

УДК 658.261:620.97

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОКИПЯЩЕГО РАБОЧЕГО ТЕЛА В ТУРБОДЕТАНДЕРНОЙ УСТАНОВКЕ

А. В. ОВСЯННИК, В. П. КЛЮЧИНСКИЙ

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

Разработана программа, позволяющая термодинамически оптимизировать параметры рабочего тела на входе в турбодетандер, определить наибольший эксергетический КПД, получить значения оптимальных параметров рабочего тел, а также выбрать рабочее тело с наибольшим эксергетическим КПД.

Представлена методика термодинамического анализа турбодетандерной установки, применяемая в программе, а также блок-схема разработанной программы. Рассмотрены схема турбодетандерной установки с теплообменным аппаратом на выходе из турбодетандера и цикл турбодетандерной установки в P - h -координатах. Получены результаты термодинамической оптимизации и выбора рабочего тела из 17 предложенных озонобезопасных низкокипящих рабочих тел. Наибольшим эксергетическим КПД из исследуемых низкокипящих рабочих тел обладает изобутан (ISOBUTAN), при этом максимальный эксергетический КПД 50,26 % достигается при следующих параметрах: температура рабочего тела перед турбодетандером 250 °С (максимально допустимая по исходным условиям температура), давление рабочего тела перед турбодетандером 6,99 МПа.

Ключевые слова: турбодетандер, низкокипящее рабочее тело, программа, оптимизация, эксергетический КПД, повышение эффективности, оптимальные параметры, хладагент, фреон.

THE DEVELOPMENT OF THE SOFTWARE FOR OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF LOW-BOILING WORKING SUBSTANCE IN TURBOEXPANDER SETTING

A. V. OVSIANNIK, V. P. KLUCHINSKIJ

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

The article is about the development of the software that allows thermodynamically optimize the parameters of working substance at the entering into turboexpander. It also defines the highest exergy efficiency coefficient, obtains the optimal parameters of working substances and helps to choose the working substance with the highest exergy efficiency coefficient.

The article presents the method of thermodynamical analysis of turboexpander settings, which is used in the software, as well as the flowchart of developed software. It describes the scheme of turboexpander setting with heat exchanger at the exit of turboexpander and its cycle in P - h -coordinates. The results of thermodynamic optimization and the choice of working substance from 17 offered ozone-safe low-boiling working substances are acquired. ISOBUTAN has the highest exergy efficiency coefficient from the researched low-boiling working substances. Herewith the maximum exergy efficiency coefficient of 50,26% can be reached within the following parameters: the temperature of working substance in front of turboexpander is 250 °С (the highest admissible temperature under the initial conditions), the pressure of working substance in front of turboexpander is 6,99 МПа.

Keywords: turboexpander, low-boiling substance, software, optimization, exergy efficiency coefficient, efficiency increase, optimal parameters, refrigerant, freon.

Введение

Для утилизации тепловых отходов продуктов сгорания газотурбинных установок, а также для утилизации вторичных энергетических ресурсов, которые в больших количествах присутствуют на промышленных предприятиях, находят свое применение турбодетандерные установки на низкокипящих рабочих телах (рис. 1) [1]–[7].

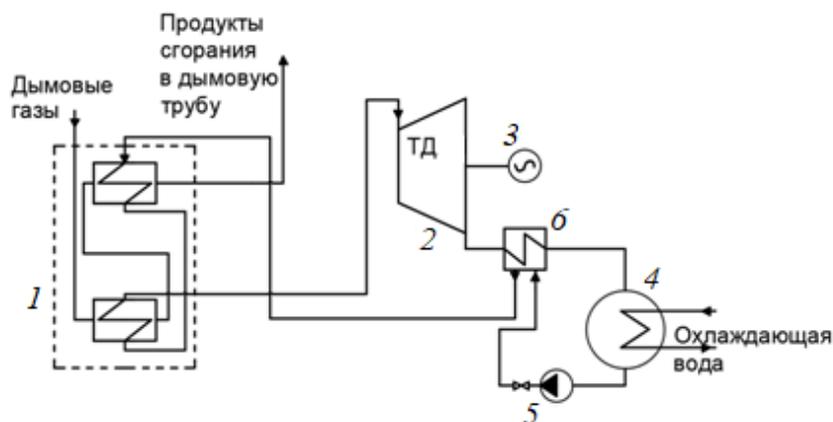


Рис. 1. Схема турбодетандерной установки:
1 – котел-утилизатор; 2 – турбодетандер; 3 – генератор;
4 – конденсатор; 5 – насос; 6 – теплообменный аппарат

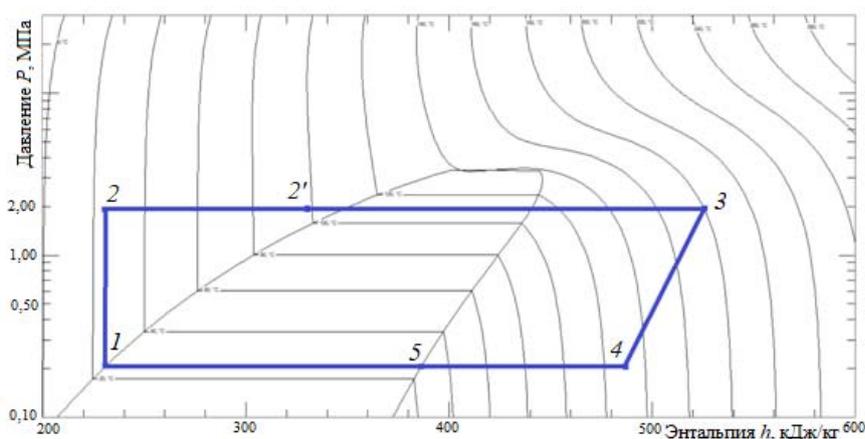


Рис. 2. Цикл турбодетандерной установки

Цикл исследуемой схемы (рис. 2) состоит из следующих процессов: 1–2 – повышение давления низкокипящего рабочего тела в насосе 5; 2–2' – изобарный нагрев низкокипящего рабочего тела (НКРТ) в теплообменнике 6; 2'–3 – изобарный процесс нагрева, кипения и перегрева НКРТ в котле-утилизаторе 1; 3–4 – расширение паров НКРТ в турбодетандере 2; 4–5 – изобарный процесс охлаждения паров НКРТ в теплообменнике 6; 5–1 – изобарно-изотермический процесс конденсации НКРТ в конденсаторе 4.

Целью работы является разработка компьютерной программы, позволяющей производить термодинамическую оптимизацию параметров рабочего тела в турбодетандерной установке и выбор наиболее эффективного, с эксергетической точки зрения, рабочего тела из заданного перечня.

Постановка задачи

Исследования на примере хладагента R236EA (рис. 3 и 4) показали, что повышение температуры рабочего тела без изменения давления в турбодетандерном цикле с теплообменным аппаратом приводит к повышению эксергетической эффективности на всем исследуемом промежутке температур (рис. 3), однако повышение давления без изменения температуры (рис. 4) не всегда приводит к положительному эффекту.

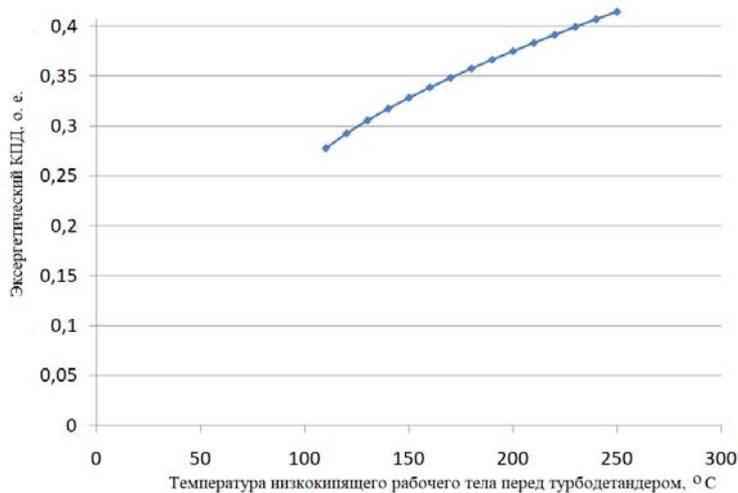


Рис. 3. Зависимость эксергетического КПД от температуры низкокипящего рабочего тела перед турбодетандером

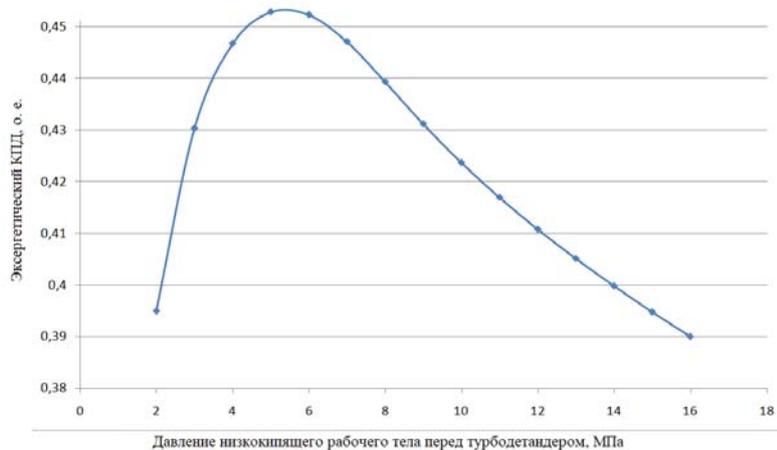


Рис. 4. Зависимость эксергетического КПД от давления низкокипящего рабочего тела перед турбодетандером

Таким образом, возникает необходимость определения параметров рабочего тела, при которых турбодетандерный цикл обладает максимальным эксергетическим КПД.

Для решения данной задачи разработана программа, позволяющая определять параметры рабочего тела перед турбодетандером, при которых достигается максимальная эксергетическая эффективность турбодетандерной установки. Также данная программа позволяет осуществить выбор низкокипящего рабочего тела, обладающего максимальным эксергетическим КПД из заданного пользователем перечня.

Основная часть

Программа разработана на языке программирования Matlab [8]. Графический интерфейс программы представлен на рис. 5. Он позволяет задавать следующие исходные данные: температуру вторичных энергетических ресурсов (необходима для расчета эксергетического КПД), максимально допустимую температуру низкокипящего рабочего тела перед турбодетандером, максимально допустимое давление низкокипящего рабочего тела перед турбодетандером.

Рис. 5. Графический интерфейс программы

Перечень рабочих тел, а также характеристики оборудования, необходимые для расчета, задаются отдельно в текстовых файлах, находящихся в папке программы. В работе рассмотрены следующие низкокипящие рабочие тела (запись рабочих тел приводится в форме их записи в текстовый файл программы): R125; R134A; R152A; R227EA; R23; R236FA; R245FA; R32; R1234YF; R1234ZEE; R404A.mix; R407B.mix; R410A.mix; PROPANE; ISOBUTAN; CO₂; AMMONIA.

Эти данные автоматически считываются и анализируются программой. Если необходимо определить оптимальные с термодинамической точки зрения параметры только для одного, определенного, рабочего тела, то в документе с перечнем исследуемых рабочих тел вносится название только данного рабочего тела.

Данные, используемые программой в расчетах

Наименование показателя	Значение
КПД подогревателя сетевой воды, о. е.	0,98
Индикаторный КПД турбодетандера, о. е.	0,82
Индикаторный КПД насоса, о. е.	0,8
Индикаторный КПД котла-утилизатора, о. е.	0,98
Индикаторный КПД регенеративного теплообменного аппарата, о. е.	0,98
Механический КПД турбодетандера, о. е.	0,98
КПД генератора, о. е.	0,97
Температура низкокипящего рабочего тела на выходе из конденсатора (зависит от способа охлаждения), °C	25
Температура окружающей среды, °C	15
Атмосферное давление, КПа	101,325

Для расчета термодинамических свойств низкокипящих рабочих тел данная программа сопряжена с программой REFPROP [9], разработанной Национальным институтом стандартов и технологий США, благодаря которой и происходит определение термодинамических свойств рабочего тела.

Программа проверяет допустимость существования полученного цикла. Критерием допустимости является степень сухости низкокипящего рабочего тела в процессе расширения в турбодетандере. В случае если степень сухости рабочего тела в какой-либо точке процесса расширения не соответствует заданной, такой цикл выбраковывается.

Полученные результаты сохраняются в отдельный текстовый документ, расположенный в папке программы, в котором указывается следующая информация: максимальный эксергетический КПД, параметры рабочего тела (температура, давление), при которых эксергетический КПД достигает максимального значения, и название низкокипящего рабочего тела, обладающего наибольшим эксергетическим КПД из заданного списка.

Методика термодинамического анализа

Оценить эффективность исследуемых циклов можно при помощи эксергетического анализа, результатом которого является определение эксергетического КПД [10]–[12], о. е.:

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

где $\sum E_{\text{э}}$ – 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.

Блок-схема программы представлена на рис. 6.

Для определения эксергетического КПД необходимо определить потери эксергии в цикле. Данные потери можно представить как сумму потерь эксергии по элементам исследуемого цикла, которые, в свою очередь, в том или ином виде зависят от температуры и давления низкокипящего рабочего тела перед турбодетандером, кДж/кг:

$$\sum D(P_3, T_3) = D_{\text{КУ}}(P_3, T_3) + D_{\text{ТД}}(P_3, T_3) + D_{\text{ТО}}(P_3, T_3) + D_{\text{КД}}(P_3) + D_{\text{Н}}(P_3),$$

где $D_{\text{КУ}}$ – потери эксергии в котле-утилизаторе; $D_{\text{ТД}}$ – потери эксергии в турбодетандере; $D_{\text{ТО}}$ – потери эксергии в теплообменнике; $D_{\text{КД}}$ – потери эксергии в конденсаторе; $D_{\text{Н}}$ – потери эксергии в насосе.

Потери эксергии в котле-утилизаторе l (рис. 1), кДж/кг:

$$D_{\text{КУ}}(P_3, T_3) = E_q + E_{2'}(P_3, T_3) - E_3(P_3, T_3),$$

где E_q – эксергия дымовых газов, подводимых к котлу-утилизатору; $E_{2'}(P_3, T_3)$ – эксергия низкокипящего рабочего тела на входе в котел-утилизатор (после подогрева в теплообменном аппарате); $E_3(P_3, T_3)$ – эксергия низкокипящего рабочего тела на выходе из котла-утилизатора.

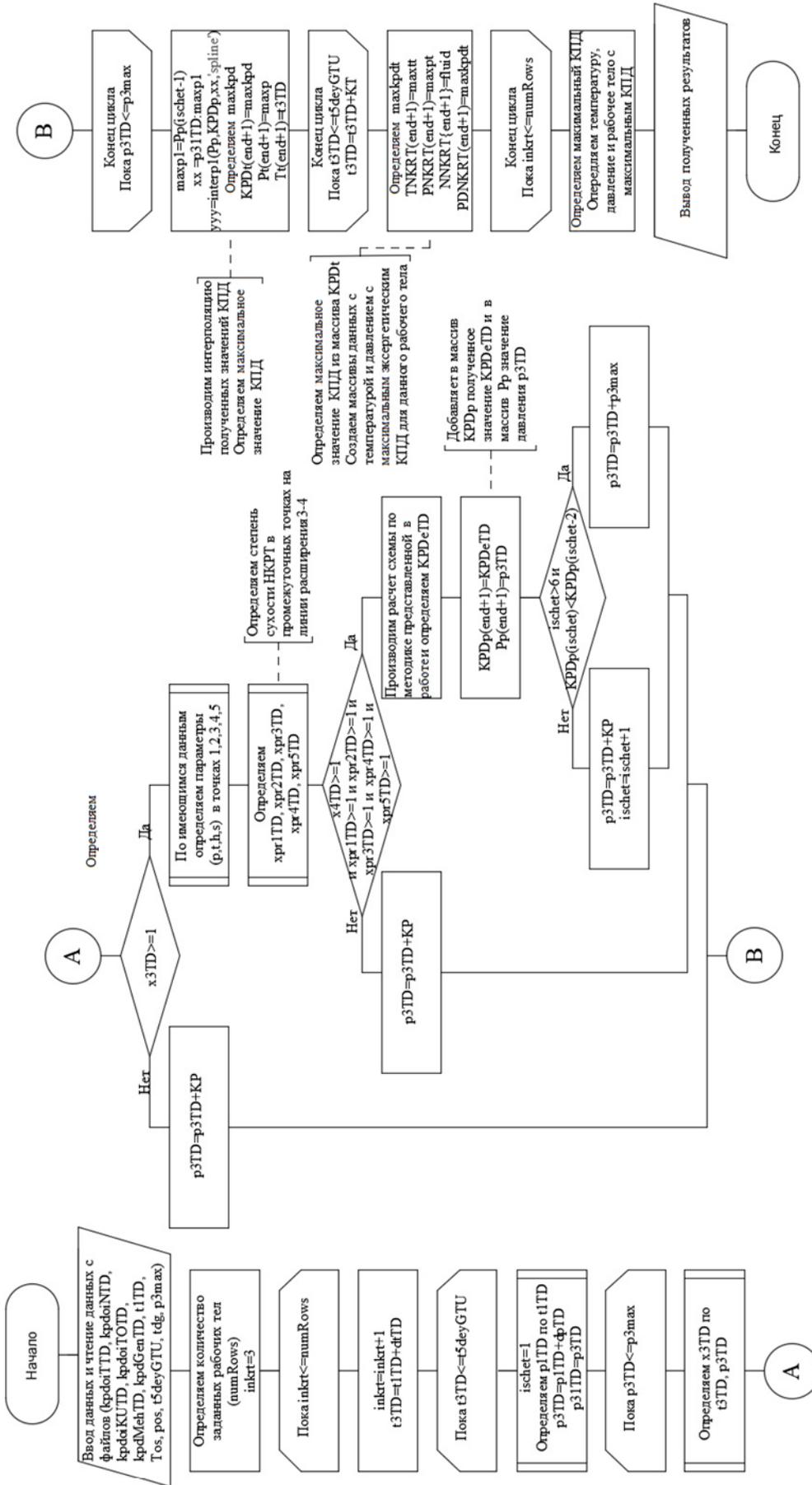


Рис. 6. Блок-схема программы

В свою очередь, эксергия тепла, подведенного в котел-утилизатор, кДж/кг:

$$E_q = Q_{\text{ш}} \eta_t^{\text{ОЦК}} = Q_{\text{ш}} \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{г.д.г}}} \right),$$

где $Q_{\text{ш}}$ – количество тепла, подведенного в котел-утилизатор с дымовыми газами; $\eta_t^{\text{ОЦК}}$ – термический КПД обратимого цикла Карно; T_0 – температура окружающей среды; $T_{\text{г.д.г}}$ – температура горячего источника тепловой энергии, в данном случае горячих дымовых газов, поступающих в котел-утилизатор.

Потери эксергии в турбодетандере 2 (рис. 1), кДж/кг:

$$D_{\text{ТД}}(P_3, T_3) = E_3(P_3, T_3) - E_4(P_3, T_3) - L_{\text{дТД}}(P_3, T_3) \eta_{\text{мезТД}} \eta_{\text{ген}},$$

где $L_{\text{дТД}}(P_3, T_3)$ – действительная работа, совершаемая в турбодетандере; $E_4(P_3, T_3)$ – эксергия НКРТ на выходе из турбодетандера; $\eta_{\text{мезТД}}$ – механический КПД турбодетандера; $\eta_{\text{ген}}$ – КПД генератора.

Действительная работа, совершаемая в турбодетандере, кДж:

$$L_{\text{дТД}}(P_3, T_3) = (h_3(P_3, T_3) - h_4(P_3, T_3)) G_{\text{НКРТ}},$$

где $G_{\text{НКРТ}}$ – расход низкокипящего рабочего тела в цикле.

Потери эксергии в теплообменном аппарате 6 (рис. 1), кДж/кг:

$$D_{\text{ТО}}(P_3, T_3) = (E_4(P_3, T_3) - E_5(P_3)) - (E_2(P_3, T_3) - E_2(P_3)),$$

где $E_5(P_3)$ – эксергия паров НКРТ после охлаждения в теплообменном аппарате.

Потери эксергии в конденсаторе 4 (рис. 1), кДж/кг:

$$D_{\text{кд}}(P_3) = E_5(P_3) - E_1,$$

где E_1 – эксергия НКРТ на выходе из конденсатора.

Потери эксергии в насосе 5 (рис. 1), кДж/кг:

$$D_{\text{н}}(P_3) = L_{\text{дн}}(P_3) - (E_2(P_3) - E_1),$$

где $L_{\text{дн}}$ – действительная работа, совершаемая насосом.

Действительная работа, совершаемая насосом, кДж:

$$L_{\text{дн}}(P_3) = (h_2(P_3) - h_1) G_{\text{НКРТ}}.$$

Заключение

При помощи разработанной программы произведен расчет оптимальных с термодинамической точки зрения параметров и выбор рабочего тела (из списка, представленного в работе), обладающего наибольшим эксергетическим КПД. Из результатов видно, что наибольшим эксергетическим КПД из исследуемых низкокипящих рабочих тел обладает изобутан (ISOBUTAN), при этом максимальный эксергетический КПД 50,26 % достигается при следующих параметрах: температура рабочего тела перед турбодетандером 250 °С (максимально допустимая по условиям рис. 5), давление рабочего тела перед турбодетандером 6,99 МПа. Другие рассматриваемые рабочие тела обладают меньшим эксергетическим КПД.

Таким образом, программа позволяет термодинамически оптимизировать параметры рабочего тела на входе в турбодетандер, определять наибольший эксергетический КПД, получать значения оптимальных параметров рабочего тел, а также выбрать рабочее тело с наибольшим эксергетическим КПД.

Литература

1. Овсянник, А. В. Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода / А. В. Овсянник // Современные проблемы машиноведения (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому) : 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, Филиал ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2018. – С. 237–239.
2. Ключинский, В. П. Тригенерационные турбодетандерные установки на основе низкокипящих рабочих тел / В. П. Ключинский, А. В. Овсянник // 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 : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – С. 329–331.
3. 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.
4. Technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation / F. Velez [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2012. – Vol. 16, No. 6. – P. 4175–4189.
5. Овсянник, А. В. Турбодетандерная установка на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты / А. В. Овсянник // Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – 2019. – № 62 (1). – С. 77–87.
6. Белов, Г. В. Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике / Г. В. Белов, М. А. Дорохова // Наука и образование. – 2014. – № 2. – С. 99–124.
7. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems / S. Quoilin [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – Vol. 22. – P. 168–186.
8. Matlab. – Режим доступа: <https://exponenta.ru/matlab>. – Дата доступа: 05.03.2020.
9. NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP): Version 10. – Режим доступа: <https://www.nist.gov/srd/refprop>. – Дата доступа: 10.03.2020.
10. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. – М. : Энергия, 1973. – 295 с.
11. 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.
12. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. – М. : Энергия, 1968. – 280 с.

Получено 01.10.2020 г.