
УДК 629.78

Е.П. КУЗНЕЦОВА, студент гр. 2124-240405D (Самарский университет)

Научный руководитель Е.В. БЛАГИН, ст. преподаватель (Самарский университет)

г. Самара

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЗЫ ЗНАНИЙ WOLFRAMALPHA ДЛЯ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РАБОЧЕГО ТЕЛА В КОНТУРЕ
РАЗРЯДКИ КРИОГЕННОГО АККУМУЛЯТОРА ЭНЕРГИИ**

ВВЕДЕНИЕ

Существуют разные способы регазификации с выработкой энергии, они отличаются температурой подвода тепла и реализуемыми циклами. Циклы, в свою очередь, отличаются числом каскадов, далее рассмотрим некоторые из них. Например, одноступенчатые циклы Ренкина [1] и Стирлинга [2,3] с подводом тепла от окружающей среды. В публикациях [4,5] рассматриваются двухступенчатые и трехступенчатый [6] цикл Ренкина, с подводом тепла от окружающей среды. Далее представлены циклы, в которых используется вторичное тепло, например одноступенчатые циклы Брайтона и Эрикссона [7,8], а так же в статье [9] разобрана энергосистема с подводом тепла от горения топлива. В публикации [10] представлен одноступенчатый цикл Ренкина, с подводом тепла от Солнца. Производством и исследованием энергетических систем в настоящее время занимаются такие зарубежные фирмы, как «TohoGas», «OsakaGas», «Kyushu», «ChubuPower», «TouhokuPower», «TokyoGas», «TokyoPower», и отечественные ПАО «Газпром», ОАО «Криогенмаш», ОАО «Гелиймаш».

1 Описание рабочего процесса установок

Криогенное аккумулирование энергии (КАЭ) - это использование низкотемпературных (криогенных) жидкостей, таких как жидкий воздух или жидкий азот, для хранения энергии. Полученный таким образом аккумулятор энергии обладает высокой энергоемкостью за счёт высокой плотности жидкости и запасаания тепла фазового перехода в ней.

В общем случае, криогенный аккумулятор состоит из блока зарядки, который представляет собой установку по сжижению газа, блока хранения, который представляет собой емкость для хранения криогенного рабочего тела, и блока разрядки, который представляет собой регазификатор криопродукта. На рисунке 1 представлена общая схема криогенного аккумулятора, где ожижитель работает по циклу Гейландта, а газификатор – по циклу Ренкина с перегревом и конденсацией.

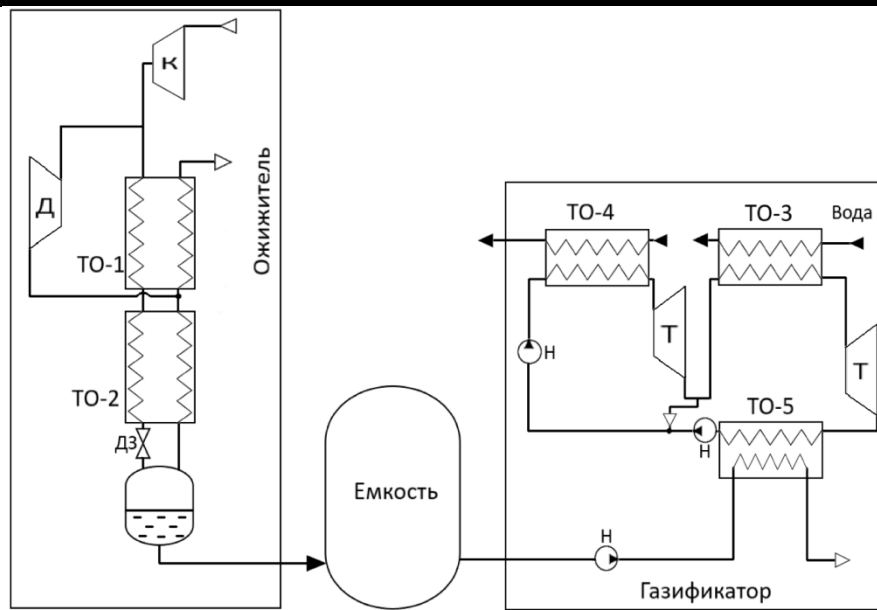


Рисунок 1 – Общая схема криогенного аккумулятора

Принцип работы криогенного аккумулятора: воздух попадает на компрессор, после чего поток разделяется: часть идет на детандер, часть – на теплообменник ТО1, где происходит подогрев рабочего тела. Далее, воздух в теплообменнике ТО2 подогревается еще сильнее и, проходя через дроссельную заслонку, попадает в сепаратор, после чего газ проходит обратно через ТО2 и ТО1 и выходит в атмосферу, а жидкий воздух попадает из ожежителя в емкость для хранения. Из емкости жидкое рабочее тело перекачивается насосом в газификатор. В теплообменнике-конденсаторе ТО5 воздух конденсируется и насосом перекачивается в теплообменник-испаритель ТО4, где подогревается водой из реки, после чего воздух попадает на турбину, где вырабатывается энергия, далее поток разделяется: около 30% газа попадает обратно в цикл для подогрева рабочего тела, а 70% - попадают на теплообменник-перегреватель ТО3, где происходит перегрев воздуха водой из реки. Далее перегретый воздух попадает на турбину, где вырабатывается энергия.

2 Подбор оптимального рабочего тела

Для регазификации сжиженного воздуха используется цикл Ренкина с хладагентом в качестве рабочего тела. Принципиальная схема данного цикла изображена на рисунке 2. В данном цикле рабочее тело – хладагент в жидком виде, накачивается насосом в теплообменник, где вода (или другой теплый теплоноситель) повышает температуру хладагента, тем самым превращая его в пар под высоким давлением, затем этот пар производит работу в детандере, после чего уже отработанный пар попадает в теплообменник с жидким воздухом, где охлаждает его и снова превращает в жидкость.

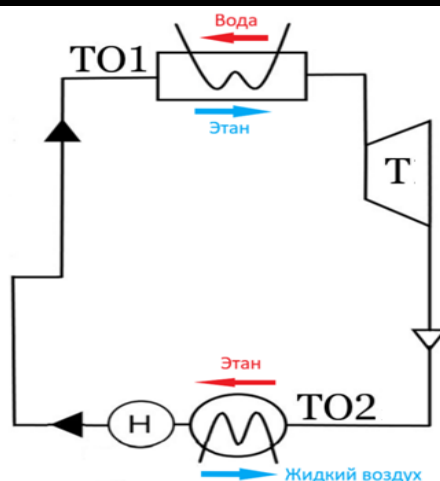


Рисунок 2 – Схема регазификатора по циклу Ренкина

Для подбора оптимального рабочего тела (хладагента) была написана программа расчета обычного цикла Ренкина на языке Python версии 3.8.2. Для запросов свойств веществ было использовано WolframAPI, а также модуль wolframalpha. В программе был произведен расчет цикла Ренкина для 7 веществ: азот, диоксид углерода, этан, метан, пропан, монооксид углерода, кислород. Свойства рассмотрен рабочих тел представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели рассматриваемых рабочих тел

	Критическая температура, К	Температура тройной точки, К	Молярная масса, кг/моль	Газовая постоянная, Дж/кг К	Теплота фазового перехода, Дж/кг
N ₂	420	63, 15	28·10 ⁻³	296,8	199000
C ₂ H ₆	305,4	90,37	30·10 ⁻³	277	2340000
CH ₄	190,6	90,69	16·10 ⁻³	519	511000
CO ₂	304	216,6	44·10 ⁻³	188,9	384000
CO	413	68,16	28·10 ⁻³	296,9	210000
C ₃ H ₈	370	85,53	44·10 ⁻³	189	447000
O ₂	154,6	54,36	32·10 ⁻³	259,8	213000

Исходные данные для расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Исходные данные

Температура жидкого воздуха T _{liq air} , К	78
Давление жидкого воздуха p _{liq air} , бар	1
Температура воды T ₀ , К	293
Минимальный температурный напор в теплообменниках dT _{min} , К	5
КПД насоса η _{pump}	0,92
КПД турбины η _{turb}	0,89

Ниже представлены уравнения для каждого из элементов схемы регазификатора по циклу Ренкина:

Уравнение теплового баланса для теплообменника ТО1:

$$G \cdot (h_4 - h_v) = G \cdot (h_1 - h_v); \quad (1)$$

Уравнение теплового баланса для теплообменника ТО2:

$$G \cdot (h_3 - h_{\text{спг}}) = G \cdot (h_2 - h_{\text{спг}}); \quad (2)$$

Уравнение работы для турбины:

$$L_{\text{турб}} = (h_1 - h_2) \cdot \eta_{\text{турб}}; \quad (3)$$

Уравнение работы для насоса Н:

$$L_{\text{н}} = \frac{p_4 - p_3}{\rho_3 \cdot \eta} \quad (4)$$

По результатам моделирования была построена зависимость вырабатываемой мощности от повышения давления для различных рабочих тел (рисунок 3).

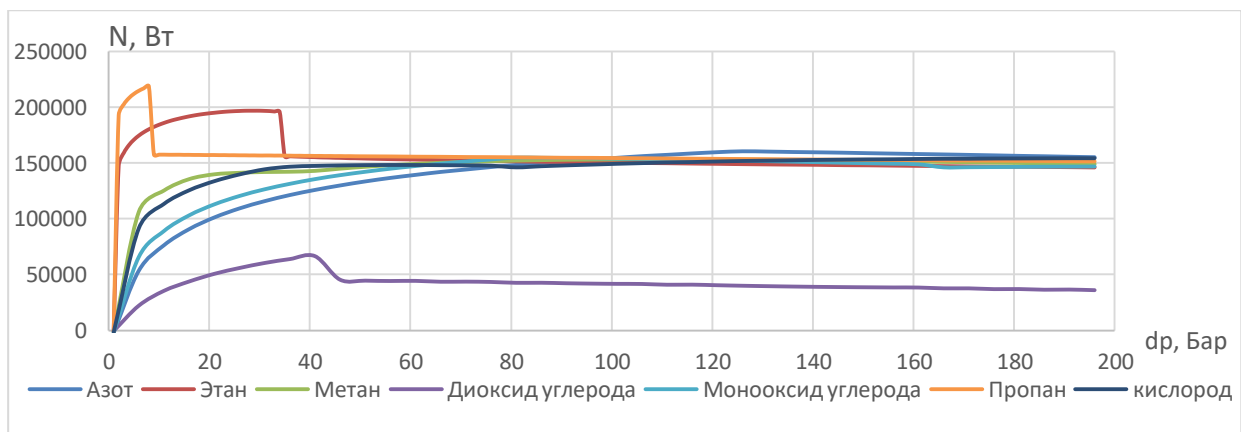


Рисунок 3 – График зависимости мощности установки в зависимости от степени повышения давления для различных рабочих тел

В результате выполнения данной работы была составлена расчетно-математическая модель регазификатора криогенного аккумулятора, работающего по циклу Ренкина. Была получена зависимость мощности, вырабатываемой на турбине регазификатора, от повышения давления для различных рабочих тел. Наиболее высокую эффективность продемонстрировали установки, работающие на пропане (порядка 220 кВт) и этане (порядка 200 кВт), поэтому данные рабочие тела могут быть рекомендованы для проектирования блока разрядки криогенного аккумулятора.

Результаты работы получены с использованием оборудования центра коллективного пользования «Межкафедральный учебно-производственный научный центр САМ-технологий» при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № 0777-2020-0019).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ersoy H. Using liquefied natural gas cold energy for power generation: case study for Marmara Ereğlisi receiving terminal [Текст]/ H. Ersoy, S. Demirpolat // Journal of the Energy Institute. 2009. VOL82.
2. Oshima K. The utilization of LH2 and LNG cold for generation of electric power by a cryogenic type stirling engine [Текст]/ K. Oshima, Y. Ishizaki, S. Kamiyama, M. Akiyama, M. Okuda // Business Press. 1978.
3. Dong H. Using cryogenic exergy of liquefied natural gas for electricity production with the Stirling cycle [Текст]/ H. Dong, L. Zhao, S. Zhang, A. Wang, J. Cai // Energy. 2013. p. 10-18.
4. Bisio G. On the recovery of LNG physical exergy by means of a simple cycle or a complex system [Текст]/ G. Bisio, L. Tagliafico // Exergy, an International Journal 2. 2002. p. 34-50.
5. Ersoy H. Using liquefied natural gas cold energy for power generation: case study for Marmara Ereğlisi receiving terminal [Текст]/ H. Ersoy, S. Demirpolat // Journal of the Energy Institute. 2009. VOL82.
6. Lee S. Analysis and optimization of cascade Rankine cycle for Liquefied natural gas cold energy recovery [Текст]/ S. Lee, I. Choi, Y. Seo, D. Chang // Energy. 2013. VOL61. p. 179-195.
7. Bisio G. Complex energy systems exploiting solar energy and natural gas vaporization [Текст]/ G. Bisio, A. Bosio, M. Cartesegna, G. Rubatto // Proceedings of ASME TURBO EXPO. June 3-6. 2002.
8. Hanawa K. An Ericsson cycle GT design by LNG cryogenic heat utilization [Текст]/ K. Hanawa // Proceedings of ASME TURBOEXPO. May 8-11. 2000.
9. Deng S. Novel cogeneration power system with liquefied natural gas (LNG) cryogenic exergy utilization [Текст]/ S. Deng, H. Jin, R. Cai, R. Lin // Energy 29. 2004. p. 497-512.
10. Song Y. Thermodynamic analysis of a transcritical CO₂ power cycle driven by solar energy with liquefied natural gas as its heat sink [Текст]/ Y. Song, J. Wang, Y. Dai, E. Zhou // Applied Energy. 2012. VOL 92. p. 194-203.

Информация об авторах:

Кузнецова Елизавета Павловна, студент гр. 2124-240405D, Самарский университет, г. Самара, Московское шоссе, 34, lange.elizaveta@yandex.ru

Благин Евгений Валерьевич, старший преподаватель, Самарский университет, г. Самара, Московское шоссе, 34, evgenyblagin@gmail.com