

УДК 658.261:621.56

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА УГЛЕКИСЛОТЫ КАК ЭЛЕМЕНТА ТРИГЕНЕРАЦИОННОЙ ТУРБОУСТАНОВКИ НА ОРГАНИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ РЕНКИНА

**А. В. ОВСЯННИК, В. П. КЛЮЧИНСКИЙ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

*Произведен эксергетический анализ установки по производству жидкой и газообразной углекислоты с возможностью получения холода в схеме тригенерации. Представлен цикл в  $P$ - $h$ -координатах данной установки. Построена диаграмма Грассмана–Шаргута установки по производству углекислоты.*

*Выявлено, что при помощи дополнительного элемента в виде внешнего источника охлаждения (системы оборотного водоснабжения с градирней либо холодной воды, поступающей на объект из поверхностных или подземных источников) можно значительно снизить расход рабочего тела в установке и, как следствие – потери в цикле. Построенные диаграммы Грассмана–Шаргута первоначальной и измененной схем установок показали, что данное мероприятие позволяет снизить затраты эксергии на привод компрессора до 2,97 %.*

**Ключевые слова:** органический цикл Ренкина, низкокипящее рабочее тело, производство углекислоты, оптимизация, эксергетический КПД, повышение эффективности, тригенерация, хладагент.

## THERMODYNAMIC PLANT OPTIMIZATION FOR THE PRODUCTION OF CARBON ACID AS AN ELEMENT OF TRIGENERATING TURBO UNIT ON THE ORGANIC RENKIN CYCLE

**A. V. OVSYANNIK, V. P. KLYUCHINSKY**

*Educational Institution “Sukhoi State Technical University  
of Gomel”, the Republic of Belarus*

*The exergy analysis of the installation for the production of liquid and gaseous carbon dioxide has been done with the possibility of obtaining a cold in the trigeneration scheme.*

*The cycle in  $P$ - $h$ -coordinates of the given setup is presented. The Grassmann–Shargut diagram of the installation for the production of carbon dioxide was constructed.*

*It was revealed that with the help of an additional element in the form of an external cooling source (a circulating water supply system with a cooling tower, or cold water supplied to the object from surface or underground sources), it is possible to significantly reduce the consumption of the working fluid in the installation and, as a consequence, losses in the cycle. The designed Grassmann–Shargut diagrams of the initial and modified plant diagrams showed that this measure allows reducing the exergy costs for the compressor drive to 2.97%.*

**Keywords:** organic Renkin cycle, low-boiling working fluid, carbon dioxide production, optimization, exergy efficiency, efficiency increase, trigeneration, refrigerant.

### **Введение**

Одной из приоритетных задач энергосбережения является эффективное и рациональное использование топливно-энергетических ресурсов. Повышение термодина-

мической эффективности генерации энергии различных видов необходимо рассматривать как один из возможных путей решения этой задачи [1].

Сектор искусственного охлаждения (включая кондиционирование) потребляет около 17 % всей используемой в мире электроэнергии [2]. Потребление холода с каждым годом неуклонно растет. Предполагаемый рост глобальной потребности в электроэнергии для целей охлаждения к 2030 г. может стать эквивалентным трехкратной величине производимой сегодня электроэнергии в Великобритании.

В связи с этим все более широкое применение находят тригенерационные установки. Тригенерация – это процесс организации выработки одновременно трех энергий: электричества, тепла и холода. Получение первых двух есть когенерация, т. е. первые две составляющие. Тригенерация является более выгодной по сравнению с когенерацией, поскольку дает возможность эффективно использовать утилизируемое тепло не только зимой для отопления, но и летом для кондиционирования помещений или для технологических нужд [3], [4].

Энергия, вырабатываемая на таких установках, может быть использована как локально – для удовлетворения нужд отдельных предприятий, так и для удовлетворения нужд целых населенных пунктов в электроэнергии, холоде и тепле.

Для утилизации тепловых отходов продуктов сгорания газотурбинных установок, топлив с низкой теплотворной способностью, а также для утилизации вторичных энергетических ресурсов, которые в больших количествах присутствуют на промышленных предприятиях, находят свое применение тригенерационные турбоустановки на органическом цикле Ренкина [5]–[12]. Одной из таких установок является тригенерационная турбоустановка с производством жидкой и газообразной углекислоты [5], [7], [9]. Пример схемы установки представлен на рис. 1.

Цель работы – эксергетический анализ и оптимизация установки для производства углекислоты как элемента тригенерационной турбоустановки на органическом цикле Ренкина.

### Постановка задачи

В источниках [5], [7], [9], посвященных тригенерационным установкам с производством углекислоты, не рассмотрены вопросы, касающиеся эффективности таких установок. Таким образом, возникает необходимость исследовать эффективность данного рода установок.

Оценку эффективности установок целесообразно производить при помощи эксергетического анализа, позволяющего оценивать качественную сторону преобразования энергии и определять степень термодинамического совершенства процессов [13]–[16]. Конечным результатом эксергетического анализа является определение эксергетического коэффициента полезного действия установки, о. е.:

$$\eta_e = \frac{\sum E_3}{\sum E_3} = 1 - \frac{\sum D}{\sum E_3},$$

где  $\sum E_3$  – потоки эксергии, сумма или разность которых определяет получаемый эффект;  $\sum E_3$  – потоки эксергии, сумма или разность которых определяет затраты;  $\sum D$  – потери эксергии в цикле.

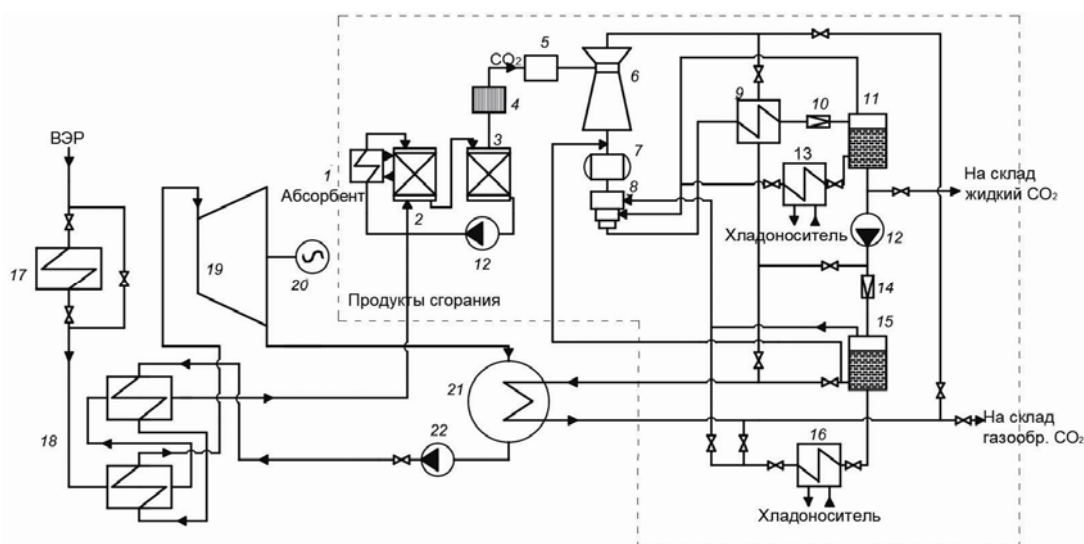


Рис. 1. Схема тригенерационной установки с производством жидкой и газообразной углекислоты

На рис. 1 и 5 представлены следующие элементы: 1, 13, 16 – теплообменный аппарат; 2 – абсорбер; 3 – десорбер; 4 – брызгоотделитель; 5 – осушитель; 6 – инжектор; 7 – ресивер; 8 – компрессор; 9 – конденсатор; 10, 14 – регулирующий вентиль; 11, 15 – сепаратор; 12, 22 – насос; 17 – подогреватель сетевой воды; 18 – котел-утилизатор; 19 – турбина на НКРТ; 20 – генератор; 21 – конденсатор.

Продукты сгорания поступают в установку абсорбер–десорбер, где получается чистый  $\text{CO}_2$ . Полученная углекислота при помощи инжектора 6 подается в ресивер 7. Из ресивера сжатый в компрессоре 8 диоксид углерода подается в теплообменник 9, охлаждается, дросселируется в регулирующем вентиле 10 и сепарируется в сепараторе 11. Часть полученной жидкой углекислоты подается на склад. Вторая часть поступает на вторую ступень дросселирования 14 и сепарируется в сепараторе 15. Часть полученной жидкой углекислоты используется для получения холода и конденсации рабочего тела в конденсаторе 21 турбоустановки на органическом цикле Ренкина. Получение холода в установке (тригенерация энергии) осуществляется в испарителях 13 и 16. Это приводит к повышению энергетической эффективности установки.

### Основная часть

При помощи методики, представленной в [9], произведен эксергетический анализ холодильной части схемы тригенерационной установки (выделенной на рис. 1 пунктиром), предназначенной как для производства углекислоты различного агрегатного состояния, так и для производства холода двух уровней. Результаты эксергетического анализа представим в виде диаграммы Грассмана–Шаргута (рис. 3). Исходные данные приведены в таблице. Цикл установки в  $P$ – $h$ -координатах показан на рис. 2.

### Исходные данные для расчета установки по производству углекислоты

Исходные данные	Значение
Необходимое количество холода низшего уровня, кДж	5000
Температура окружающей среды, °С	15
Температура кипения $\text{CO}_2$ в конденсаторе 9, °С	23
Необходимое количество холода высшего уровня, кДж	1000

Исходные данные	Значение
Процент газообразной кислоты поступающей на склад, %	50
Отношение жидкой углекислоты к газообразной, поступающей на склад, о. е.	1
Необходимая температура холода, °С	2
Использование углекислоты для охлаждения конденсатора турбоустановки	Нет
Индикаторный КПД компрессора, %	80
Индикаторный КПД теплообменника, %	98
Механический КПД компрессора, %	75
КПД электродвигателя компрессора, %	94

Цикл (рис. 2) состоит из следующих процессов: 1–2 – адиабатное сжатие газообразного  $\text{CO}_2$  в компрессоре первой ступени; 2–3 – охлаждение  $\text{CO}_2$  перед компрессором второй ступени; 3–4 – адиабатное сжатие  $\text{CO}_2$  в компрессоре второй ступени; 4–5 – промежуточное охлаждение  $\text{CO}_2$  перед компрессором третьей ступени; 5–6 – адиабатное сжатие  $\text{CO}_2$  в компрессоре третьей ступени; 6–7 – охлаждение и конденсация газообразного  $\text{CO}_2$  в конденсаторе 9; 7–8 – первое адиабатное дросселирование жидкого диоксида углерода в дросселе 10 в сепаратор 11; 9–10 – второе адиабатное дросселирование  $\text{CO}_2$  в дросселе 14 в сепаратор 15; 10–1 – кипение жидкого  $\text{CO}_2$  в конденсаторе турбодетандерной установки и (или) в теплообменнике 16.

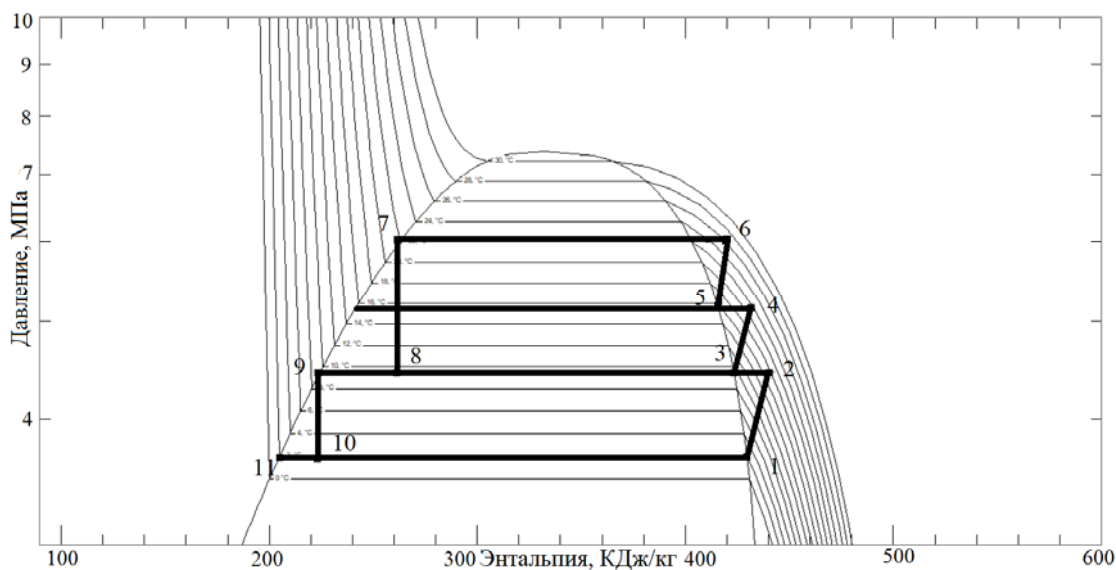


Рис. 2. Цикл в  $P$ - $h$ -координатах установки по производству углекислоты с возможностью получения холода

На рис. 3 и 6 представлены следующие элементы: К – компрессор 8 (для упрощения схемы три ступени компрессора и охладители между ступенями объединены в один элемент); КД – конденсатор 9; ДВ1 – соответственно регулирующий вентиль первой ступени дросселирования 10; ДВ2 – соответственно регулирующий вентиль второй ступени дросселирования 14; СП1 – сепаратор 11; СП2 – сепаратор 15; ТО-ИВ – теплообменный аппарат высшего уровня холода 13; ТО-ИН – соответственно теплообменный аппарат низшего уровня холода 16.

Из диаграммы, представленной на рис. 3, видно, что значительное количество эксергии расходуется на охлаждение в конденсаторе 9.

Предположим, что имеется сторонний источник холода. Тогда ступенчато замещая охлаждение в конденсаторе 9 посторонним источником холода, построим график зависимости расходов охлаждаемого и охлаждающего потоков углекислоты в конденсаторе 9 (рис. 5).

На рис. 4 показано, что такое замещение приводит к значительному снижению расходов углекислоты в цикле.



Рис. 3. Диаграмма Грассмана–Шаргуга установки по производству углекислоты и холода

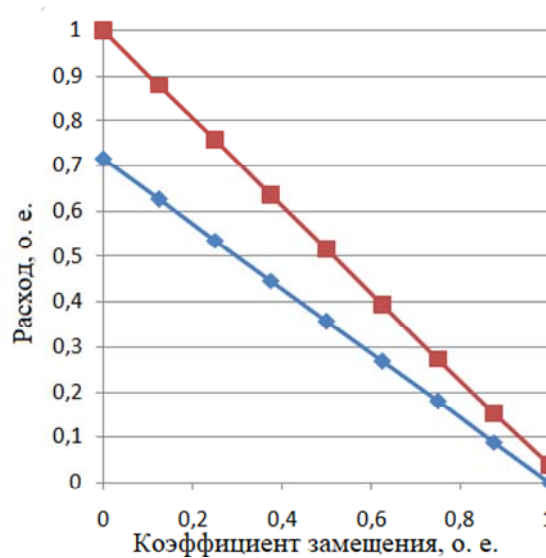


Рис. 4. Изменение расходов углекислоты при замещении охлаждения конденсатора:  
 —♦— расход охлаждающей жидкой углекислоты;  
 —■— расход охлаждающей газообразной углекислоты

Таким образом, можно предположить, что если вместо охлаждения в конденсаторе 9 (рис. 1) жидкой углекислотой использовать сторонний источник, например, в виде контура охлаждения с градирней, либо холодной воды, поступающей на объект из поверхностных или подземных источников, то можно значительно снизить расходы углекислоты, а как следствие – и потери эксергии в цикле. Измененная схема установки представлена на рис. 5.

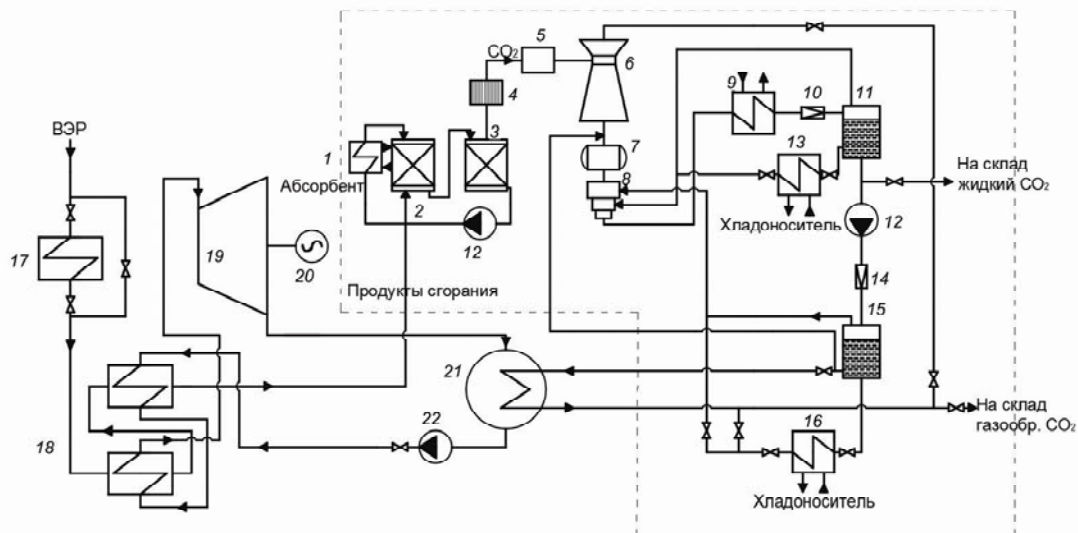


Рис. 5. Схема тригенерационной установки с производством жидкой и газообразной углекислоты (измененная)

Построим диаграмму Грассмана–Шаргута (рис. 6) для измененной схемы, представленной на рис. 5 при тех же исходных данных.

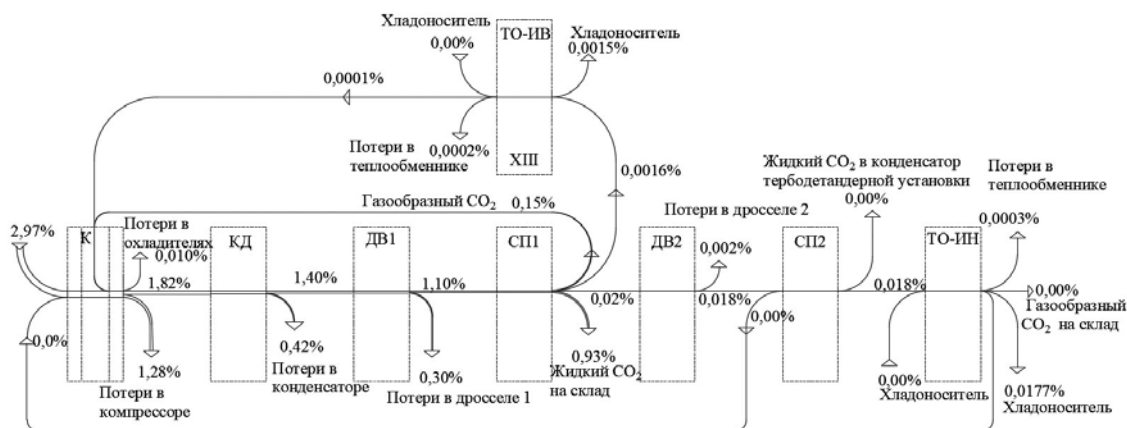


Рис. 6. Диаграмма Грассмана–Шаргута измененной установки по производству углекислоты и холода

Диаграмма Грассмана–Шаргута для измененной схемы установки по производству углекислоты и холода (рис. 5) показывает, что использование стороннего источника для охлаждения конденсатора 9 приводит к снижению количества эксергии циркулирующей в цикле, что, в свою очередь, ведет к снижению потерь эксергии по элементам установки, и следовательно – к значительному снижению затрат электроэнергии на привод компрессора (со 100 до 2,97 %).

### Заключение

Предложена схема тригенерационной установки для производства жидкой и газообразной углекислоты с использованием внешнего источника охлаждения конденсатора. Эксергетический анализ показал, что применение внешнего источника охлаждения конденсатора установки позволяет снизить затраты электрической энергии на привод компрессора до 2,97 %. В качестве внешнего источника охлаждения предложено использовать систему оборотного водоснабжения с градирней либо холодную воду, поступающую на объект из поверхностных или подземных источников.

## Литература

1. Схемы тригенерационных установок для централизованного энергоснабжения / А. В. Клименко [и др.] // Теплоэнергетика. – 2016. – № 6. – С. 36–43.
2. Роль искусственного охлаждения в мировой экономике / Д. Коломб [и др.] // Холодил. техника. – 2016. – № 1. – С. 4–11.
3. Кудрин, Б. И. Новые тенденции в тригенерационных технологиях / Б. И. Кудрин, В. С. Кожиченков // Энергосовет. – 2011. – № 4 (17). – С. 36–39.
4. Кокорин, О. Я. Энергетические и экономические преимущества объединения автономных источников теплоснабжения зданий с источниками холодоснабжения систем кондиционирования воздуха / О. Я. Кокорин // Холодил. техника. – 2003. – № 1. – С. 6–9.
5. Овсянник, А. В. Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода / А. В. Овсянник // Современные проблемы машиноведения : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 22–23 нояб. 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Фил. ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2018. – С. 237–239.
6. Ключинский, В. П. Тригенерационные турбодетандерные установки на основе низкокипящих рабочих тел / В. П. Ключинский // Беларусь в современном мире : материалы XII Междунар. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 16–17 мая 2019 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Гомел. обл. орг. о-ва «Знание» ; под общ. ред. В. В. Кириенко. – Гомель, 2019. – С. 329–331.
7. Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода / А. В. Овсянник [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2019. – № 2. – С. 41–51.
8. Ключинский, В. П. Перегрев паров хладагента в камере сгорания ГТУ парогазовой установки / В. П. Ключинский // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2019 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2019. – С. 188–190.
9. Овсянник, А. В. Турбодетандерная установка на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты / А. В. Овсянник // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2019. – № 62 (1). – С. 77–87. – DOI: org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87.
10. Овсянник, А. В. Термодинамический анализ и оптимизация параметров низкокипящего рабочего тела в турбодетандерной установке / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Современные проблемы теплофизики и энергетики : материалы III Междунар. науч. конф., Москва, 19–23 окт. 2020 г. / Нац. исслед. ун-т МЭИ. – М. : МЭИ, 2020. – С. 620–621.
11. Овсянник, А. В. Теплообмен при кипении маслофреоновых смесей / А. В. Овсянник [и др.] // Современные проблемы теплофизики и энергетики : материалы III Междунар. науч. конф., Москва, 19–23 окт. 2020 г. / Нац. исслед. ун-т МЭИ. – М. : МЭИ, 2020. – С. 211–213.

12. Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода с двукратным перегревом / А. В. Овсянник [и др.] // Современные проблемы теплофизики и энергетики : материалы III Междунар. науч. конф., Москва, 19–23 окт. 2020 г. / Нац. исслед. ун-т МЭИ. – М. : МЭИ, 2020. – С. 621–623.
13. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент : справочник / под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – 2-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.
14. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. – М. : Энергия, 1973. – 295 с.
15. Бродянский, В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек ; под ред. В. М. Бродянского. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
16. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. – М. : Энергия, 1968. – 280 с.

*Получено 03.11.2020 г.*