

## К вопросу о разработке энергохолодильной системы для режима полной изоляции специального фортификационного сооружения

В.А. Вакуненко<sup>1</sup>, А.С. Давиденко<sup>2</sup>, Н.Г. Кириллов<sup>1</sup>, А.Н. Ключев<sup>1</sup>,  
В.В. Петров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Военный институт (инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург

**Аннотация:** Рассмотрены типы автономных стационарных энергохолодильных систем, предназначенных для режима полной изоляции специальных объектов, функционирующих без связи с атмосферой. Предложено техническое решение, позволяющее повысить эффективность энергохолодильной системы, снизить расход технической воды за счет ее частичной рециркуляции для охлаждения двигателя автономной электростанции, а также увеличения срока режима полной изоляции объекта.

**Ключевые слова:** энергохолодильная система, подземный объект, военная инфраструктура, режим полной изоляции.

Все более популярным техническим решением для специальных защищённых объектов, функционирующих без связи с атмосферой, становятся автономные энергохолодильные системы стационарного типа, представляющие собой объединение двигателя и холодильной машины. Наиболее часто эти системы создаются на основе различных преобразователей, в которых двигатель служит для получения электрической энергии, а холодильная машина – для получения холода [1]. Для их нормальной работы требуется отводить избыточную тепловую энергию, однако, так как связь с атмосферой отсутствует, низкопотенциальное тепло следует аккумулировать и складировать внутри объекта. По этой причине охлаждение преобразователей осуществляется водой, при температуре + 4°C, что требует создания хранилищ с большим объёмом холодной воды и воды, аккумулировавшей тепло от холодильной машины и двигателя. При этом установлено, что срок режима полной изоляции зависит, прежде всего, от объёма запасенного теплоаккумулирующего вещества [2].

В наши дни известность приобрели принципиальные схемы энергохолодильной системы для специального подземного сооружения,

содержащая автономную электростанцию на основе дизеля замкнутого цикла на синтез-газе и холодильной машины (машины Вюлемье-Такониса), работающей за счёт отработавших газов двигателя. Однако, работа дизеля на синтез-газе с внешним смесеобразованием приводит к снижению коэффициента полезного действия [2].

Существует способ функционирования двигателя внутреннего сгорания (ДВС), работающего в режиме рециркуляции отработавших газов, в котором отработавшие газы охлаждаются и в полном объёме подвергаются мокрой очистке с последующим разделением на два потока. Один из них компримируют, дополнительно осушают и обеспечивают его контактный теплообмен с жидким кислородом с получением газообразного кислорода и вымораживанием фракций воды и диоксида углерода. Полученную охлажденную кислородом газовую смесь соединяют со вторым осушенным потоком отработавших газов с получением охлажденной искусственной газовой смеси, которую дополнительно подогревают перед подачей в ДВС, а образующиеся твердые фракции воды и диоксида углерода периодически выводят [3].

Главным недостатком этого способа являются высокие энергозатраты, связанные с процессом сублимации и десублимации  $\text{CO}_2$ , требующие необходимости двух переключающихся аппаратов вымораживания для осуществления данного способа, что существенно усложняет эксплуатацию и дестабилизирует работу ДВС в процессе переключения указанных аппаратов.

Многие из перечисленных ранее проблем нашли своё решение в энергохолодильной системе для специальных сооружений, функционирующих без связи с атмосферой, содержащей автономную электростанцию (двигатель, в виде дизеля замкнутого цикла и электрогенератор), холодильную машину, ёмкость с горючим, линию подачи горючего в двигатель, ёмкость с окислителем и линию его подачи в

---

двигатель, хранилище холодной технической воды, хранилище нагретой технической воды. Техническая вода из хранилища холодной технической воды подаётся по трубопроводам последовательно для охлаждения холодильной машины и двигателя электростанции, а после охлаждения, по трубопроводу сливается в хранилище нагретой технической воды [4].

Однако, данное техническое решение имеет сложное технологическое и взрывоопасное оборудование с применением щелочноземельного металла для создания искусственной газовой среды с использованием отработанных газов дизеля замкнутого цикла, а также неэффективное регулирование расхода технической воды для охлаждения двигателя автономной электростанции при изменении его мощности вследствие жесткой связи трубопровода технической воды между системами охлаждения холодильной машины и двигателя автономной электростанции [5].

Авторами статьи разработана энергохолодильная система для режима полной изоляции подземного сооружения. Она состоит из автономной электростанции, холодильной машины, ёмкости с горючим и линией его подачи в двигатель, ёмкости с окислителем и линией его подачи в двигатель, хранилища холодной технической воды, хранилища нагретой технической воды. Следует отметить, что техническая вода из хранилища холодной технической воды подаётся по трубопроводам последовательно для охлаждения холодильной машины и двигателя, а после охлаждения, по трубопроводу сливается в хранилище нагретой технической воды. Также система снабжена смесевой ёмкостью для хранения утепленной воды, линиями подачи и слива (воды, сухого нейтрализующего вещества и окислителя), контактным теплообменником. В качестве сухого нейтрализующего вещества используется карбамид, а окислителя – кислород, находящийся в сжатом или жидком состоянии.

Описанная система функционирует следующим образом.

---

В повседневном режиме эксплуатации специального сооружения все системы жизнеобеспечения и технологическое оборудование работают за счет электроснабжения от внешней централизованной сети.

При применении вероятным противником высокоточного оружия, внешнее электроснабжение и подача атмосферного воздуха в специальное сооружение может быть прекращено из-за разрушений вокруг сооружения [6]. В этом случае специальное фортификационное сооружение начинает работать без связи с атмосферным воздухом за счет энергохолодильной системы (то есть в режиме полной изоляции), и запасов материальных сред (горючего, окислителя и технической воды), заблаговременно запасенных внутри него [7].

В режиме полной изоляции энергоснабжение специального сооружения обеспечивается работой двигателя автономной электростанции.

Для обеспечения работы двигателя в него подаются окислитель (в виде кислорода) и горючее.

В режиме полной изоляции термостатирование специального сооружения обеспечивается работой холодильной машины, связанной с системой кондиционирования воздуха.

Для нормального функционирования холодильной машины по линии подачи воды циркуляционным насосом обеспечивается подача холодной технической воды из хранилища чистой холодной технической воды в конденсатор холодильной машины.

После охлаждения холодильной машины нагретая вода до температуры 25- 30 °С по линиям слива нагретой воды из холодильной машины поступает в смесевую емкость для хранения утепленной воды [8].

Для нормального функционирования двигателя по линиям подачи охлаждающей воды с циркуляционным насосом из смесевой емкости в двигатель автономной электростанции подается вода для его охлаждения,

---

которая, нагревшись до температуры 80-85 °С, затем частично возвращается в смесевую емкость для хранения утепленной воды. Остальная нагретая охлаждающая вода поступает последовательно в емкость-дозатор и контактный теплообменник.

Таким образом, наличие смесевой емкости для хранения утепленной воды и ее связь с холодильной машиной и двигателем по охлаждающей воде, дает возможность использования воды, идущей первоначально на охлаждение холодильной машины, в дальнейшем для охлаждения двигателя. Данное обстоятельство обусловлено тем, что в конденсаторе холодильной машины, согласно второго закона термодинамики, охлаждающая техническая вода нагревается до температуры не более 30 °С, а в двигатель автономной электростанции (например, дизель) охлаждающая вода может подаваться с температурой от 40 до 80 °С, то есть имеется возможность использования холодильного потенциала воды после охлаждения холодильной машины в смеси с некоторой частью нагретой охлаждающей воды от двигателя.

Такая схема рециркуляции нагретой охлаждающей двигатель воды за счет возвращения ее части в смесительную емкость, обеспечивает снижение расхода заранее запасенной технической воды в хранилище холодной технической воды для охлаждения двигателя автономной электростанции и, как следствие, увеличение срока режима полной изоляции специального фортификационного сооружения.

Контактный теплообменник предназначен для очистки отработанных газов двигателя автономной электростанции водным нейтрализующим раствором. Для получения водного нейтрализующего раствора из емкости для хранения сухого нейтрализующего вещества, карбамид подается в емкость-дозатор, туда же поступает нагретая охлаждающая вода по линии подачи нагретой охлаждающей воды от двигателя автономной

---

электростанции с расположенным на ней регулируемым вентилем. В емкости-дозаторе в зависимости от количества подаваемого карбамида и его смешения с нагретой водой, готовится водный нейтрализующий раствор необходимой концентрации. Затем приготовленный водный нейтрализующий раствор по линии подачи водного раствора циркуляционным насосом подается из емкости-дозатора в контактный теплообменник.

Одновременно, в контактный теплообменник по линии подачи отработанных газов от двигателя автономной электростанции через теплообменный аппарат, где они охлаждаются до температуры 90-110 °С, поступают охлажденные отработанные газы. В контактном теплообменнике охлажденные отработанные газы вступают в контакт с водным нейтрализующим раствором карбамида, в результате которого происходит очистка отработанных газов от окислов углерода, азота, серы, сажи и других вредных компонентов, которые образуют с водным нейтрализующим раствором химически грязные жидкие соединения. Это позволяет использовать очищенные отработанные газы в качестве нейтральных компонентов к кислороду (окислителю).

Из контактного теплообменника выходит линия слива химически-грязного нейтрализующий раствора, по которой насосом производят сброс грязного раствора из контактного теплообменника в хранилище химически-грязного водного раствора, в качестве которого используется хранилище нагретой технической воды.

Очистка отработанных газов в контактном теплообменнике позволяет использовать очищенные отработанные газы в качестве добавки к окислителю (кислороду), для этого по линии подачи очищенных отработанных газов очищенные отработанные газы подаются, через теплообменный аппарат, где они нагреваются, в эжектор, установленный на

---

линии подачи окислителя в двигатель. За счет более высокого давления в емкости с окислителем (кислородом), эжектор обеспечивает подсос очищенных отработанных газов из газовой полости контактного теплообменника в линию подачи окислителя [9].

Нагрев отработанных газов, очищенных за счет контакта с водным нейтрализующим раствором карбамида и идущих по линии подачи очищенных отработанных газов из контактного теплообменника в линию подачи окислителя, за счет теплообмена в теплообменном аппарате, с отработанными газами, идущими от двигателя автономной электростанции по линии отработанных газов, обеспечивает повышение энергоэффективности двигателя и энергохолодильной системы.

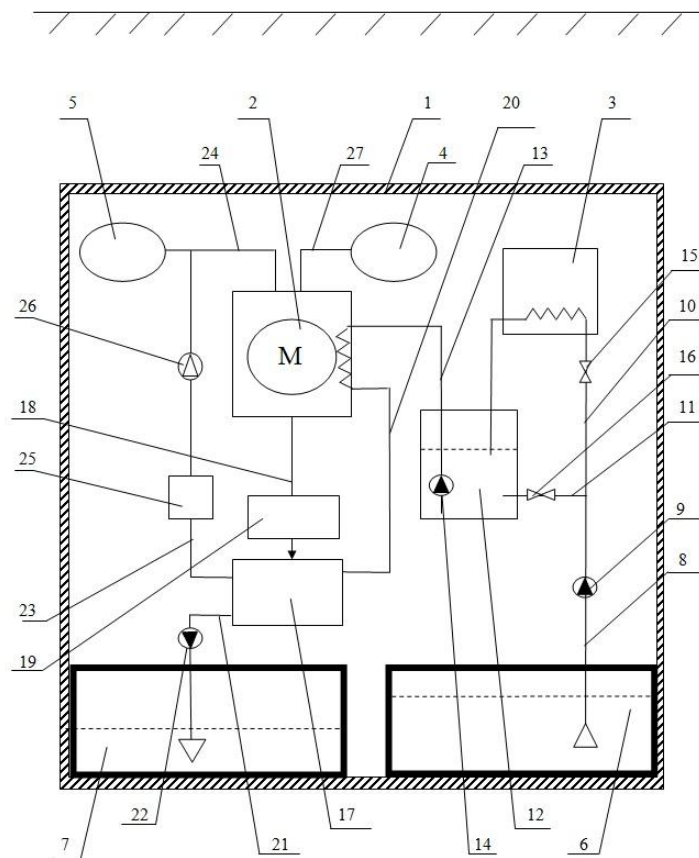


Рисунок 1 – Техническое решение энергохолодильной системы для режима полной изоляции

Для обеспечения работы двигателя 2 автономной электростанции 2 в режиме полной изоляции, в двигатель 2 по линиям 23 и 25 подаются, соответственно, окислитель и горючие из емкостей 8 и 7, соответственно. В режиме полной изоляции термостатирование специального фортификационного сооружения 1 обеспечивается работой холодильной машины 3 и связанной с ней через контур теплоносителя 5 с насосом 6 системой кондиционирования воздуха 4.

Для нормального функционирования двигателя 2 и холодильной машины 3 по линии подачи воды 12 циркуляционным насосом 13 обеспечивается подача технической воды из емкости чистой холодной технической воды 10. Контактный теплообменник 18 предназначен для очистки отработанных газов двигателя 2 автономной электростанции технической водой. Для этого в контактный теплообменник 18 входит линия подачи отработанных газов 19 от двигателя 2 автономной электростанции и линия подачи нагретой технической воды 20 от двигателя 2 автономной электростанции.

Вывод: Введение в состав автономной энергохолодильной системы подземного сооружения, подобного хранилища технической воды, позволяет обеспечить повышение энергоэффективности двигателя и энергохолодильной системы в целом [10], а также рециркуляции нагретой охлаждающей двигатель воды за счет возвращения ее части в смесительную емкость, что обеспечивает снижение расхода заранее запасенной технической воды для охлаждения двигателя автономной электростанции и, как следствие, увеличение срока режима полной изоляции специального сооружения.

### Литература

1. Архаров А.М., Марфенина И.В., Миркулин Е.И. Теория и расчет криогенных систем. – М.: Машиностроение, 1978, с. 305.
-



2. Гришутин М.М., Севастьянов А.П. Теория и методы расчетов автономных энергохолодильных установок. М.: Изд. МЭИ, 1992. - 240 с.
3. Солдатов В.А. Термодинамический анализ параметров изолированной энергосистемы с минимальным потреблением хладагента на основе газотурбинной схемы преобразования энергии. М., 1988 – С.25-37.
4. Батырев А.Н., Кошеверов В.Д., Лейкин О.Ю. Корабельные ядерные энергетические установки зарубежных стран. СПб, "Судостроение", 1994. – с. 216-217.
5. Вакуненко В.А., Плоцкий П.В. Методика расчета снижения стоимости строительства и эксплуатации хранилищ теплоаккумулирующего вещества специальных сооружений // Военный инженер. 2017. № 1 (3). С. 7-12.
6. Hariti Rafika, Fekih Malika, Saighi Mohamed. Numerical simulation of heat transfer by natural convection in a storage tank. - Laboratory of Thermodynamics and Energetically Systems LTSE, Physics Faculty, University of Science and Technology Houari Boumediene, U.S.T.H.B, Bab Ezzouar 16111, Algiers Algeria. 2013. Pp. 4-5.
7. Вакуненко В.А., Ключев А.Н., Петров В.В. О разработке системы автономного энергоснабжения объектов военной инфраструктуры с использованием сжиженного природного газа // Инженерный вестник Дона. 2020. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2020/6357/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2020/6357/).
8. Oludele Adeyefa, Oluleke Oluwole Finite Element Modelling of Insulation Thicknesses for Cryogenic Products in Spherical Storage Pressure Vessels. - Department of Mechanical Engineering, University of Ibadan, Ibadan, Nigeria. 2014. pp. 5-6.
9. Вакуненко В.А., Ершов Г.А., Петров В.В., Плоцкий П.В. К вопросу о снижении стоимости строительства хранилищ теплоаккумулирующего вещества за счёт использования холодильного

потенциала сжиженного природного газа // Инженерный вестник Дона, 2018, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4851/.

10. Саркисов С.В., Путилин П.А., Сорокин А.А. Комплексное решение по повышению энергоэффективности в системах жизнеобеспечения // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2019. №2 (50). С. 26-32.

### References

1. Arkharov A.M., Marfenina I.V., Mirkulin E.I. Teoriya i raschet kriogennykh system [Theory and calculation of cryogenic systems]. Moskva. 1978. 305 p.

2. Grishutin M.M., Sevast'yanov A.P. Teoriya i metody raschetov avtonomnykh energokholodil'nykh ustanovok [Theory and methods of calculations of Autonomous energy-cooling installations]. Moskva. MEI publishing House. 1992. 240 p.

3. Soldatov V.A. Termodinamicheskiiy analiz parametrov izolirovannoy energosistemy s minimal'nym potrebleniem khladagenta na osnove gazoturbinnoy skhemy preobrazovaniya energii [Thermodynamic analysis of parameters of an isolated power system with minimal refrigerant consumption based on a gas turbine energy conversion scheme]. Moskva. 1988. pp. 25-37.

4. Batyrev A.N., Kosheverov V.D., Leykin O.Yu. Korabel'nye yadernye energeticheskie ustanovki zarubezhnykh stran [Ship nuclear power installations of foreign countries] SPb. Sudostroenie. 1994. pp. 216-217.

5. Vakunenkov V.A., Plotskiy P.V. Voennyi inzhener. 2017. № 1 (3). pp. 7-12.

6. Hariti Rafika, Fekih Malika, Saighi Mohamed. Numerical simulation of heat transfer by natural convection in a storage tank. Laboratory of Thermodynamics and Energetically Systems LTSE, Physics Faculty, University of



Science and Technology Houari Boumediene, U.S.T.H.B, Bab Ezzouar 16111, Algiers Algeria. 2013. pp 4-5.

7. Vakunenkov V.A., Klyuchev A.N., Petrov V.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2020/6357/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2020/6357/).

8. Oludele Adeyefa, Oluleke Oluwole Finite Element Modelling of Insulation Thicknesses for Cryogenic Products in Spherical Storage Pressure Vessels. Department of Mechanical Engineering, University of Ibadan, Ibadan, Nigeria. 2014. pp. 5-6.

9. Vakunenkov V.A., Ershov G.A., Petrov V.V., Plotskiy P.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4851/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4851/).

10. Sarkisov S.V., Putilin P.A., Sorokin A.A. Problems of risk management in the technosphere. 2019. № 2 (50). pp. 26-32.