

УДК 621.592.3

Системы хранения энергии на основе криогенных технологий сжижения воздуха

Канд. техн. наук С. В. ВИЗГАЛОВ¹, канд. техн. наук И. И. ШАРАПОВ²,
д-р техн. наук И. Г. ХИСАМЕЕВ³

¹sv_kstu@rambler.ru, ²irek_kstu@rambler.ru, ³igkhisameev@mail.ru

Казанский национальный исследовательский технологический университет

Рассмотрена система аккумулирования вырабатываемой электроэнергии на основе криогенных технологий — путем сжижения воздуха, его хранения с последующей регазификацией и расширением в турбогенераторах (LAES-система). Это направление является достаточно инновационным в данном приложении. Проведен обзор работ в данном направлении. В настоящее время основным реализуемым на практике циклом для данной цели является цикл высокого давления с рекуперацией холода жидкого воздуха и дросселированием прямого потока после охлаждения. Представлена схема термодинамического цикла среднего давления с турбодетандером на части потока, а также методика его расчета. Расчеты проведены, как с использованием холода расширившегося потока, так и без учета. Результаты расчетов представлены в виде графических характеристик цикла от температуры в точке детандерного отбора и давления прямого потока воздуха. Проведен анализ характеристик и сделаны выводы о применимости данного цикла.

Ключевые слова: LAES-системы, сжижение воздуха, криогенный цикл среднего давления, турбодетандер, рекуперация теплоты, характеристики цикла.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 20.01.2022, одобрена после рецензирования 04.04.2022, принята к печати 27.05.2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-21-26

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Визгалов С. В., Шараров И. И., Хисамеев И. Г. Системы хранения энергии на основе криогенных технологий сжижения воздуха. // Вестник Международной академии холода. 2022. № 2. С. 21–26. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-21-26

Systems of electricity accumulating based on cryogenic technologies of air liquification

Ph. D. S. V. VIZGALOV¹, Ph. D. I. I. SHARAPOV², D. Sc. I. G. KHISAMEEV³

¹sv_kstu@rambler.ru, ²irek_kstu@rambler.ru, ³igkhisameev@mail.ru

Kazan National Research Technological University

A system for accumulating generated electricity based on cryogenic technologies is considered — by liquefying air, storing it, followed by regasification and expansion in turbogenerators (LAES-system). This direction is quite innovative in this application. The review of works in this direction is carried out. At present, the main practical cycle for the purpose is the high-pressure cycle with liquid air cold recovery and direct flow throttling after cooling. A scheme of a medium pressure thermodynamic cycle with a turboexpander for a part of the flow is presented, as well as a method for its calculation. The calculations were carried out both with the use of the cold of the expanded flow and without taking it into account. The results of the calculations are presented in the form of graphic characteristics of the cycle as a function of the temperature at the expander extraction point and the pressure of the direct air flow. The characteristics were analyzed and conclusions about the applicability of this cycle were drawn.

Keywords: LAES systems, air liquefaction, medium pressure cryogenic cycle, turbo expander, heat recovery, cycle characteristics.

Article info:

Received 20/01/2023, approved after reviewing 04/04/2022, accepted 27/05/2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-21-26

Article in Russian

For citation:

Vizgalov S.V., Sharapov I.I., Khisameev I.G. Systems of electricity accumulating based on cryogenic technologies of air liquification. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 2. p. 21–26. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-21-26

Введение

Современная тенденция к увеличению доли зеленых, возобновляемых альтернативных источников энергии в общей энергосистеме, требует параллельного развития и повышения емкости систем аккумулирования энергии для сглаживания неравномерностей между ее выработкой и потреблением во времени.

В настоящее время используются несколько технологий накопления энергии с длительным периодом разряда в масштабе энергосети. Каждая из них имеет определенные области предпочтительного использования, преимущества и недостатки при ее хранении. Гидроаккумуляторы и хранилища сжатого воздуха в кавернах в виде истощенных нефтяных или газовых месторождений, эффективно используют для достаточно крупномасштабных проектов по хранению энергии, но несмотря на свою экологичность у обоих есть ограничения по размещению, имеющее локализованный, геологический характер.

Широко известные литий-ионные батареи используются как для транспортных, так и стационарных накопителей энергии из-за их высокой плотности энергии, компактности и относительно низкой первоначальной стоимости из-за массового производства. Однако, количество батарей значительно возрастает с увеличением емкости и периода разряда. Кроме того, это менее экологичный способ аккумулирования, после относительно короткого срока службы батарей их необходимо утилизировать, что также требует затрат.

Следующим, относительно новым и развивающимся решением долговременного хранения энергии большой емкости, свободное от ограничений, создаваемых другими системами, является технология криогенного хранения энергии в виде энергии сжиженного воздуха. В случае избытка выработки энергии, она затрачивается на сжижение доступного атмосферного воздуха, его накопления в изотермических резервуарах [1].

Утверждается, что криогенные системы хранения энергии, получившие развитие относительно недавно, называемые сокращенно LAES, в которых энергия изначально затрачивается на сжижение воздуха, который затем подвергается регазификации и расширению в турбогенераторе с отдачей энергии в общую сеть, лучше подходят для использования в масштабе распределенной энергосистемы, чем гидроаккумуляторы или аккумуляторы сжатого воздуха, потому что это свободно размещаемые системы, не привязанные к геологическим кавернам, водным ресурсам и т. д. [2, 3] Криогенные накопители энергии не требуют значительного места для размещения, не используют токсичных или опасных материалов и могут легко соответствовать строгим городским строительным нормам, т. е. могут быть размещены в непосредственной близости от потребителя.

Данная технология использует жидкий воздух в качестве концентрированной среды для аккумулирования и хранения энергии, получаемый путем охлаждения обычного атмосферного воздуха до температуры уровня минус 190°C и его сжижения при расширении. Жидкий воздух имеет 700-кратное сокращение объема по сравнению с газообразным состоянием, он хранится в теплоизолированных резервуарах при низком давлении (ана-

логичным резервуарам, широко используемым для хранения жидкого азота). Когда требуется восполнение энергии в энергосистеме, при возрастании потребления, полученная криожидкость нагнетается до повышенного давления насосом, нагревается, а затем расширяется в турбинах генератора с увеличением объема и беспрепятственно возвращается в атмосферу. Система полностью экологична. Расширение происходит с помощью стандартных турбин, подключенных к генераторам для выработки электроэнергии, высвобождая таким образом накопленную ранее энергию. Важно при этом соблюдать принцип минимума затрат энергии на повышение давления криожидкости, полезно рекуперировать ее холод, а также минимизировать потери в турбогенераторе.

Европейским лидером, реализующим проекты долговременного хранения энергии, основанные на криогенной технологии жидкого воздуха является компания Highview Power, которая в 2018 г. ввела в эксплуатацию в Манчестере LAES установку мощностью 5 МВт [1] и в настоящее время строит аналогичные системы мощностью 50 МВт и более.

Несмотря на использование в целом известных технологий сжижения газов и выпускаемого «стандартного» оборудования, в данных системах нашли применение принципы рекуперации теплоты, повышающие эффективность системы. Проводятся исследования в данном направлении.

В частности, в Центре криогенного хранения энергии Бирмингемского университета (Centre for Cryogenic Energy Storage), под руководством проф. Yulong Ding, сконструирована первая полупромышленная установка криогенного хранения энергии. В его совместной с коллегами работе (2016) [2] проведено сравнение «холодного» и «теплого» способа хранения энергии, рассмотрены варианты интегрирования криогенных систем хранения энергии с различным устройством ее генерирования: солнечными батареями, ядерными реакторами, а также с установками регазификации сжиженного природного газа, холод которого также можно полезно использовать.

В работе G. L. Guizzi (2015) [3] рассматривается и оптимизируется термодинамический цикл установки сжижения, в котором холод жидкого воздуха, подаваемого насосом из криогенного танка на газификацию и затем на расширение в турбину генератора эффективно используется для охлаждения газообразного сжатого потока воздуха, перед его расширением в парожидкостном турбодетандере и сжижением. Необходимо отметить, что в данной схеме предполагается максимальное использование холода уже полученного продукта — жидкого воздуха, т. е. требуется его практически постоянное использование в процессе сжижения. Также полезно используется теплота от сжатия газа в компрессорах, на подогрев газа между турбинами расширения.

Этот же термодинамический цикл установки рассмотрен Z. Liu (2020) в работе [4], в которой проведено моделирование процесса в системе Aspen HYSYS с целью определения оптимального сочетания количества ступеней сжатия воздуха и турбин расширения, с целью повышения КПД установки.

Целесообразно использовать опыт и знания, накопленные в кислородной и азотной промышленности,

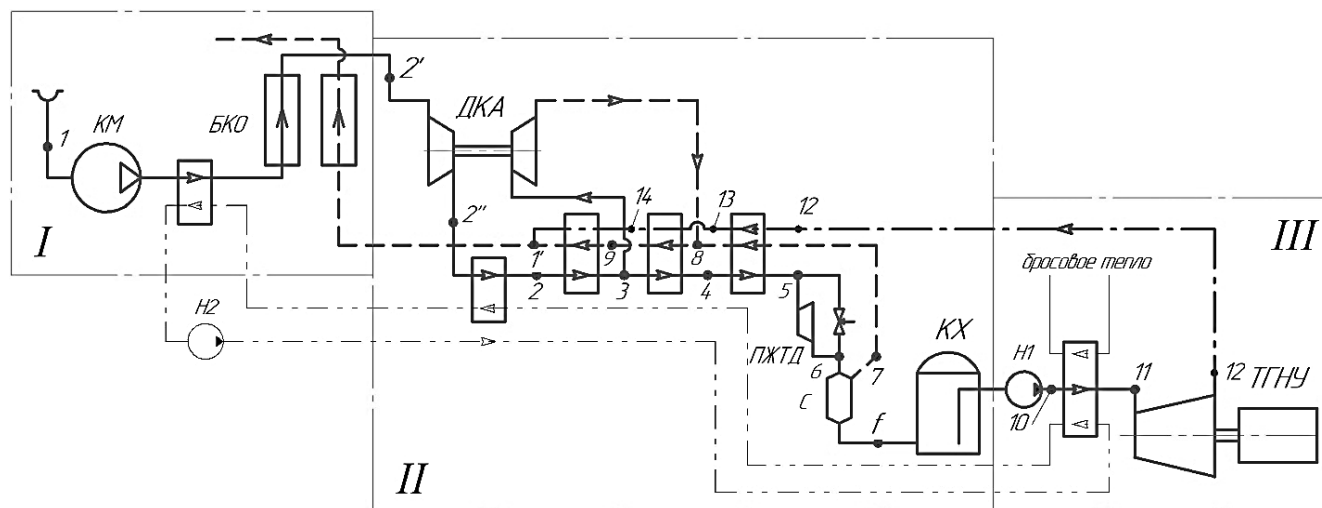


Рис. 1. Схема установки сжижения воздуха по циклу среднего давления LAES-системы
 Fig. 1. Air liquefaction system with the use of medium pressure cycle for LAES-system

совместив их со спецификой генерирующих энергоустановок. В технологии разделения воздуха нашли применение три типа циклов: высокого, среднего (Клода) и низкого давления (Капицы), каждый из которых использует эффект расширения части потока воздуха в турбодетандере. Турбодетандеры или детандерно-компрессорные агрегаты являются надежными, эффективными техническими устройствами, обладающие наибольшим интегральным эффектом расширения газа и создающими наибольший эффект понижения температуры. В этом случае нет постоянной необходимости в холодном потоке полученного жидкого продукта, ожижение воздуха происходит без посторонних хладагентов.

Цели и задачи исследования

Целью работы является рассмотрение цикла среднего давления с турбодетандером на части прямого потока (цикл Клода) и концевым парожидкостным турбодетандером, дополненным охлаждающим потоком после турбины генератора. Задачами работы является определение характеристик цикла в виде зависимостей от температуры в точке детандерного отбора и давления прямого потока, как с использованием холода расширившегося потока, так и без его учета.

Схема установки и ее термодинамический цикл

Схема установки сжижения воздуха по циклу среднего давления LAES-системы представлена на рис. 1, где КМ — компрессор многоступенчатый, БКО — блок комплексной очистки, ДКА — детандерно-компрессорный агрегат, ПЖТД — парожидкостный турбодетандер, С — сепаратор, КХ — криогенное хранилище, Н1 — крионасос, ТГНУ — турбогенераторная установка

Термодинамические процессы цикла сжижения воздуха (основные) показаны в диаграмме T-s на рис. 2. Установка состоит из трех основных блоков: I — блок сжатия и очистки воздуха от вредных и опасных примесей, II — низкотемпературный блок, III — блок регазификации и генерации электроэнергии.

Воздух, сжатый в компрессоре до давления p_2 и охлажденный до температуры окружающей среды с помо-

щью контура утилизации теплоты или атмосферного воздуха (в режиме накопления жидкого воздуха), подвергается осушке и очистке от углекислоты.

Далее сжатый воздух направляется в турбокомпрессорную ступень ДКА — детандерно-компрессорного агрегата, где несколько дожимается за счет утилизации энергии расширяющегося газа и охлаждается. Процессы сжатия 1-2'-2 условно показаны как изотермические.

Далее сжатый прямой поток охлаждается обратным холодным потоком в процессе 2-3. В точке 3 поток разделяется на две части, одна часть — поток рециркуляции поступает в турбодетандер ДКА (его доля обозначается как D), где расширяется до давления p_1 — процесс 3-8, другая часть (его доля равна 1-D) есть ожигаемый поток, направляется в теплообменник, где охлаждается в процессе 3-4 за счет эффекта расшире-

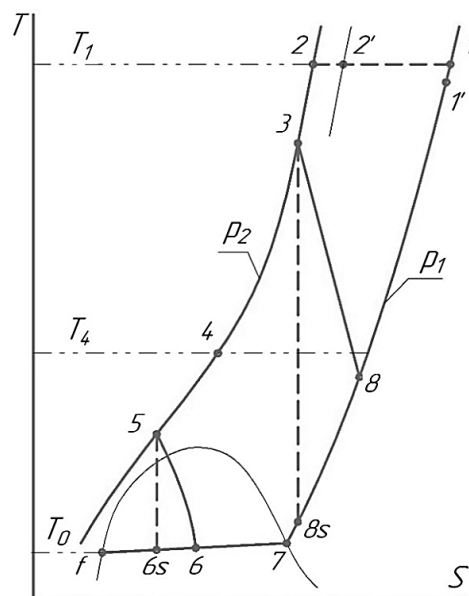


Рис. 2. Термодинамический цикл в диаграмме T-s
 Fig. 2. Thermodynamic cycle in T-s diagram

ния части потока в турбодетандере и подключения его к обратному потоку в точке 8. Затем следует охлаждение в процессе 4–5 и расширение в парожидкостном турбодетандере в процессе 5–6 с образованием жидкости в точке f , которая из сепаратора — сборника S сливается в криогенное хранилище, представляющее собой несколько изотермических резервуаров.

Охлаждающими являются два потока: детандерный поток D и поток газа после парожидкостного турбодетандера, не перешедший в жидкую фазу, относительное количество этого потока $(1-x)$, где x — доля потока, перешедшего в жидкость после расширения. Кроме этого, дополнительным охлаждающим потоком, в режиме использования накопленной жидкости может являться поток воздуха, после расширения в турбине силовой турбогенераторной установки.

Методика расчетов

На основе метода энергетических балансов [5] составлена расчетная схема цикла, позволяющая определить детандерный поток D , коэффициент ожигения x , удельные затраты энергии на 1 кг жидкости l_0 с учетом и без учета использования холодопроизводительности расширившегося воздуха в турбине турбогенераторной установки. Аналогичная задача решалась авторами в работе [6] для установки сжижения природного газа.

Ставятся две задачи расчета — определить влияние давления на прямом потоке после компрессора p_2 и температуры T_3 в точке детандерного отбора на перечисленные параметры.

Коэффициент ожигения и детандерный поток определяются следующими уравнениями:

$$x = \frac{\Delta h'_{т1} + D \cdot h \eta_s + (1-D)(h_5 - h_{s6}) \eta_s \eta_m - q_{\Sigma}}{(h_7 - h_f) - (h_7 - h_{12})},$$

$$D = \frac{x(h_7 - h_8) + \Delta h'_{т1} - \Delta h'_{т1} - x(h_7 - h_{12}) + q_{31}}{h \eta_s + \Delta h'_{т1}},$$

где

$$\Delta h'_{т1} = h_7 - h_2;$$

$$\Delta h'_{т11} = h_8 - h_4;$$

$$h \eta_s = h_3 - h_8 = (h_3 - h_{8s}) \eta_s,$$

здесь q_{Σ} — суммарный удельный теплоприток из окружающей среды через теплоизоляцию.

Точки начала и конца изоэнтروпийного расширения в парожидкостном турбодетандере (5 и 6s соответственно) определяются как:

$$h_5 = h_4 - \frac{(1-D-x)(h_8 - h_7) - q_{311}}{(1-D)},$$

$$h_{6s} = h_f + (h_7 - h_f) \frac{(S_5 - S_f)}{(S_7 - S_f)}.$$

Данные уравнения наиболее просто решать итерационным путем, задавая детандерным потоком D на первой итерации и полагая член $(1-D)(h_5 - h_{6s}) \eta_s \eta_m = 0$. Расчет при этом имеет конечную точность, но достаточно высокую для практики.

Результаты исследования и их обсуждение

Для проведения расчетов по данной методике необходимо как можно точнее задать ряд параметров. Величины недорекупераций, т. е. разностей температур в точках 2 и 1', а также в точках 4 и 8 задавались на уровне (3...5) % от температурного уровня. Удельный теплоприток через теплоизоляцию принимался как для аналогичных азотных установок. Изоэнтропийный КПД турбодетандера ДКА и ПЖТД принимался на уровне $\eta_s = 0,85$, механический КПД $\eta_m = 0,9$, изоэнтропийный КПД турбины генератора 0,9. Свойства воздуха определялись по программе RefProp.

Проведенные расчеты для различных давлений p_2 , а также значений температуры в точке 3 позволили получить ряд графических характеристик представленных на рис. 3, 4, 5. По оси абсцисс отложены значения температуры T_3 , сами кривые отличаются давлением p_2 . Получены две серии кривых: первая — без использования холодопроизводительности расширившегося потока в турбине силовой турбогенераторной установки (сплошные линии). Это режим накопления жидкого воздуха в криогенном хранилище. Вторая серия — режим с использованием холода потока воздуха после силовой турбины (штриховые линии).

Заключение

На основании расчетов можно сделать выводы, что кривые как для коэффициента ожигения x , так и для удельной мощности l_0 имеют экстремумы по температуре детандерного отбора T_3 , которые зависят от давления прямого потока p_2 . С ростом давления p_2 экстремумы характеристик смещаются в область больших температур T_3 . Также с ростом давления мы имеем ожидаемое увеличение выхода жидкости, так как увеличивается удельная холодопроизводительность турбодетандера и дроссель-эффекты $\Delta h'_{т1}, \Delta h'_{т11}$. Но вместе с тем растет и работа компрессора на сжатие воздуха, поэтому удельные затраты на 1 кг жидкого продукта практически не изменяются.

С ростом давления прямого потока с 4,8 МПа до 6,4 МПа выход жидкости может быть увеличен на 10%, удельные затраты энергии при этом составят порядка 1990 кДж/кг жидкости (серия сплошных кривых).

Однако, наблюдается заметное повышение выхода жидкого воздуха на 24,28% и снижение затрат энергии на единицу жидкого продукта до 1590 кДж/кг жидкости при использовании холодопроизводительности расширившегося в турбине воздуха (серия штриховых кривых).

На рис. 5 показаны зависимости доли детандерного отбора D в точке 3, от тех же параметров, как видим удельный поток в детандер ДКА снижается с ростом давления p_2 и повышением температуры T_3 . И кроме того, он также снижается при использовании холода расширившегося потока из-за создания им дополнительной холодопроизводительности.

Результаты данных расчетов могут быть использованы при выборе термодинамического цикла сжижения, его режимных параметров и подборе оборудования при разработке систем аккумулирования энергии с помощью жидкого воздуха.

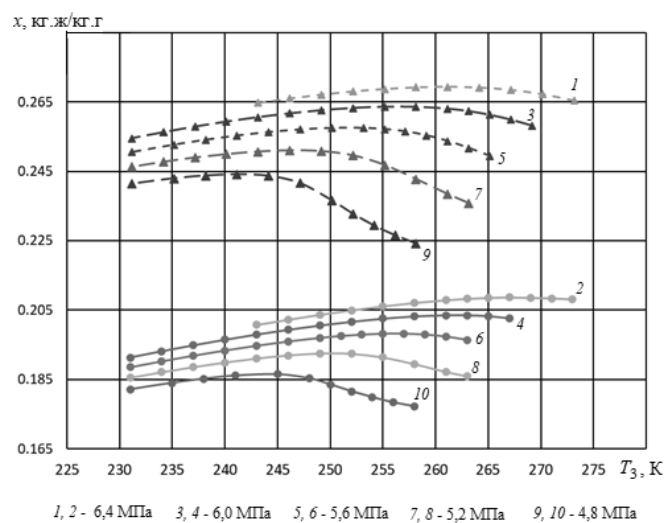


Рис. 3. Зависимости коэффициента ожизнения от температуры в точке детандерного отбора при различных давлениях p_2 (сплошные линии — без использования холодопроизводительности расширившегося потока, штриховые — с использованием холодопроизводительности)

Fig. 3. Dependencies of liquefaction coefficient on temperature at the point at expander reduction at various pressure p_2 (solid line — without using refrigerating capacity of expanded flow, dashed line — using refrigerating capacity)

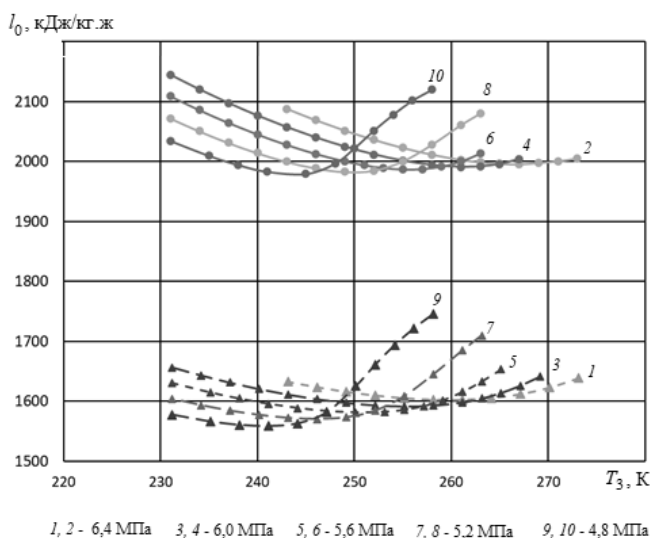


Рис. 4. Зависимости удельной энергии от температуры в точке детандерного отбора при различных давлениях p_2

Fig. 4. Dependencies of specific energy on temperature at the point at expander reduction at various pressure p_2

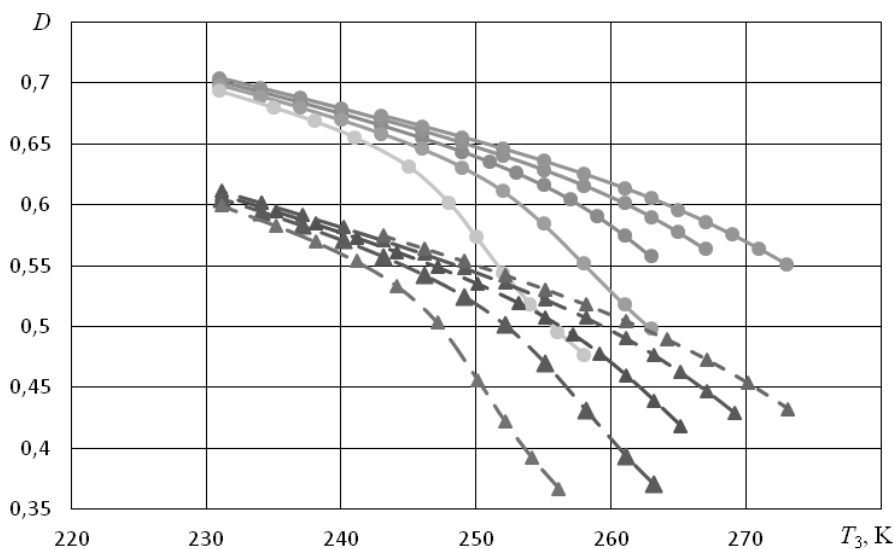


Рис. 5. Зависимости удельного детандерного потока от температуры в точке детандерного отбора при различных давлениях p_2 (сплошные линии — без использования холодопроизводительности расширившегося потока, штриховые — с использованием холодопроизводительности)

Fig. 5. Dependencies of specific expander flow on temperature at the point at expander reduction at various pressure p_2 (solid line — without using refrigerating capacity of expanded flow, dashed line — using refrigerating capacity)

Обозначения, применяемые в статье:

- h — энтальпия;
- S — энтропия;
- T — температура;
- Dh — изотермический дроссель эффект;
- hh_s — теплоперепад в турбодетандере;
- D — удельный поток в турбодетандер;
- x — коэффициент ожизнения;
- h_s — изоэнтروпийный КПД турбодетандера;

- h_m — механический КПД турбодетандера;
- p_2 — давление прямого потока;
- p_1 — давление обратного потока;
- l_0 — удельная работа на 1 кг жидкого воздуха;
- q_s — суммарный теплоприток через теплоизоляцию;
- q_{sI} — теплоприток через теплоизоляцию на 1-й ступени;
- q_{sII} — теплоприток через теплоизоляцию на 2-й ступени.

Литература/References

- Huang, Z. F., Soh, K. Y., Wan, Y. D., Islam, M. R., Chua, K. J. Assessment of an intermediate working medium and cold energy storage (IWM–CES) system for LNG cold energy utilization under real regasification case. *Energy*, 2022, 253:124080
- Bashiri Mousavi, S., Nabat, M. H., Razmi, A. R., Ahmadi, P. A comprehensive study and multi-criteria optimization of a novel sub-critical liquid air energy storage (SC–LAES). *Energy Conversion and Management*. 2022, 258:115549
- Han, F., Wang, Z., Jiang, Y., Ji, Y., Li, W. Energy assessment and external circulation design for LNG cold energy air separation process under four different pressure matching schemes. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. 27:101251
- Our CRYOplatform technology is ready now. *Highview Power*. 2019. [Electronic resource]: <https://www.highviewpower.com/technology/>
- Yulong Ding et al. Liquid Air Energy Storage / Storing Energy. Part. B. *Electrical Energy Storage Techniques*, 2016. Pp. 167–181. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803440-8.00009-9>
- Guizzi G. L., Manno M., Tolomei L. M. and Vitali R. M., Thermodynamic analysis of a liquid air energy storage system. *Energy*. 2015, vol. 93. Pp. 1639–1647. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.030>
- Liu Z., Yu H., Gundersen T. Optimization of liquid air energy storage (LAES) using a genetic algorithm / Proceedings of the 30th European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE30), 2020, Milano, Italy. pp 967–972. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-823377-1.50162-2>
- Архаров А. М. Основы криологии. Энтропийно-статистический анализ низкотемпературных систем. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 507 с. [Arkharov A. M. Fundamentals of cryology. Entropy-statistical analysis of low-temperature systems. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2014. 507 p. (in Russian)]
- Vizgalov S. V., Khisameev I. G. Calculation and analysis of the characteristics of a Claude cycle with a turboexpander-compressor for natural gas liquefaction / *AIP Conference Proceedings*. 2412, 030025. 2021. <https://doi.org/10.1063/5.0075142>

Сведения об авторах

Визгалов Сергей Владимирович

К. т. н., доцент кафедры «Холодильной техники и технологии» Казанского национального исследовательского технологического университета, Россия, 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, sv_kstu@rambler.ru.
ORCID 0000-0002-0101-2674

Шарапов Ирек Ильясович

К. т. н., доцент кафедры «Холодильной техники и технологии» Казанского национального исследовательского технологического университета, Россия, 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, irek_kstu@rambler.ru

Хисамеев Ибрагим Габдулхакович

Д. т. н., профессор, зав. каф. «Холодильной техники и технологии» Казанского национального исследовательского технологического университета, Россия, 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, igkhisameev@mail.ru

Information about authors

Vizgalov Sergey V.

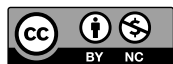
Ph. D., Associate Professor of the Department of Refrigeration Engineering and Technology, Kazan National Research Technological University, Russia, 420015, Kazan, st. K. Marx, 68, sv_kstu@rambler.ru.
ORCID 0000-0002-0101-2674

Sharapov Irek I.

Ph. D., Associate Professor of the Department of Refrigeration Engineering and Technology, Kazan National Research Technological University, Russia, 420015, Kazan, st. K. Marx, 68, irek_kstu@rambler.ru

Khisameev Ibragim G.

D. Sc., Professor, Head of the department of Refrigeration Engineering and Technology, Kazan National Research Technological University, Russia, 420015, Kazan, st. K. Marx, 68, igkhisameev@mail.ru



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»

О Перечне рецензируемых научных изданий

В связи с вступлением в силу новой редакции номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118, издано распоряжение Минобрнауки России от 1 февраля 2022 г. № 33-р о Перечне рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Рецензируемые научные издания, ранее включенные в Перечень по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки, которые были изменены или исключены из ранее действующей номенклатуры научных специальностей, считаются включенными в Перечень по этим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки до 16 октября 2022 г.

Подробная информация на сайте ВАК РФ в разделе "Документы" – "Рецензируемые издания"

https://vak.minobrnauki.gov.ru/documents#tab=_tab:editions~