а также дизельные двигатели внутреннего сгорания с запасами топлива и окислителя, зачастую в криогенном виде. Двигатели внутреннего сгорания при всех их преимуществах имеют ряд недостатков, которые отсутствуют в двигателях внешнего сгорания.

Двигатели внешнего сгорания на базе пульсационной трубы и термоакустического эффекта являются перспективными для орбитальных, ракетных, подводных бортовых и автономных наземных энергоустановок. В них могут отсутствовать механически подвижные детали и узлы, что определяет длительный ресурс, высокую надежность, минимальные шумы и вибрации. Для работы такие двигатели могут использовать любое топливо, они практически не требуют обслуживания.

Ключевые слова: анаэробные энергоустановки, бортовые системы, двигатель Стирлинга, пульсационная труба, термоакустическая система.

Введение

Анаэробными принято называть системы, которые не используют атмосферный воздух [1–3]. В широком смысле под анаэробными энергоустановками следует понимать не только классические системы, работающие с запасом газообразного или жидкого кислорода (воздуха), но и системы, работающие от альтернативных источников энергии, не требующих кислорода.

Анаэробные энергоустановки подразделяются на бортовые и стационарные. К бортовым анаэробным энергоустановкам относят ракетные, орбитальные и судовые. Стационарные анаэробные энергоустановки включают наземные системы бесперебойного питания стратегических комплексов, управляющих и вычислительных центров и автономного энергообеспечения удаленных необитаемых объектов.

Анаэробные энергоустановки подразделяются на атомные; на топливных элементах; электрохимические; с бортовым хранением сжатого воздуха или жидкого кислорода; радиационные солнечные или с излучением в ночное небо; геотермальные; с использованием различных источников теплоты и холода.

Наибольший интерес представляют бортовые анаэробные системы, так как к ним относится большинство существующих анаэробных энергоустановок.

Наиболее распространенные бортовые анаэробные силовые установки на флоте — это атомные энергоблоки, на орбитальных космических аппаратах — солнечные батареи. Эти энергоустановки имеют как преимущества, так и недостатки.

Разработкой анаэробных энергоустановок для подводных судов на базе тепловых двигателей внешнего сгорания, работающих по циклу Стирлинга, а также дизельных, парогенераторных, электрохимических и других систем занимается несколько стран [4–6]. Паровые двигатели внешнего сгорания в данной работе рассматриваться не будут ввиду их низкого КПД, больших масс и габаритов.

В двигателях внешнего сгорания отсутствуют процессы взрывного горения и выхлопа, что положительно сказывается на уровне вибраций и шумов.

Объект исследований

Объектом исследований являются бортовые анаэробные двигатели внешнего сгорания. В настоящее время такие двигатели серийно не выпускаются [7], при том что первые макетные двигатели Стирлинга были созданы еще в XIX веке [8]. Несколькими организациями ведутся работы по созданию макетных двигателей Стирлинга [5, 9]. Единственная известная мелкосерийная модель анаэробного двигателя Стирлинга производится на шведских верфях Kockums для подводных лодок типа «Готланд» [9].

Разработку бортовых энергоустановок на базе двигателей Стирлинга сдерживает достаточно большое количество технических и технологических проблем, которые решаются с переменным успехом в мелкосерийных анаэробных двигателях Стирлинга для энергоснабжения на подводных лодках [10, 11].

Двигатели внешнего сгорания принципиально отличаются от двигателей внутреннего сгорания

тем, что продукты сгорания топлива не являются рабочим телом двигателя и протекают снаружи рабочих объемов, что дает им значительные преимущества [7–9]. Одним из таких преимуществ является возможность применения в них различных топлив (дизельное топливо, бензин, метан, водород и др.). Другим преимуществом двигателей внешнего сгорания являются более низкие уровни шумов и вибраций этих двигателей. Кроме того, в целом ряде реализаций такие двигатели обладают более высоким ресурсом, надежностью и КПД, меньшими массой, габаритами и себестоимостью, они экологичны, проще в эксплуатации и не требуют частого и квалифицированного обслуживания.

Для реализации анаэробных термомеханических двигателей внешнего сгорания можно использовать не только цикл Стирлинга, но и целый ряд других, таких как циклы Карно, Эриксона, пульсационной трубы, на термоакустическом эффекте, а также промежуточные и комбинированные циклы [7].

Цикл Карно, несмотря на то что он является идеальным и эталонным, в реальных двигателях не используется из-за ряда технических сложностей. С другой стороны, идеальные циклы Стирлинга и Эриксона при сравнительно более простой реализации имеют такой же КПД, как и у идеального цикла Карно [7, 10].

Следует помнить, что в реальных машинах реализовать идеальные циклы не представляется возможным из-за ограничений, накладываемых теплообменом, гидравликой, механическими потерями и пр. В итоге в любом двигателе внешнего сгорания реализуется промежуточный цикл, который на T , s - и p , V -диаграммах напоминает овал, эллипс или другую фигуру, отличную от формы идеального цикла [7–10].

Двигатель внешнего сгорания Стирлинга обладает как достоинствами, так и недостатками, к которым, в первую очередь, следует отнести малый ресурс, сложность регулирования и инерционность на переходных режимах [12]. Но наибольшие проблемы, которые препятствуют широкому внедрению двигателей Стирлинга, — конструктивные и материаловедческие, связанные с невозможностью применения жидких или консистентных смазок в поршневых уплотнениях и других узлах двигателя из-за выгорания паров смазок на горячих теплообменных аппаратах. В результате на теплообменных поверхностях образуется нагар, который значительно ухудшает теплообмен и увеличивает гидравлические потери.

С точки зрения термодинамики, существуют еще два вида систем, перспективных для создания двигателей внешнего сгорания: пульсационная труба и термоакустические системы [7, 11, 13].

Усовершенствованием интегральных двигателей внешнего сгорания на базе цикла Стирлинга с жестким приводом поршней являются двигатели Сплит-Стирлинг с газовым приводом вытеснителя — одного из двух поршней машины. Такое решение позволяет уменьшить механические потери, повысить надежность и ресурс двигателя. Дальнейшим развитием этих типов

двигателей внешнего сгорания выступает пульсационная труба, которая имеет только один поршень, функции второго выполняет пульсационный объем. Логическим завершением этого ряда двигателей внешнего сгорания являются термоакустические тепловые машины, в которых нет ни поршней, ни других подвижных деталей [7].

Одним из самых значительных недостатков двигателей Стирлинга является его низкая ремонтпригодность, связанная с работой поршневых пар и теплообменных аппаратов при высоких температурах без смазки или в условиях ограниченной смазки, что накладывает дополнительные ограничения на ресурс. Так, на шведских подводных лодках типа «Готланд» через каждые 8...10 тыс. часов эксплуатации заменяется энергетическая установка вместе с двигателем Стирлинга и частью прочного корпуса, так как двигатель Стирлинга ремонту не подлежит. То есть вырезается и заменяется примерно четверть подводной лодки.

Если принять, что главная задача анаэробных термомеханических энергоустановок вырабатывать электрическую энергию, то следует признать, что для достижения таких параметров, как высокие ресурс, надежность, КПД и низкие шумы, вибрации, вращающие моменты, периодичность регламентных работ, минимизация механически подвижных деталей и узлов имеет первостепенное значение.

Аналитические и расчетные исследования [7, 11, 13, 14] показали, что из анаэробных термомеханических энергоустановок наибольшую перспективу представляют пульсационная труба и термоакустические системы. В двигателе внешнего сгорания на базе пульсационной трубы единственный поршень может быть выполнен свободным и объединен с ротором линейного электрогенератора. В термоакустическом тепловом двигателе энергия акустической волны вырабатывает электроэнергию для энергообеспечения. Проведенные экспериментальные и расчетные исследования подтвердили перспективность термоакустических двигателей внешнего сгорания и на базе пульсационной трубы, по КПД они не уступают двигателям внешнего сгорания Стирлинга, а по некоторым другим характеристикам превосходят их [14].

В пульсационных и термоакустических двигателях внешнего сгорания в наиболее нагретых узлах отсутствуют трение в поршневых парах, а значит, не требуется смазка. В этих узлах отсутствует влияние мертвых объемов, поэтому возможно увеличение поверхностей теплообмена [15, 16] и, как следствие, уменьшение массы и габаритов тепловых двигателей.

Отсутствие подвижных узлов в «горячей» зоне упрощает требования к материалам и технологиям при создании анаэробных термомеханических энергоустановок.

Следует отметить, что анаэробные термомеханические энергоустановки на базе пульсационной трубы и термоакустического эффекта заметно проще по конструкции, имеют меньшую себестоимость, чем двигатель Стирлинга, проще в обслуживании, имеют больший ресурс, меньшую массу и габариты.

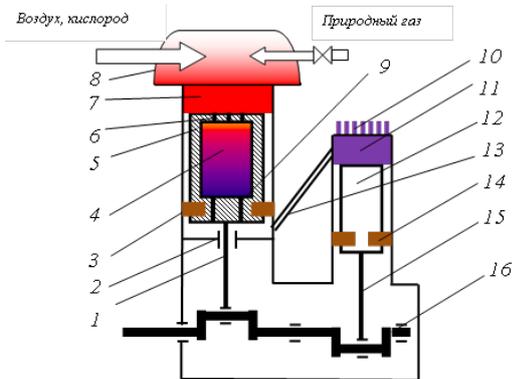


Рис. 1. Схема двигателя Стирлинга с параллельным расположением поршней:
 1 — шток вытеснителя; 2 — уплотнение штока; 3 — уплотнение вытеснителя; 4 — регенератор; 5 — вытеснитель; 6, 9 — газовые каналы; 7 — «горячая» полость; 8 — камера сгорания; 10 — охладитель «холодной» полости; 11 — «холодная» полость; 12 — поршень; 13 — соединительная трубка; 14 — уплотнение поршня; 15 — шток поршня; 16 — коленчатый вал

Fig. 1. Scheme of Stirling engine with a parallel arrangement of pistons:
 1 — displacer rod; 2 — stem seal; 3 — seal of the displacer; 4 — regenerator; 5 — displacer; 6, 9 — gas channels; 7 — «hot» cavity; 8 — combustion chamber; 10 — cooler «cold» cavity; 11 — «cold» cavity; 12 — the piston; 13 — connecting tube; 14 — piston seal; 15 — piston rod; 16 — crankshaft

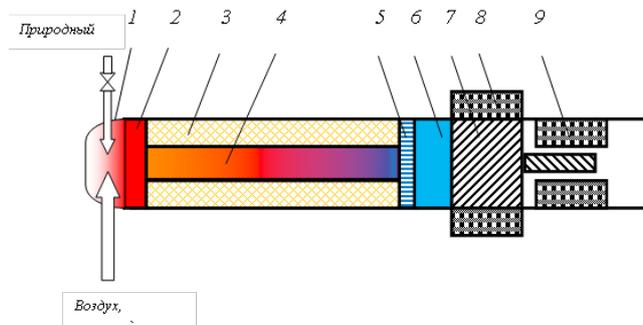


Рис. 2. Схема двигателя внешнего сгорания на базе пульсационной трубы:
 1 — камера сгорания; 2 — «горячая» полость; 3 — регенератор; 4 — пульсационная полость; 5 — охладитель «холодной» полости; 6 — «холодная» полость; 7 — поршень; 8 — магнитный подвес поршня; 9 — линейный электрогенератор

Fig. 2. Scheme of an external combustion engine based on a pulsation tube:
 1 — combustion chamber; 2 — «hot» cavity; 3 — regenerator; 4 — pulsation cavity; 5 — «cold» cavity cooler; 6 — «cold» cavity; 7 — the piston; 8 — piston magnetic suspension; 9 — linear electric generator

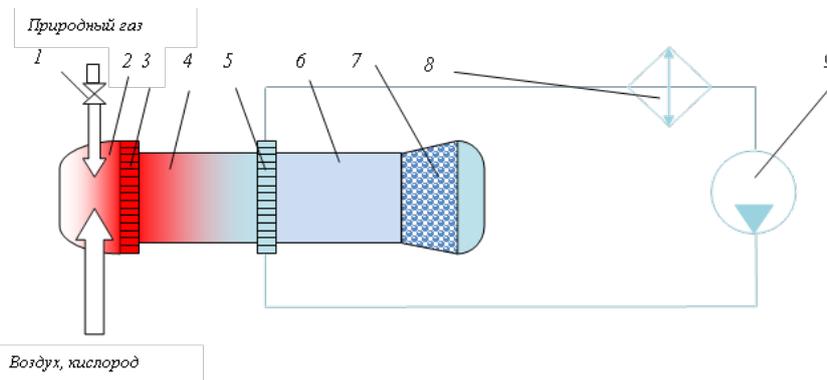


Рис. 3. Схема термоакустического двигателя-генератора внешнего сгорания:
 1 — вентиль подачи природного газа; 2 — камера сгорания; 3 — теплообменник нагрева; 4 — регенеративный теплообменник (стек); 5 — охлаждающий теплообменник; 6 — резонансная труба; 7 — электрогенератор; 8 — теплообменник сброса теплоты; 9 — циркуляционный насос

Fig. 3. Scheme thermoacoustic engine-generator of external combustion:
 1 — natural gas supply valve; 2 — combustion chamber; 3 — heat exchanger; 4 — regenerative heat exchanger (stack); 5 — cooling heat exchanger; 6 — resonant tube; 7 — electric generator; 8 — heat exchanger; 9 — circulation pump

Результаты и обсуждение

Основные трудности создания двигателей Стирлинга можно разделить на три основные группы:

1. Теплообмен в двигателях Стирлинга происходит в тяжелых условиях. С одной стороны, сжигаемое в камере сгорания 8 топливо должно отдать теплоту рабочему телу (как правило, гелию) в «горячую» полость 7 через ограниченную

площадь поверхности торца цилиндра, которую трудно развить из-за неизбежного увеличения мертвого объема. С другой стороны, теплообмен в регенераторе 4 (рис. 1) требует высоких значений теплоемкости и теплопроводности насадки регенератора при высоких температурах (до 900...950 °С), а также отсутствия паров смазки в рабочем теле. Охлаждение рабочего тела в «холодной» полости также осуществляется в условиях дефицита теплообменной поверхности.

2. Уплотнение 3 вытеснителя 4 и уплотнение 14 поршня 12 должны работать в условия сухого трения, то есть без жидкой смазки, так как пары и туман масла попадают на горячие теплообменные поверхности, выгорают на них и значительно ухудшают теплообмен и увеличивают гидравлические потери вплоть до закупорки каналов. Работа поршневых уплотнений без смазки резко уменьшает ресурс работы двигателя и снижает его надежность. Коренные и шатунные шейки коленчатого вала также требуют смазки.

3. Детали, работающие при высоких температурах, должны быть выполнены из жаропрочных и жаростойких материалов, причем часть из них должна иметь высокую теплопроводность, а часть низкую.

Кроме того, существуют и другие технические проблемы, связанные с герметичностью, температурными деформациями, потерями на трение и пр.

На рис. 1 показана схема двигателя Стирлинга, работающего на природном газе.

При сжигании топлива в камере сгорания 8, которая находится снаружи рабочих объемов двигателя, теплота сгорания передается через стенки цилиндра в «горячую» полость 7, где нагревается рабочее тело. Рабочее тело через регенератор 4, газовые каналы 6 и 9, соединительную трубку 13 поступает в «холодную» полость 11, где охлаждается через стенку цилиндра от охладителя 10. Поршень 12 и вытеснитель 5 должны двигаться строго синхронно с определенным сдвигом фаз. Уплотнения 2, 3 и 14 предотвращают перетечки рабочего тела.

При всех положительных свойствах двигателя Стирлинга он обладает и рядом недостатков, таких как сравнительно большие габариты и масса, инерционность, сложность регулирования. Но основными проблемами, сдерживающими применение двигателей Стирлинга, являются конструктивные и материаловедческие. Они связаны с малым ресурсом работы из-за сухого трения и с работой поршневого узла между температурными уровнями в 50...100 °С и 900...950 °С, а также с работой теплообменных аппаратов на этих температурных уровнях. При работе двигателя Стирлинга на высоких температурах нагретые детали «газят» и загрязняют рабочее тело, что приводит к понижению КПД.

В криогенной технике в качестве альтернативы машинам Стирлинга выступают машины на базе пульсационной трубы [7]. Они более просты, обладают большим ресурсом и надежностью, а также меньшей себестоимостью. По своей конструкции они напоминают упрощенные машины Стирлинга.

Принципиальная схема двигателя внешнего сгорания на базе пульсационной трубы показана на рис. 2.

В камере сгорания 1 происходит сгорание топлива. При этом происходит нагрев полости 2 и под действием разности температур в полости 4 возникают пульсации давления рабочего газа, которые через полость 6 двигают поршень 7 возвратно-поступательно. Поршень 7 соединен с ротором линейного электрогенератора 9.

В конструкции двигателя внешнего сгорания на базе пульсационной трубы всего один пор-

шень, поэтому его целесообразно выполнить бесконтактным при помощи магнитного подвеса 8. Уплотнение поршня выполняется щелевым или лабиринтным.

В двигателе внешнего сгорания на базе пульсационной трубы отсутствуют проблемы с температурными деформациями и герметичностью, так как в зоне нагрева нет подвижных узлов. Достоинством такого технического решения является отсутствие подвижных уплотнений с окружающей средой, так как механическая энергия от двигателя не отводится. Недостаток пульсационной трубы — необходимость поддерживать в ней безударный режим работы поршня в верхней и нижней мертвых точках, причем не только в стационарном режиме, но и при выходе на режим.

Перспективными для бортовых энергоустановок являются термоакустические системы, которые могут генерировать акустическую и электрическую энергию, вырабатывать холод [17]. Их конструкции внешне похожи на пульсационную трубу [11, 12], но физические принципы и методы расчета иные [18]. На рис. 3 показана схема термоакустического двигателя-генератора внешнего сгорания.

Термоакустические системы могут не иметь не только поршней, но и вообще подвижных деталей, поэтому называть их двигателями можно только условно. Они имеют наименьшие уровни шумов и вибраций, которые находятся в более высокочастотном диапазоне, чем у других двигателей.

Термоакустические системы обладают целым рядом полезных для бортовой техники свойств: отсутствием механически подвижных деталей и узлов, что позволяет достичь длительного ресурса, высокой надежности и отсутствия вибраций; для своей работы они могут использовать не только электрическую, но и тепловую энергию; такие энергоустановки не требуют резервирования и обслуживания.

Орбитальные бортовые термоакустические двигатели могут использовать вместо топлива солнечную энергию, что позволяет обеспечить надежное, высокоресурсное, невибрирующее энергообеспечение объектов космического базирования. Следует отметить, что двигатели внешнего сгорания на базе пульсационной трубы и термоакустического эффекта не создают критичных для орбитальных объектов вращательных моментов.

Основными элементами термоакустического двигателя, определяющими энергетические и массогабаритные характеристики, являются теплый и холодный регенеративные теплообменники — СТЕКи. К ним предъявляются жесткие и зачастую противоречивые требования: большой градиент температур на концах для большой холодопроизводительности, высокий термодинамический КПД и малый градиент температур для уменьшения потерь от теплопроводности; уменьшение длины СТЕКов определяется акустическими потерями, а увеличение — потерями от осевой теплопроводности и увеличением поверхности теплообмена; увеличение диаметра каналов и уменьшение их количества необходимо для уменьшения акустических потерь; с другой стороны, уменьшение диаметра каналов

и увеличение их количества необходимо для увеличения теплообменной поверхности. Увеличение шероховатости каналов улучшает теплообмен, но увеличивает акустические и гидравлические потери, увеличение коэффициента теплопроводности материалов СТЕКов позволяет увеличить теоретическую холодопроизводительность, но и увеличивает потери от теплопроводности по длине СТЕКов.

Термоакустические двигатели могут работать практически от любого источника теплоты: изотопных источников, электрических нагревателей, солнечных батарей, а в ряде случаев — от теплоты, отводимой от бортового оборудования.

Разработки в области термоакустических охладителей, ожижителей и генераторов показывают, что их КПД может составлять до 20...50% при несомненных преимуществах перед традиционными системами, одним из которых является работа от низкопотенциальных источников теплоты, кроме того, они не требуют обслуживания.

Таким образом, при использовании термоакустического эффекта возможно создание теплоиспользующего высокоэнергетического, надежного, необслуживаемого генератора электрической энергии за счет подвода внешней теплоты практически любой природы.

Современное состояние развития термоакустических систем позволяет использовать их для создания орбитальных теплоиспользующих термоакустических энергоагрегатов. Энергия для их непосредственной работы подводится при помощи солнечного концентратора и теплопроводов. В ряде случаев возможно применение циркуляционных контуров для подвода теплоты к термоакустической энергоустановке. Энергоустановка на базе термоакустического теплового двигателя является необслуживаемой, она не имеет подвижных узлов и механического износа деталей, имеет длительный ресурс работы.

Мощность термоакустической энергоустановки в значительной степени зависит от ее КПД, инсоляции и площади солнечного концентратора. Недостаточная инсоляция решается простым увеличением размеров концентратора.

Так, при требуемой мощности термоакустической энергоустановки 1...5 кВт и инсоляции 600...1200 Вт/м² диаметр солнечного концентратора составит от 1 м до 5 м. При требовании круглосуточной работоспособности термоакустической энергоустановки необходимо добавить в энергоустановку аккумуляторы теплоты для работы в темное время суток.

Частота и интенсивность акустической волны внутри термоакустического двигателя зависит от конструктивных и режимных параметров. При проектировании необходимо принять меры по уменьшению уровня шума вне термоакустического двигателя (чем меньше шум снаружи, тем выше КПД двигателя) за счет геометрических размеров агрегатов и звукоизоляции, но в процессе эксплуатации при регулировании мощности частота и амплитуда звуковой волны могут изменяться, что может увеличить шум вблизи термоакустической энергоустановки.

Частота акустической волны внутри термоакустического двигателя может быть от 30 Гц до

1000 Гц. В таком большом диапазоне частот звуковые волны имеют различную проникающую способность. Этот фактор следует учитывать при проектировании системы изоляции шумов. Ошибки при проектировании могут привести к тому, что геометрические размеры термоакустического двигателя будут не соответствовать режимам эксплуатации. Кроме того, изоляция шумов в одних режимах работы может работать корректно, а в других не работать вовсе.

Интенсивность звуковой волны внутри установки может достигать 160 дБ. Недоработки при проектировании таких установок могут привести к возникновению шумов высокой интенсивности при переходных и нештатных режимах работы. Такие шумы могут быть вредны для обслуживающего персонала и оборудования.

Выводы и заключение

Расчетные исследования показали, что удельная масса энергетической установки Стирлинга примерно соответствует удельной массе энергетической установки на базе дизельного двигателя, удельная масса двигателя на базе пульсационной трубы и термоакустического эффекта меньше в 2...3 раза. КПД этих двигателей внешнего сгорания в 1,5...2 раза больше, чем у дизельного двигателя. Ресурс двигателя Стирлинга на порядок уступает ресурсу дизельного двигателя, ресурс двигателя на базе пульсационной трубы примерно соответствует ресурсу дизельного двигателя, ресурс термоакустического двигателя определяется ресурсом электрического генератора и может на порядки превышать ресурс дизельного двигателя.

Шумы и вибрации двигателя Стирлинга составляют меньше 70...80 дБ, двигателя на базе пульсационной трубы — не превышают 50...60 дБ, термоакустического двигателя — не более 40...50 дБ.

Себестоимость двигателя Стирлинга относительно дизельного двигателя составляет 0,8...1,5, двигателя на базе пульсационной трубы — 0,5, термоакустического двигателя — 0,3.

Применение двигателей внешнего сгорания Стирлинга, на базе пульсационной трубы и термоакустических систем в аэрокосмической технике позволяет значительно улучшить ее тактико-технические характеристики, а в целом ряде случаев без таких систем невозможно выполнение поставленных задач.

В рассмотренных двигателях внешнего сгорания может использоваться не только энергия сжигания топлива, но и солнечная энергия, а также эксергия криогенных жидкостей, например, сжиженного природного газа и жидкого кислорода или воздуха, которые находятся на борту как топливо и окислитель [13].

В заключение следует отметить, что двигатели внешнего сгорания на базе пульсационной трубы и термоакустики являются наиболее перспективными для автономных и анаэробных систем электроснабжения, так как экологичны, существенно проще по конструкции и в обслуживании, дешевле в производстве, имеют больший ресурс, надежность, КПД, меньшие массу и габариты чем другие двигатели.

1. Generating energy from waste, including anaerobic digestion // GOV.UK. URL: <https://www.gov.uk/guidance/generating-energy-from-waste-including-anaerobic-digestion> (дата обращения: 06.04.2019).
2. Koyama T. Gaseous metabolism in lake sediments and paddy soils and the production of atmospheric methane and hydrogen // *Journal of Geophysical Research*. 1963. Vol. 68, Issue 13. P. 3971–3973. DOI: 10.1029/JZ068i013p03971.
3. Blecich P. Energy Potential of Digestate Produced by Anaerobic Digestion in Biogas Power Plants: The Case Study of Croatia // *Environmental Engineering Science*. 2018. Vol. 35, no. 12. P. 1286–1293. DOI: 10.1089/ees.2018.0123.
4. Васильев В. А., Романов И. Д., Романова Е. А., Романов А. Д. История развития подводных лодок с воздухомнезависимыми энергоустановками в России и СССР // *Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева*. 2012. № 4 (97). С. 192–201.
5. Кириллов Н. Г. Производство двигателя Стирлинга — новая отрасль в машиностроении XXI века // *Турбины и дизели*. 2010. № 2. С. 2–5.
6. Saunders S. *Jane's Fighting Ships 2011–2012*. Coudsdon: IHS Jane's, 2011. 947 p.
7. Карагусов В. И. Систематизация воздухомнезависимых теплоиспользующих низкотемпературных установок // *Вестник Международной академии холода*. 2015. № 1. С. 53–56.
8. Шалай В. В., Макушев Ю. П. Двигатель внешнего сгорания // *Омский научный вестник*. 2008. № 3 (70). С. 65–71.
9. Антонов С. Д., Стояров С. П. Конструктивные особенности нагревателя и элементов внешнего контура двигателя с внешним подводом теплоты // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2018. № 1 (383). С. 101–106. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-101-106.
10. Кукис В. С., Рыбалко А. И. К выбору максимальной температуры рабочего тела первичного двигателя утилизационной Стирлинг-электрической установки // *Вестник СибАДИ*. 2010. № 3 (17). С. 33–34.
11. Карагусов В. И. Воздухомнезависимые двигатели внешнего сгорания для судовых энергоустановок // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2016. № 1 (49). С. 50–55.
12. Уокер Г. Двигатели Стирлинга / пер. с англ. Б. В. Сутугина, Н. В. Сутугина. М.: Машиностроение, 1985. 405 с.
13. De Blok K. Low operating temperature integral thermoacoustic devices for solar cooling and waste heat recovery // *Acoustic-2008: Intern. conf. Paris, 2008*. P. 18–24.
14. Tyatyushkin N. V., Karagusov V. I., Baranov E. D., Karagusova E. E. Mathematical model of pulse-tube micro-coolers // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2003. Vol. 39, Issue 1-2. P. 87–91. DOI: 10.1023/A:10237590.
15. Матрунчик А. С. Использование двигателя внешнего сгорания для выработки электрической энергии // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016. № 6-2 (48). С. 108–110. DOI: 10.18454/IRJ.2016.48.039.
16. Кузнецов М. Д. Особенности двигателей внешнего сгорания — двигателей Стирлинга // *Записки горного института*. 2012. Т. 196. С. 252–255.
17. Swift G. W. Thermoacoustics — A unifying perspective for some engines and refrigerators // *Acoustical Society of America*. Melville, NY, 2002. 315 p. DOI: 10.1007/978-3-319-66933-5.
18. Зиновьев Е. А., Довгялло А. И. Упрощенная методика расчёта термоакустического двигателя // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (Национального исследовательского университета)*. 2012. № 3-3 (34). С. 206–212.

КАРАГУСОВ Владимир Иванович, доктор технических наук, старший научный сотрудник (Россия), профессор кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология».
 SPIN-код: 7624-3122
 AuthorID (РИНЦ): 176942
 ORCID: 0000-0002-7268-649X
 Адрес для переписки: karvi@mail.ru

Для цитирования

Карагусов В. И. Анаэробные тепловые двигатели внешнего сгорания // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2019. Т. 3, № 2. С. 135–142. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-135-142.

Статья поступила в редакцию 23.04.2019 г.
 © В. И. Карагусов

ANAEROBIC EXTERNAL COMBUSTION THERMAL ENGINES

V. I. Karagusov

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

Anaerobic engines are air-independent engines used in rocket and space technology, in submarines and in regular public service facilities. In rocket and space technology, liquid and solid rocket and jet engines are used. In open and underwater facilities, anaerobic nuclear-powered engines are used, as well as diesel engines with internal combustion with fuel reserves and oxidizing agents, often in cryogenic form. Internal combustion engines with all their advantages have several disadvantages. External combustion engines based on pulsation pipes and thermoacoustic effect are promising for orbital, rocket, underwater onboard and autonomous power plants. They may lack mechanical parts and assemblies, which determines long life, high reliability, minimal noise and vibrations. To operate such engines can use any fuel, they practically do not require maintenance.

Keywords: anaerobic power plants, onboard systems, Stirling engine, pulse tube, thermo-acoustic systems.

References

1. Generating energy from waste, including anaerobic digestion // GOV.UK. URL: <https://www.gov.uk/guidance/generating-energy-from-waste-including-anaerobic-digestion> (accessed: 06.04.2019). (In Engl.).
2. Koyama T. Gaseous metabolism in lake sediments and paddy soils and the production of atmospheric methane and hydrogen // *Journal of Geophysical Research*. 1963. Vol. 68, Issue 13. P. 3971–3973. DOI: 10.1029/JZ068i013p03971. (In Engl.).
3. Blecich P. Energy Potential of Digestate Produced by Anaerobic Digestion in Biogas Power Plants: The Case Study of Croatia // *Environmental Engineering Science*. 2018. Vol. 35, no. 12. P. 1286–1293. DOI: 10.1089/ees.2018.0123. (In Engl.).
4. Vasil'yev V. A., Romanov I. D., Romanova E. A., Romanov A. D. Istoriya razvitiya podvodnykh lodok s vozdukhonezavisimymi energoustanovkami v Rossii i SSSR [History of development of submarines with airindependent power installations in Russia and the USSR] // *Trudy NGTU im. R. E. Alekseyeva. Trudy NGTU im. R. E. Alekseyeva*. 2012. No. 4 (97). P. 192–201. (In Russ.).
5. Kirillov N. G. Proizvodstvo dvigatelya Stirlinga — novaya otrasl' v mashinostroyenii XXI veka [Production of the Stirling engine — a new branch in the engineering industry of the XXI century] // *Turbiny i dizeli. Turbines & Diesels*. 2010. No. 2. P. 2–5. (In Russ.).
6. Saunders S. *Jane's Fighting Ships 2011–2012*. Coulson: IHS Jane's, 2011. 947 p. (In Engl.).
7. Karagusov V. I. Sistematizatsiya vozdukhonezavisimyykh teploispol'zuyushchikh nizkotemperaturnyykh ustanovok [Systematization of airindependent low-temperature combustion installations] // *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. Journal of International Academy of Refrigeration*. 2015. No. 1. P. 53–56. (In Russ.).
8. Shalay V. V., Makushev Yu. P. Dvigatel' vneshnego sgoraniya [External combustion engine] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2008. No. 3 (70). P. 65–71. (In Russ.).
9. Antonov S. D., Stolyarov S. P. Konstruktivnyye osobennosti nagrevatelya i elementov vneshnego kontura dvigatelya s vneshnim podvodom teploty [Design peculiarities of heater and external circuit elements for the engine with external heat input] // *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra. Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2018. No. 1 (383). P. 101–106. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-101-106. (In Russ.).
10. Kukis V. S., Rybalko A. I. K vyboru maksimal'noy temperatury rabocheho tela pervichnogo dvigatelya utilitatsionnoy Stirling-elektricheskoy ustanovki [To the choice of the maximum temperature of the working medium of the primary engine of the utilization of the Stirling-electric installation] // *Vestnik SibADI. The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2010. No. 3 (17). P. 33–34. (In Russ.).
11. Karagusov V. I. Vozdukhonezavisimyye dvigateli vneshnego sgoraniya dlya sudovykh energoustanovok [The airindependent external combustion engines for ship power plants] // *Transport na al'ternativnom toplive. Alternative Fuel Transport*. 2016. No. 1 (49). P. 50–55. (In Russ.).
12. Walker G. Dvigateli Stirlinga [Stirling engines] / trans. from Engl. B. V. Sutugin, N. V. Sutugin. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1985. 405 p. (In Russ.).
13. De Blok K. Low operating temperature integral thermo acoustic devices for solar cooling and waste heat recovery // *Acoustic-2008: Intern. conf. Paris, 2008*. P. 18–24. (In Engl.).
14. Tyatyushkin N. V., Karagusov V. I., Baranov E. D., Karagusova E. E. Mathematical model of pulse-tube micro-coolers // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2003. Vol. 39, Issue 1-2. P. 87–91. DOI: 10.1023/A:10237590. (In Engl.).
15. Matrunchik A. S. Ispol'zovaniye dvigatelya vneshnego sgoraniya dlya vyrabotki elektricheskoy energii [External heat engine using for electrical production] // *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. International Research Journal*. 2016. No. 6-2 (48). P. 108–110. DOI: 10.18454/IRJ.2016.48.039. (In Russ.).
16. Kuznetsov M. D. Osobennosti dvigateley vneshnego sgoraniya — dvigateley Stirlinga [Features of external combustion engines — Stirling engines] // *Zapiski gornogo instituta. Journal of Mining Institute*. 2012. Vol. 196. P. 252–255. (In Russ.).

17. Swift G. W. Thermoacoustics — A unifying perspective for some engines and refrigerators // Acoustical Society of America. Melville, NY, 2002. 315 p. DOI: 10.1007/978-3-319-66933-5. (In Engl.).

18. Zinov'yev E. A., Dovgyallo A. I. Uproshchennaya metodika rascheta termoakusticheskogo dvigatelya [A simplified method of thermo acoustic engine analysis] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S. P. Koroleva (Natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta). *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2012. No. 3-3 (34). P. 206–212. (In Russ.).

KARAGUSOV Vladimir Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor of

Refrigeration and Compressor Engineering and Technology Department.

SPIN-code: 7624-3122

AuthorID (RSCI): 176942

ORCID: 0000-0002-7268-649X

Address for correspondence: karvi@mail.ru

For citations

Karagusov V. I. Anaerobic external combustion thermal engines // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2019. Vol. 3, no. 2. P. 135–142. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-135-142.

Received 23 April 2019.

© V. I. Karagusov