

УДК 621.438

## МЕТОДИКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАСТИНЧАТЫХ РЕКУПЕРАТОРОВ В МАЛОРАЗМЕРНЫХ ГТУ

Ильичев В.Ю., Лужецкий А.А.

*Калужский филиал ФГОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Калуга, e-mail: patrol8@yandex.ru*

Малоразмерные газотурбинные установки находят всё большее применение. Основной проблемой при их проектировании является повышение КПД. Этого можно достичь путём добавления в цикл ГТУ рекуператоров. Статья посвящена разработке методики технико-экономического обоснования применения пластинчатых рекуператоров в малоразмерных ГТУ. Такая методика необходима для выбора оптимальной степени регенерации цикла, исходя из существующих для компактных теплообменников ограничений по габаритам и достижения наиболее быстрой их окупаемости. Рекуператор является сложным объектом, поэтому его оптимизация невозможна без применения современных программных средств. В качестве среды для создания программы многовариантного расчёта рекуператора выбран язык Python, для которого существуют специальные библиотеки: для определения теплофизических свойств воздуха и продуктов сгорания CoolProp, создания пользовательского программного интерфейса Tkinter, вывода результатов в виде графиков Matplotlib. Описана последовательность расчёта характеристик рекуператора для ГТУ 9И113М0,2 в зависимости от степени регенерации. Результаты расчёта характеристик выведены в виде графиков, путём анализа которых выбрана оптимальная степень регенерации цикла. Далее приводится порядок расчёта срока окупаемости рекуператора, исходя из его стоимости и стоимости сэкономленного топлива. Использование методики, изложенной в статье, даёт проектировщику газотурбинных установок удобный инструмент для технико-экономического обоснования применения пластинчатых рекуператоров в циклах ГТУ. В заключение сделаны выводы о проделанной работе, приведены планы дальнейшего совершенствования рассмотренной методики.

**Ключевые слова:** газотурбинная установка, регенеративный цикл, пластинчатый рекуператор, технико-экономическое обоснование, язык Python, модуль CoolProp

## PROCEDURE FOR FEASIBILITY STUDY OF USE OF PLATE RECUPERATORS IN SMALL-SIZED GTU

Ilichev V.Yu., Luzhetskiy A.A.

*Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, e-mail: patrol8@yandex.ru*

Small-sized gas turbine plants are increasingly being used. The main problem in their design is the improvement of efficiency. This can be achieved by adding recuperators to GTU cycle. Article is devoted to the development of a method of feasibility study for use of plate recuperators in small GTU. This technique is necessary to select optimal cycle regeneration rate based on the size limitations of compact heat exchangers and to achieve fastest payback. Recuperator is a complex object, so its optimization is impossible without the use of modern software. As an environment for creating a multi-variable recuperator calculation program, Python language has been chosen, for which there are special libraries: to determine the thermophysical properties of air and combustion products CoolProp, to create user program interface Tkinter, to output results in the form of graphs Matplotlib. Sequence of recuperator characteristics calculation for GTU 9I113M0,2 is described depending on degree of regeneration. Results of the calculation of characteristics are displayed in the form of graphs, by the analysis of which the optimal degree of cycle regeneration is chosen. Following is the procedure for calculating the payback period of the recuperator, based on its cost and the cost of saved fuel. Using the technique set forth in the article gives the designer of gas turbine plants a convenient tool for a feasibility study of use of plate recuperators in GTU cycles. Conclusions on the work done are made, plans for further improvement of the considered methodology are given.

**Keywords:** gas turbine plant, regenerative cycle, plate recuperator, feasibility study, Python language, module CoolProp

В современной энергетике всё большую часть рынка занимают маломощные газотурбинные установки (ГТУ мощностью до 1 МВт), так как они отличаются компактностью, относительно низкой стоимостью и могут использоваться в качестве автономных источников электроэнергии для промышленных и бытовых потребителей в случаях, когда подключение к единой энергосети нерентабельно или невозможно. Эта ситуация характерна, например, для отдалённых регионов, где отсутству-

ет централизованное энергоснабжение, или для небольших предприятий, фермерских хозяйств и т.п. [1].

Актуальной проблемой при создании малоразмерных ГТУ является повышение КПД термодинамического цикла. Для увеличения КПД применяются сложные циклы, например с регенерацией (с применением теплообменников – рекуператоров) [2]. КПД повышается за счёт возвращения части тепла продуктов сгорания в цикл путём передачи его воздуху, поступающему

из компрессора в камеру сгорания. За счёт повышения КПД установки снижается расход топлива для выработки заданной мощности (расходы при эксплуатации ГТУ).

Однако при использовании рекуператора в составе цикла увеличивается металлоёмкость и, как следствие, стоимость ГТУ (капитальные вложения) [3].

В малоразмерных установках чаще всего применяются рекуператоры пластинчатого типа [4], так как они отличаются простотой конструкции, относительной дешевизной и хорошей масштабируемостью (то есть теплообменники разных габаритов могут иметь одну и ту же конструкцию) [5], высокой тепловой эффективностью и поэтому сравнительно небольшой удельной (на единицу объёма) площадью теплопередающей поверхности.

В данной работе объектом исследования [6] является пластинчатый рекуператор малоразмерной ГТУ, параметры которого необходимо оптимизировать для увеличения технико-экономического эффекта.

Технико-экономический эффект характеризуется в рассматриваемом случае сроком окупаемости капитальных вложений на добавление в цикл ГТУ рекуператора, за счёт уменьшения затрат на топливо.

Факторами оптимизации являются габариты рекуператора, которые ограничены размерами ГТУ, а также его стоимость, которая увеличивается при повышении степени регенерации  $r$  и зависит от применяемого его для изготовления материала. С другой стороны, при увеличении  $r$  уменьшаются затраты на топливо, т.к. повышается КПД установки.

Таким образом, целью описываемого исследования являлась разработка методики определения стоимости и срока окупаемости пластинчатого рекуператора для малоразмерной газотурбинной установки (при известных её характеристиках) при ограниченных габаритах.

На основе разработанной методики необходимо рассчитать пример технико-экономического обоснования применения пластинчатого рекуператора для конкретной ГТУ.

#### Материалы и методы исследования

Разработанный метод технико-экономического обоснования состоит из нескольких этапов:

1. Тепловой расчёт рекуператора с целью определения основных размеров поверхностей теплообмена при варьировании степени регенерации  $r$ .

2. Определение стоимости рекуператора в зависимости от  $r$  и материала теплопе-

редающих поверхностей, с последующим выбором наиболее подходящего материала.

3. Определение КПД цикла при разных значениях  $r$  и соответствующей экономии топлива.

4. Выбор степени регенерации цикла в зависимости от вышеуказанных факторов.

5. Расчёт срока окупаемости рекуператора.

Исходя из последовательности расчёта теплообменной поверхности рекуператора, описанной в [7], авторами была разработана программа на высокоуровневом универсальном языке программирования Python [8]. Теплофизические свойства воздуха и продуктов сгорания определялись с помощью подключаемого модуля CoolProp [9]. Также использовались библиотеки команд для создания пользовательского интерфейса Tkinter и для вывода качественной графической информации Matplotlib.

С учётом вышеизложенного программа для расчёта характеристик пластинчатых рекуператоров на языке Python должна содержать блоки, реализующие следующие функции:

1) подключение библиотек команд CoolProp, Tkinter, Matplotlib, Math (для использования специальных математических функций);

2) создание пользовательского интерфейса программы для ввода исходных данных и кнопок для вычисления необходимых функций;

3) импорт значений из полей ввода данных и присвоение их переменным;

4) расчёт характеристик рекуператора в цикле для разных значений степени регенерации;

5) визуализация рассчитанных зависимостей в виде графиков.

Интерфейс созданной программы приведён на рис. 1.

В поля программы введены характеристики малоразмерного двигателя ГТУ 9И113М0,2 (топливо – природный газ), производства ПАО «КАДВИ», предоставленные производителем. Соответственно, и далее будет описываться процедура технико-экономического обоснования проектирования пластинчатого рекуператора именно для этой ГТУ (хотя программа является универсальной). В нижней части интерфейса введены характеристики одного из возможных материалов для изготовления листов рекуператора – стали 15Х2М2ФБС.

После нажатия кнопки «Зависимость площади поверхности теплообмена от степени регенерации» проводится расчёт, и строится данная зависимость, приведённая на рис. 2.

Расчёт пластинчатого рекуператора

Параметры теплоносителей на входе в рекуператор:

Параметры воздуха:	Параметры продуктов сгорания:
Расход: 1.968, кг/с	Расход: 2.100, кг/с
Давление: 0.557, МПа	Давление: 0.11, МПа
Температура: 200.0, °C	Температура: 510.0, °C
Потери давления: 0.9, %	Потери давления: 3.75, %
Площадь прохода каналов: 0.004, м <sup>2</sup>	Площадь прохода каналов: 0.004, м <sup>2</sup>
Периметр каналов: 2.008, м	Периметр каналов: 2.008, м

Толщина листа: 1.0, мм  
 Коэф. теплопроводности листа: 34.8, Вт/(м·К)  
 Отнош. ширины листа по воздуху/прод.сг.: 1.25  
 Плотность материала листа: 7850, кг/м<sup>3</sup>  
 Стоимость кг материала листа: 90, руб/кг

Зависимость площади поверхности теплообмена от степени регенерации

Зависимость пути продуктов сгорания от степени регенерации

Зависимость стоимости поверхности теплообмена от степени регенерации

Рис. 1. Интерфейс программы для расчёта характеристик пластинчатого рекуператора

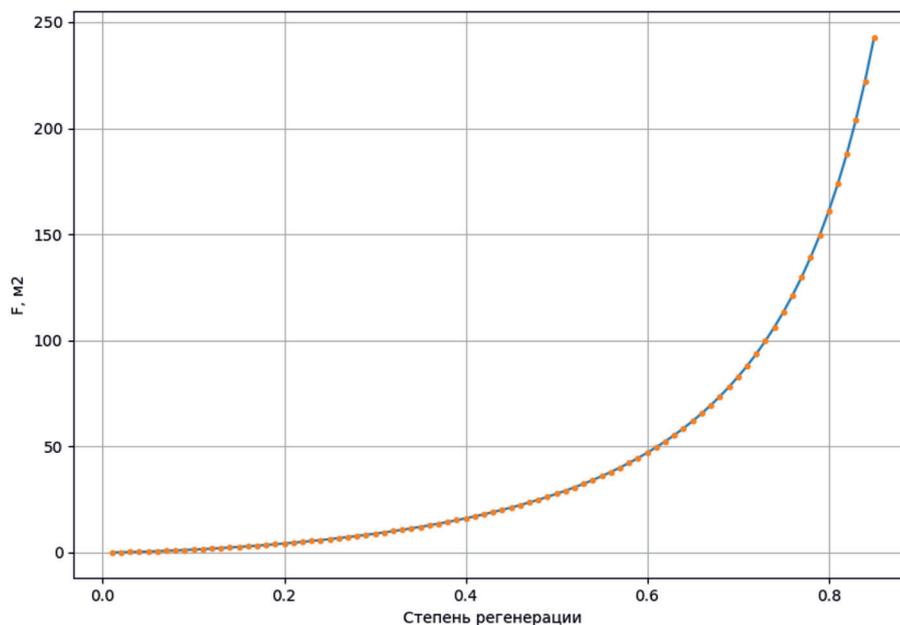


Рис. 2. Зависимость площади поверхности теплообмена от степени регенерации

На следующем этапе исследований созданная программа использовалась для расчёта зависимости стоимости теплообменной поверхности рекуператора от степени регенерации. На этой стадии оптимизации

важно выбрать материал, наиболее выгодный по стоимости при заданной  $r$  (так как материалы обладают различной теплопроводностью, плотностью и удельной стоимостью) из следующих, широко применя-

емых: сплав 08X17T (1), сплав 15X25T (2), сплав 36X18H25C2 (3), сталь 12ХМФ (4), сталь 15X2M2ФБС (5).

Указанные в скобках номера материалов соответствуют номерам графиков на рис. 3.

Исходя из полученных зависимостей, можно сделать вывод, что теплообменная поверхность, изготовленная из стали 15X2M2ФБС, при любой степени регенерации имеет наименьшую стоимость, поэтому все дальнейшие вычисления производились только для этого материала.

Следующая функция программы – определение зависимости количества проходных каналов от степени регенерации (график в статье не приводится) – позволяет по известным размерам каждого листа (приведены на рис. 1) и общей площади

поверхности теплообмена (рис. 2) определить габариты рекуператора.

### Результаты исследования и их обсуждение

Исходя из требований ограничения габаритов теплообменника, была выбрана степень регенерации  $r = 0,7$ . Габаритные размеры пакета пластин при этом составляют 600x400x600 мм.

Далее необходимо определить срок окупаемости рекуператора. Исходя из того что стоимость пакета пластин составляет примерно 15% от общей стоимости рекуператора, можно рассчитать стоимость рекуператора в зависимости от коэффициента регенерации.

Затем требуется рассчитать КПД цикла при различных  $r$  по формуле из [10]:

$$\eta_{\text{рег}} = \frac{\left(1 - \frac{1}{\pi^m}\right) \cdot \left(\frac{1}{\eta_k}\right) \cdot (\pi^m - 1)}{(1 - r) \cdot \left[ \left(1 - \eta_T \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi^m}\right)\right) - \frac{1}{\tau} \left(1 + \frac{1}{\eta_k}\right) (\pi^m - 1) \right]} \cdot \eta_{\text{кс}},$$

где  $m$  – показатель адиабаты;

$\pi$  и  $\tau$  – степень повышения давления и температуры воздуха в компрессоре;

$\eta_k, \eta_T, \eta_{\text{кс}}$  – КПД компрессора, турбины, камеры сгорания.

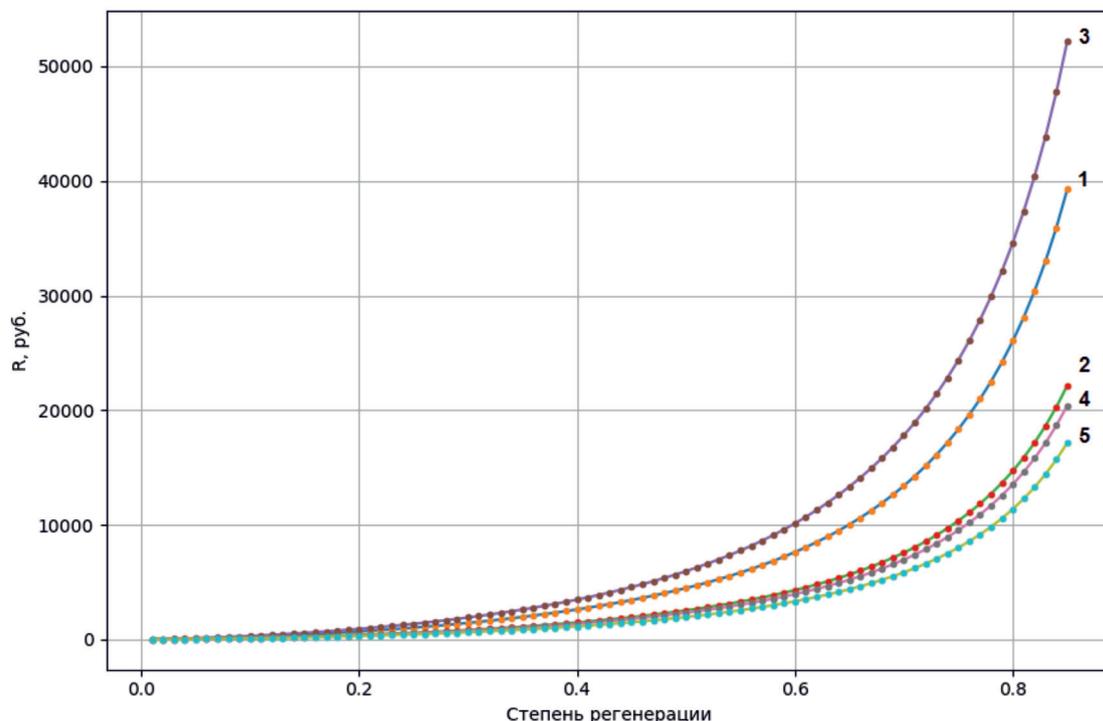


Рис. 3. Зависимость стоимости поверхности теплообмена от степени регенерации

Полученная по формуле зависимость КПД регенеративного цикла от степени регенерации для установки 9И113М0,2 приведена на рис. 4.

При увеличении КПД цикла  $\eta_{\text{рег}}$  расход топлива  $G_T$  уменьшается:

$$G_T = \frac{N_{\text{ГТУ}}^{\text{э}}}{\eta_{\text{рег}} \cdot \eta_{\text{г}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot \rho_{\text{г}}},$$

где  $N_{\text{ГТУ}}^{\text{э}}$  – номинальная электрическая мощность ГТУ;

$\eta_{\text{г}}$  – КПД электрогенератора;

$Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  и  $\rho_{\text{г}}$  – низшая теплота сгорания и плотность топливного газа (определяются с помощью модуля Coolprop программного кода

Python при известном составе природного газа).

Определив уменьшение расхода топлива за счёт повышения КПД цикла с регенерацией (рис. 4), рассчитываем суточную экономию денежных средств, затрачиваемых на топливо (зная цену природного газа и задавая суточным временем работы ГТУ, равным 20 часам).

Срок окупаемости дополнительного устройства – рекуператора в цикле ГТУ можно определить, сравнивая стоимость рекуператора и сумму сэкономленных денежных средств за счёт уменьшения расхода топлива. Результаты определения срока окупаемости рекуператора при различных степенях регенерации приведены на рис. 5.

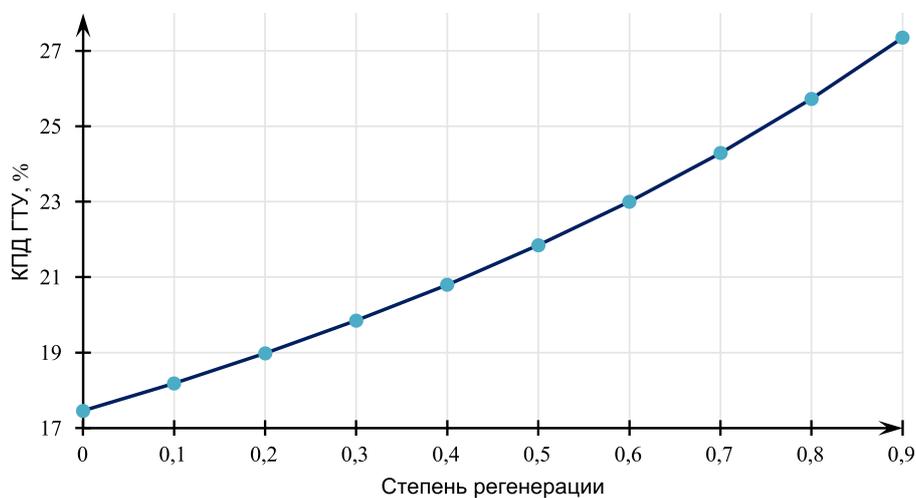


Рис. 4. График зависимости КПД цикла от степени регенерации

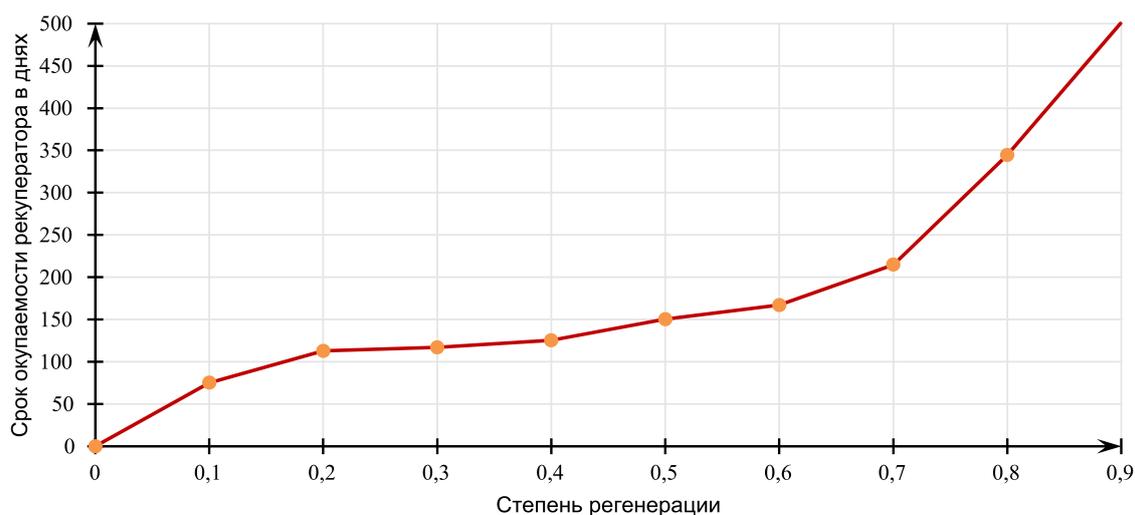


Рис. 5. График зависимости срока окупаемости пластинчатого рекуператора от степени регенерации

Из графика видно, что срок окупаемости увеличивается с повышением степени регенерации – это связано с большим темпом увеличением площади поверхности теплообмена и соответствующей стоимости рекуператора по сравнению с повышением КПД цикла и соответствующей экономией денежных средств на топливный газ.

### Заключение

Таким образом, в результате проведённого исследования разработана методика и программа расчёта характеристик пластинчатого рекуператора.

Расчёт рекуператора для малоразмерной ГТУ 9И113М0,2 позволил сделать следующие выводы.

1. При увеличении степени регенерации увеличивается площадь теплообмена, количество материала для изготовления пластин, габариты и стоимость рекуператора. Для малоразмерных ГТУ степень регенерации приходится ограничивать, исходя из предельных размеров рекуператора. По полученным зависимостям стоимостей поверхности теплообмена от степени регенерации сталь 15Х2М2ФБС является наиболее выгодным из рассмотренных материалов.

2. Разработанная программа позволяет рассчитывать и подбирать указанные выше параметры пластинчатых рекуператоров для различных ГТУ.

3. Для рассчитанного рекуператора при выбранной степени регенерации 0,7 срок окупаемости составляет 215 дней. Анализируя рис. 4, видим, что при отсутствии ограничений по габаритам рекуператор выгодно применять в цикле ГТУ и при больших степенях регенерации, так как рекуператор всё равно окупается, хоть и за больший срок.

4. Созданная в ходе описанных исследований методика позволяет произвести технико-экономическое обоснование применения пластинчатых рекуператоров

для совершенствования любой газотурбинной установки.

На следующем этапе исследований для удобства расчётов необходимо добавить в созданную программу расчёта пластинчатого рекуператора функции расчёта срока его окупаемости и экономического эффекта с учётом разных типов используемого топлива.

### Список литературы

1. Беляев В.Е., Беляева С.О., Трофимович И.В. Применение малоразмерных ГТУ в системах децентрализованного энергоснабжения // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. Т. 3. № 2 (45). С. 59–61.
2. Кузьмичёв В.С., Омар Х.Х., Ткаченко А.Ю. Способ повышения эффективности газотурбинных двигателей для наземного применения за счет регенерации тепла // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 4. С. 133–141.
3. Завальный Ф.Г., Ильичев В.Ю., Шевелев Д.В. Технико-экономическое обоснование применения газотурбинных двигателей на маневровых локомотивах // Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 2. С. 10–14.
4. Ардагов К.В., Нестеренко В.Г., Равикович Ю.А. Классификация высокоэффективных рекуператоров газотурбинных двигателей // Труды МАИ. 2013. № 71. С. 13.
5. Сафонов Е.В., Бромер К.А., Шулев И.С., Шульц А.О. Особенности конструкции эффективных рекуператоров микрогазотурбинных энергоустановок // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2013. Т. 13. № 2. С. 63–67.
6. Ли Г.Т. Основы научных исследований // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 1–1. С. 61–62.
7. Аронсон К.Э., Блинков С.Н., Брезгин В.И., Бродов Ю.М., Купцов В.К., Ларионов И.Д., Ниренштейн М.А., Плотников П.Н., Рябчиков А.Ю., Хаеи С.И. Теплообменники энергетических установок. Екатеринбург: УрФУ, 2015. [Электронный ресурс]. URL: <https://openedu.urfu.ru/files/book/index.html> (дата обращения: 10.01.2021).
8. Ильичев В.Ю., Юрик Е.А. Создание программы расчёта упорных подшипников скольжения на языке Python // Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 3. С. 14–18.
9. Coolprop. IF97 Steam/Water Properties. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.coolprop.org/fluid\\_properties/IF97.html](http://www.coolprop.org/fluid_properties/IF97.html) (дата обращения: 10.01.2021).
10. Иваник С.А., Ерошкин С.О. Анализ эффективности использования регенеративного цикла ГТУ // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: сборник материалов III Международной научно-практической конференции. 2019. С. 222–225.