

УДК 621.5

Систематизация воздухонезависимых теплоиспользующих низкотемпературных установок

Д-р техн. наук В. И. КАРАГУСОВ
karvi@mail.ru

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

Воздухонезависимыми установками могут быть не только классические системы, работающие с запасом газообразного или жидкого воздуха или кислорода, но и системы, работающие от альтернативных источников энергии, не требующих кислорода. В теплоиспользующих низкотемпературных установках в качестве подводящей энергии используется, как правило, не электрическая энергия, а тепловая. Разработка воздухонезависимых теплоиспользующих низкотемпературных установок может быть основана на различных термодинамических циклах, на различных источниках энергии, на различных типах низкотемпературных машин для различных областей применения. Для правильного выбора таких установок необходимо провести их систематизацию. Воздухонезависимые теплоиспользующие низкотемпературные установки на базе пульсационной трубы и термоакустики являются наиболее перспективными для космического и водного транспорта. В них могут отсутствовать механически подвижные детали и узлы, что определяет длительный ресурс, высокую надежность, минимальные шумы и вибрации. Для работы такие установки могут использовать любую энергию, не требуют обслуживания.

Ключевые слова: воздухонезависимые, низкотемпературные установки, транспорт, двигатели Стирлинга, пульсационная труба, термоакустика, ресурс, шумы.

Systematization of airindependent low-temperature combustion installations

D. Sc. V. I. KARAGUSOV
karvi@mail.ru
Omsk State Technical University
644050, Russia, Omsk, pr. Mira, 11

Airindependent installations are not only the classical system operating with the supply of gaseous or liquid air or oxygen, but the system working from alternative energy sources that do not require oxygen. In low-temperature combustion installations not the electric energy but heat is used, as a rule, as an energy supply source. Development of airindependent low-temperature combustion installations can be based on several thermodynamic cycles, on different energy sources, different types of low-temperature machines for various applications. For the correct choice of such installations their systematization should be done. Airindependent low-temperature combustion installations based on pulse tubes and thermoacoustics are the most promising ones for space and water transport. They could have no mechanically moving parts and components that ensures their long operating life, high reliability, minimal noise and vibration. For such installations any kind of energy may be used, they does not require maintenance.

Keywords: airindependent, low-temperature installations, transport, Stirling engines, pulse tube, thermoacoustics, operating life, noise.

В теплоиспользующих низкотемпературных установках в качестве подводящей энергии используется, как правило, не электрическая энергия, а тепловая. Такие холодильные и криогенные установки применяются в случаях отсутствия или дефицита электрической и наличия тепловой энергии [1]. Тепловая энергия в них преобразуется в механическую или электрическую энергию, которая затрачивается на производство холода.

Воздухонезависимыми (анаэробными) установками принято называть такие, которые не используют атмосферный воздух [2]. В широком смысле, под воздухонезависимыми установками 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.

К воздухонезависимым следует отнести транспортные и стационарные системы: установки с запасами воздуха и кислорода; электрохимические энергоустановки, топливные элементы, термомеханические установки замкнутого цикла; орбитальные и наземные энергоустановки с питанием от солнечной и ядерной энергии, энергии холода космического пространства или других источников холода. При использовании источников холода объекты криостатируются на более низком температурном уровне, чем у источника холода.

На рис. 1 показана систематизация воздухонезависимых теплоиспользующих низкотемпературных установок (ВТНУ) по областям применения.

Для питания транспортных ВТНУ на флоте наибольшее распространение получили атомные энергоблоки, в космосе — солнечные батареи. При всех достоинствах этих энергоустановок они имеют целый ряд недостатков,

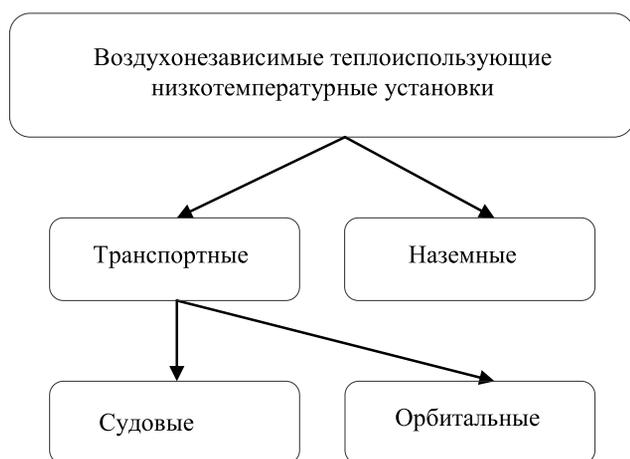


Рис. 1. Систематизация ВТНУ по областям применения

таких как большие масса и габариты, сложности обеспечения безопасности (для атомных реакторов), низкий КПД (для солнечных батарей) и другие. Для целей охлаждения могут использоваться практически любые источники энергии [1].

На рис. 2 показана систематизация ВТНУ по типу подводимой энергии.

ВТНУ могут быть построены по четырем подходам:

- теплота подводится к термомеханической системе, состоящей из двигателя, который вращает вал криогенной или холодильной машины;
- энергия (например, солнечная) преобразуется в электрическую, которая питает электродвигатель криогенной или холодильной машины;
- энергия (например, химическая) преобразуется в электрическую, которая подводится к электронагревателю теплоиспользующей газовой криогенной машины;
- источник холода охлаждает промежуточную головку цилиндра теплоиспользующей газовой криогенной машины.

В настоящее время ряд стран занимается разработкой анаэробных энергоустановок для водного транспорта на базе дизельных и парогенераторных систем за-

мкнутого цикла, электрохимических систем, топливных элементов и двигателей внешнего сгорания, работающих по циклу Стирлинга или циклам, близким к нему [3].

Двигатели внешнего сгорания имеют ряд преимуществ перед двигателями внутреннего сгорания. В наибольшей степени эти преимущества могут быть реализованы в судовых и орбитальных энергоустановках [4, 5]. Основное преимущество двигателей внешнего сгорания — возможность использования в них как традиционных топлив (бензин, дизельное топливо), так и альтернативных (природный газ, спирты, солнечная, ядерная энергии, эксергия холода и пр.) [6, 7]. Другими преимуществами двигателей внешнего сгорания (за исключением паровых) является значительно более низкие уровни шумов и вибраций этих двигателей [1, 2].

Единственным воздухонезависимым двигателем внешнего сгорания, который использовался и используется в транспортных (судовых) энергоустановках (паровой двигатель здесь не рассматривается), является двигатель Стирлинга, который относится к термомеханическим системам [8].

Создание ВТНУ на базе двигателей Стирлинга (такие установки называют теплоиспользующими газовыми криогенными машинами Вюлемье с использованием нагрева и Такониса с использованием холода, которые состоят из двух машин в одном корпусе: двигателя Стирлинга, работающего по прямому циклу Стирлинга и газовой криогенной машины Стирлинга, работающей по обратному циклу Стирлинга [1]) требует решения целого ряда технических и технологических задач, которые в настоящее время решены только частично.

При всех положительных свойствах ВТНУ на базе двигателя Стирлинга он обладает и рядом недостатков, таких как сравнительно большие масса, габариты, инерционность, малый ресурс, сложность регулирования. Серьезными проблемами, сдерживающими создание ВТНУ на базе двигателей Стирлинга, являются конструктивные и материаловедческие.

Для реализации ВТНУ можно использовать не только цикл Стирлинга, но и целый ряд других. На рис. 3



Рис. 2. Систематизация ВТНУ по типу подводимой энергии

приведена систематизация ВТНУ по термодинамическим циклам.

Цикл Карно, несмотря на то, что он является идеальным и эталонным, в реальных ВТНУ не используется из-за ряда технических сложностей. С другой стороны, идеальные циклы Стирлинга и Эриксона при сравнительно более простой реализации имеют такой же термодинамический КПД, как и у идеального цикла Карно [1]:

$$\eta_{\text{Карно}} = \eta_{\text{Стирлинга}} = \eta_{\text{Эриксона}} = 1$$

Необходимо отметить, что в реальных машинах невозможно реализовать идеальные циклы из-за ограничений, накладываемых теплообменом, гидравликой, механическими потерями и пр. В итоге в любой ВТНУ реализуется промежуточный цикл, который на T - s - и p - V -диаграммах напоминает овал или эллипс в отличие от идеальных прямоугольника или параллелограмма [9].

С точки зрения термодинамики существуют еще два вида систем, перспективных для создания

ВТНУ: пульсационная труба и термоакустические системы [10, 11, 12].

Если проследить развитие схмотехники ВТНУ, то следует отметить следующий ряд (рис. 4): термомеханический двигатель замкнутого цикла и холодильная машина; интегральные машины Вюлемье, имеющие жесткий привод поршней, например, через коленчатый вал [8]; машины Вюлемье с газовым приводом одного или двух из поршней — вытеснителей [8]; пульсационная труба только с одним поршнем [10, 11]; термоакустические системы, которые могут выполнены вообще без поршней и подвижных деталей [6].

Для достижения у ВТНУ таких параметров как высокие ресурс, надежность, КПД и низкие шумы, вибрации, крутящие моменты, периодичность регламентных работ минимизация механически подвижных деталей и узлов имеет первостепенное значение.

Из ВТНУ, показанных на рис. 4, наибольшую перспективу представляют пульсационная труба и термоакустические системы. В пульсационной трубе единственный свободный поршень может объединен с ротором линейного электрогенератора или с поршнем охладителя, в термоакустической системе энергия акустической волны может вырабатывать электричество для целей электрообеспечения или холод для кондиционирования, реконденсации криогенных жидкостей и охлаждения оптико-электронных приборов. Расчетные и экспериментальные исследования показывают, что машины на базе пульсационной трубы и термоакустики по КПД не уступают машинам Стирлинга, а по ряду других параметров превосходят их [13].

В отличие от машин Стирлинга в пульсационной трубе и термоакустической системе в «горячих» зонах отсутствуют поршни, отсутствует трение, следовательно, не требуется смазка (в том числе и сухая), нет влияния вредных (мертвых) объемов — нет препятствий для развития внутренних теплообменных поверхностей, что позволяет значительно улучшить массо-габаритные характеристики.

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

В заключение следует отметить, что ВТНУ на базе пульсационной трубы и термоакустики заметно проще по конструкции, имеют меньшую себестоимость, чем двигатель Стирлинга, проще в обслуживании, имеют больший ресурс, меньшие массу и габариты.

Список литературы

1. Карагузов В. И., Карагузова Н. В. Установки и системы микрокриогенной техники // Учебное пособие. — Омск. Изд-во ОмГТУ, 2010. 88 с.
2. Васильев В. А., Романов И. Д., Романова Е. А., Романов А. Д. История развития подводных лодок с воздухо-независимыми энергоустановками в России и СССР // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2012. №4. с. 192–201.
3. Кириллов Н. Г. Производство двигателя Стирлинга — новая отрасль в машиностроении XXI века // Турбины и дизели. 2010. №2. с. 2–5.

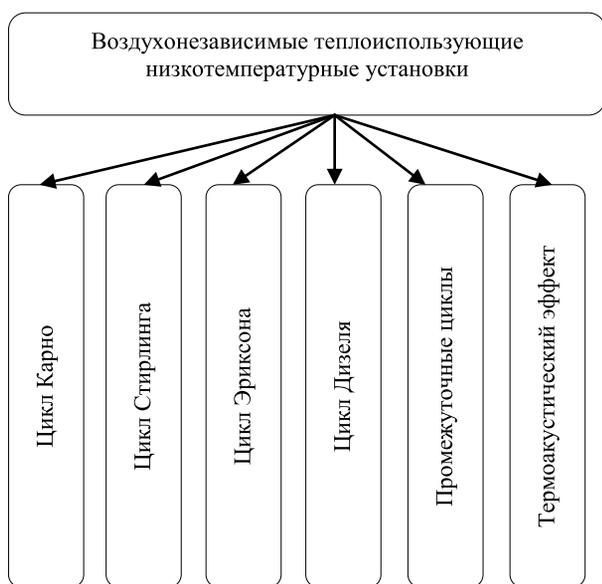


Рис. 3. Систематизация ВТНУ по термодинамическим циклам



Рис. 4. Систематизация ВТНУ по типу машин

4. Карагузов В. И. Магнитокалорические двигатели внешнего сгорания на речных судах // Транспорт на альтернативном топливе. 2011. №2. с. 38–41.
5. Карагузов В. И. Комбинированная магнитокалорическая силовая установка на речных судах // Транспорт на альтернативном топливе. 2011. №3. с. 37–38.
6. Карагузов В. И. Реконденсация паров СПГ на речном транспорте // Транспорт на альтернативном топливе. 2013. №1. С. 11–12.
7. Карагузов В. И., Мальцев П. С. Бортовой термоакустический кондиционер на природном газе // Транспорт на альтернативном топливе. 2011. №4. с. 45–47.
8. Уокер Г. Двигатели Стирлинга // М.: Машиностроение, 1985. 408 с.
9. Карагузов В. И. Термодинамические циклы в редкоземельных рабочих телах магнитных систем охлаждения // Вестник Международной академии холода. 1999. №3. с. 20–23.
10. Шахметов Е. Б., Липин М. В., Карагузов В. И. Разработка одноступенчатого микроохладителя на базе пульсационной трубы холодопроизводительностью 4 Вт на температурный уровень 80 К // Россия молодая: технологии — в промышленности. 2013. №2. с. 357–360.
11. Tyatyushkin N. V., Karaguzov V. I., Baranov E. D., Karaguzova E. E. Mathematical model of pulse-tube microcoolers // Chemical and Petroleum Engineering. 2003. Vol. 39. Issue 1–2. P. 87–91.
12. Карагузов В. И., Юша В. Л., Карагузов И. В. Термоакустический оживитель природного газа для заправки речных судов // Транспорт на альтернативном топливе. 2013. №2. с. 66–68.
13. Карагузов В. И., Тятюшкин Н. В., Карагузов И. В. Математическое моделирование и расчетные исследования термоакустической системы охлаждения // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2014. №2. с. 2–6.
2. Vasil'ev V. A., Romanov I. D., Romanova E. A., Romanov A. D. History of development of submarines with airindependent power installations in Russia and the USSR. *Trudy NGTU im. R. E. Alekseeva*. 2012. No 4. pp. 192–201. (in Russian)
3. Kirillov N. G. Production of the engine of Stirlinga — new branch in mechanical engineering of the XXI century. *Turbiny i dizeli*. 2010. No 2. pp. 2–5. (in Russian)
4. Karaguzov V. I. Magnetocaloric engines of external combustion on river crafts. *Transport na al'ternativnom toplive*. 2011. No 2. pp. 38–41. (in Russian)
5. Karaguzov V. I. The combined magnetocaloric power plant on river crafts. *Transport na al'ternativnom toplive*. 2011. No 3. pp. 37–38. (in Russian)
6. Karaguzov V. I. Rekondensation of LNG vapors on river transport. *Transport na al'ternativnom toplive*. 2013. No 1. pp. 11–12. (in Russian)
7. Karaguzov V. I., Mal'cev P. S. The onboard thermoacoustic air conditioner on natural gas. *Transport na al'ternativnom toplive*. 2011. No 4. pp. 45–47. (in Russian)
8. Uoker G. Engines of Stirlinga. Moscow. 1985. 408 P. (in Russian)
9. Karaguzov V. I. Thermodynamic cycles in rare-earth working bodies of magnetic cooling systems. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 1999. No 3. pp. 20–23. (in Russian)
10. Shahmetov E. B., Lipin M. V., Karaguzov V. I. Development of the one-step microcooler on the basis of the pulsation pipe with a refrigerating capacity of 4 W on temperature level 80 K. *Rossija molodaja: tehnologii — v promyshlennost'*. 2013. No 2. pp. 357–360. (in Russian)
11. Tyatyushkin N. V., Karaguzov V. I., Baranov E. D., Karaguzova E. E. Mathematical model of pulse-tube microcoolers. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2003. Vol. 39. Issue 1–2. P. 87–91.
12. Karaguzov V. I., Yusha V. L., Karaguzov I. V. Thermoacoustic liquefier of natural gas for priming of river crafts. *Transport na al'ternativnom toplive*. 2013. No 2. pp. 66–68. (in Russian)
13. Karaguzov V. I., Tyatyushkin N. V., Karaguzov I. V. Mathematical simulation and estimated researches of the thermoloudspeaker system of cooling. *Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*. 2014. No 2. pp. 2–6. (in Russian)

References

1. Karaguzov V. I., Karaguzova N. V. Installations and systems of microcryogenic technique. Manual. — Omsk. Izd-vo OmGTU. 2010. P. 88. (in Russian)



РосБиоТех-2015

9-й международный биотехнологический форум-выставка

28-30 октября 2015

www.rosbiotech.com

Москва, ЦВК «Экспоцентр»

Тел./факс: +7 (495) 609-40-35,
+7 (499) 604-10-75

E-mail: info@rosbiotech.com

Тематика выставки:

- медицинская биотехнология; промышленная биотехнология;
- биоэнергетика; биотопливо; экологическая безопасность;
- сельскохозяйственная и пищевая биотехнология;
- морская биотехнология; лесная биотехнология;
- природо-охранная (экологическая) биотехнология;
- зеленая экономика – качество жизни и активное долголетие.