

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ СТИРЛИНГА В ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

кандидат технических наук, доцент **Е.А. Тихонов**

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск, Российская Федерация

В данной статье рассматривается проблема энергетического обеспечения лесозаготовительных предприятий. Обозначены соответствующие сложности: удаленность энергетических коммуникаций, высокая стоимость работ по подключению к магистральным энергосетям при их наличии вблизи лесосеки. Большинство удаленных лесосечных участков снабжается электроэнергией посредством дизельных электростанций. Это влечет за собой ряд проблем: высокая стоимость 1кВт·час, затраты на доставку запасов топлива. В связи с этим рассматривается возможность применения двигателя Стирлинга для решения ряда задач в лесной отрасли. В первую очередь – энергетических (электрогенератор на базе двигателя Стирлинга), позволяющих более эффективно использовать имеющееся на лесосеках и деревоперерабатывающих предприятиях биотопливо. Рассмотрены возможные схемы применения двигателя Стирлинга. Когенерация – утилизация вторичного тепла от котлов отопления, системы охлаждения двигателей и отработанных газов сушильных камер. Прямая генерация – работа двигателя Стирлинга на различных видах биотоплива. Определен диапазон требуемых мощностей электростанции на базе двигателя Стирлинга для эксплуатации в условиях лесозаготовительных предприятий. Проанализированы основные кинематические схемы двигателя Стирлинга: α -тип; β -тип и γ -тип. Определен наиболее подходящий вариант для эксплуатации в условиях лесозаготовительных предприятий – α -тип. В качестве рабочего тела выбран воздух. Проанализированы основные сложности при разработке и проектировании двигателей Стирлинга. Отсутствие разработанной методики расчета и экспериментального опыта показало необходимость комплексного анализа конструктивных параметров и процессов тепломассопереноса для разработки двигателя наилучших характеристик. Определены задачи дальнейших исследований: комплексное многопараметрическое численное моделирование работы двигателей Стирлинга различных диапазонов мощностей и определение оптимальных конструктивных параметров для успешного внедрения в лесопромышленную отрасль электростанций на базе двигателя Стирлинга.

Ключевые слова: лесная промышленность, утилизация отходов, биотопливо, двигатель Стирлинга.

APPLICATION PROSPECTS OF STIRLING ENGINES IN FOREST COMPLEX

PhD (Engineering), Associate Professor **E.A. Tikhonov**

FSBEI HE Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russian Federation

Abstract

This article deals with the problem of energy supply for logging enterprises. Corresponding difficulties are indicated: remoteness of energy communications, high cost of work on connecting to the main power grids, if they are available near the cutting area. Most remote logging areas are powered by diesel power plants. This entails a number of problems: the high cost of 1 kW · hour, the cost of fuel stocks transportation. In this regard, the possibility of using the Stirling engine for solving a number of problems in the forest industry is being considered. First of all, energy (an electric generator based on a Stirling engine), enables more efficient use of biofuel which is available at logging sites and wood processing enterprises. The possible schemes of the Stirling engine application are considered. Cogeneration is utilization of secondary heat from boilers for heating, engine cooling system and exhaust gases of drying chambers. Direct generation is the operation of the Stirling engine on various types of biofuels. The range of required power of a power plant based on a Stirling engine has been determined for operation in the conditions of logging enterprises. The main kinematic schemes of the Stirling engine are analyzed: α -type; β -type and γ -type. The most suitable option for

operation in the conditions of logging enterprises (α -type) is determined. Air is chosen as the working medium. The main difficulties in developing and designing Stirling engines are analyzed. The lack of a developed calculation methodology and experimental experience has shown the need for a comprehensive analysis of design parameters and heat and mass transfer processes for developing an engine with the best characteristics. The tasks of further research are defined: complex multiparameter numerical simulation of the operation of the Stirling engines of various power ranges and determination of optimal design parameters for successful implementation of power plants based on Stirling engine in the timber industry.

Keywords: Forest industry, waste disposal, biofuel, Stirling engine.

Введение

В настоящее время заготовка древесины связана с освоением площадей, все более удаленных от основных объектов инфраструктуры. В связи с этим в себестоимости заготовки растет транспортная составляющая [10]. Эта часть себестоимости связана не только с транспортировкой непосредственно леса. Значительная часть логистических затрат расходуется на доставку дизельного топлива, в том числе для электрогенераторных установок, обеспечивающих жизнедеятельность отдаленных лесных участков [8]. Дизель-генератор часто является единственным доступным источником электрической энергии на лесозаготовительных объектах. Более того, в различных регионах России, особенно в арктической и субарктической зонах, существуют целые населенные пункты, единственным источником электроэнергии для которых является дизельная электростанция (ДЭС). Например, только в Иркутской области около 100 населенных пунктов снабжаются электроэнергией 6 часов в сутки от ДЭС. Стоимость такой электроэнергии в 13,5 раз выше, чем стоимость сетевой электроэнергии [9].

Подключение к сетевой энергосистеме лесозаготовительных предприятий не является решением вопроса, даже при относительной близости линий электропередач. Это связано с высокой стоимостью подключения (согласование и проектные работы) и мобильным характером инфраструктуры лесозаготовок. Поэтому на сегодняшний день ДЭС применяются повсеместно. Подобная схема электрообеспечения имеет следующие недостатки: неэкологичность, шумность, необходимость транспортировки и правильного хранения запасов топлива, высокую стоимость 1 кВт·час электроэнергии (для

получения 1 кВт·час сжигается 0,2 л дизельного топлива [7]).

Одним из путей решения данной проблемы является разработка и внедрение линейки генераторов различной мощности на базе двигателя Стирлинга. Двигатели Стирлинга известны с начала XIX века [15], их разработка и совершенствование основывались на базовых принципах термодинамики и огромном объеме экспериментальных исследований, которые выполнялись фирмами «Филипс», «Форм моторс», «Юнайтед Стирлинг» и «МАН» [14]. Наиболее совершенными моделями были двигатели GPU-3 и P-40 фирм «Филипс» и «Юнайтед Стирлинг». Однако данные двигатели не смогли выдержать темпы развития обладающих отлично разработанной теоретической базой двигателей внутреннего сгорания. На сегодняшний момент КПД двигателей Стирлинга ниже, чем КПД дизельных двигателей той же мощности. В то же время, в разрезе рассматриваемой проблемы, следует учитывать, что топливом для двигателя Стирлинга может служить древесная биомасса, в избытке имеющаяся на каждой лесосеке [12]. Технологические возможности и схемы заготовки с дальнейшим сжиганием щепы для привода двигателей внешнего сгорания рассмотрены в ряде публикаций Анисимова и Онучина [5]. Данные работы ограничиваются теоретическими выкладками, обосновывающими целесообразность использования двигателей Стирлинга, и не имеют реального воплощения.

Данный вид топлива отлично подойдет в качестве источника энергии для электростанции на базе двигателя Стирлинга (СЭС).

По нашему мнению, внедрение СЭС на лесозаготовительных предприятиях позволит повысить экономическую и экологическую эффективность

отрасли. В сравнении с ДЭС, СЭС будут иметь следующие достоинства: экологичность, низкая шумность, отсутствие необходимости доставки дорогостоящего топлива.

В настоящее время на рынке не представлены СЭС, или серийные двигатели, удовлетворяющие условиям эксплуатации лесозаготовительных предприятий. Серийное производство промышленных двигателей Стирлинга пока не освоено ни в одной стране мира. Хотя они серийно производились в XIX веке, до повсеместного внедрения ДВС [16]. Существуют экспериментальные образцы, а также двигатели для специфических нужд, например, силовая установка для подводных лодок [2]. Двигатели Стирлинга специального назначения производятся серийно для военно-промышленного комплекса и космической отрасли. Для разработки неприменимы в других отраслях в виду дороговизны и специфических условий работы.

Практически все опубликованные работы по двигателям Стирлинга носят исключительно теоретический характер, и в очень редких случаях дело доходит до действующего лабораторного образца.

Что касается лесопромышленного комплекса, то все работы в данном направлении сходятся на том, что внедрение энергетических установок на базе двигателей Стирлинга, работающих на биотопливе – актуальное направление прикладных исследований. Но, к сожалению, на сегодняшний момент никаких практических наработок в данном направлении нет.

В связи с этим необходима разработка СЭС, работающего на древесном биотопливе, практически с нуля. Для этого потребуются значительные ресурсы, и перед тем как начинать работу, необходимо оценить потенциал данной идеи, возможность более широкого использования СЭС на всех стадиях лесозаготовительной и деревоперерабатывающей отрасли. Для оценки сравнительной эффективности СЭС нужно определиться с рядом вопросов: принципиальная схема установки, тип двигателя Стирлинга, диапазон рабочих мощностей, рабочее тело, приемлемый КПД.

Методы и материалы

Наиболее эффективной схемой применения СЭС-установки является когенерация [6], когда тепловая энергия от основного двигателя или другого источника вторичного тепла используется как дополнительный источник нагрева рабочего тела в двигателе Стирлинга. В условиях лесозаготовительных предприятий таким источником могут быть: котлы системы отопления, отработанные газы сушильных агрегатов и непосредственно ДЭС. Основным же источником тепла будет являться твердое биотопливо, имеющееся в доступе в достаточных количествах: опилки, щепа, торф, кора и др. отходы лесозаготовки. В определенных случаях возможен вариант чистой когенерации (например, предприятия деревообработки). Средние температуры данных источников тепла приведем в табл. 1 [3, 1, 11]. Исходя из вышесказанного, сформируем перечень возможных схем применения СЭС в условиях лесозаготовительных предприятий:

Когенерационные схемы:

- ДЭС – СЭС;
- котел отопительный – СЭС;
- газы сушильных камер – СЭС.

Схемы прямой генерации (по видам источника тепла):

- отходы лесозаготовки;
- щепа;
- кора;
- опилки.

Далее определим требуемый диапазон мощностей для обеспечения производственной площадки лесозаготовительного предприятия. Для оценки будем опираться на зимний период. Основные группы потребителей следующие: жилые помещения (бытовки), освещение площадки, строения инженерного обеспечения. Ориентировочные потребляемые мощности и количество указаны в табл. 2.

Далее необходимо определиться с типом двигателя Стирлинга. На сегодняшний момент существуют 3 основные схемы двигателя Стирлинга [15]: α -тип; β -тип; γ -тип.

Также есть множество различных схем двигателей Стирлинга, комбинирующих базовые типы и применяющих другие принципы (например,

гибридные схемы [13]). Схемы двигателей представлены на рис. 1.

Принцип действия двигателя Стирлинга любого типа одинаков и подробно изложен в литературе [9]. Критерии сравнительного анализа

данных схем можно представить следующие: возможность полной балансировки, удельная мощность, конструктивная сложность, реально достижимый КПД [17]. Результаты анализа представлены в табл. 3.

Таблица 1

Средние температуры горения источников тепла

№	Тип источника	Температура, С°	Удельная теплота сгорания, МДж/кг
Основные источники тепла			
1	Опилки нормальной влажности (сосна, береза)	400	8,37
2	Щепа	450	10,93
3	Кора	450	5,69
4	Отходы лесозаготовки	350	8,12
Вторичные источники тепла			
6	Отработанные газы сушильных камер	70	-
7	Котлы системы отопления	800	-
8	Система охлаждения ДЭС	130	-

Таблица 2

Объекты энергопотребления лесозаготовительного предприятия

	Группа потребителей	Количество		Потребляемая мощность, кВт	Суммарная потребляемая мощность, кВт	
		минимум	максимум		минимум	максимум
1	Бытовка 6x2,5	4	25	2	8	50
2	Прожектор освещения	2	12	0,1	0,2	1,2
3	Инженерный модуль	1		3	3	
ИТОГО:					11,2	54,2

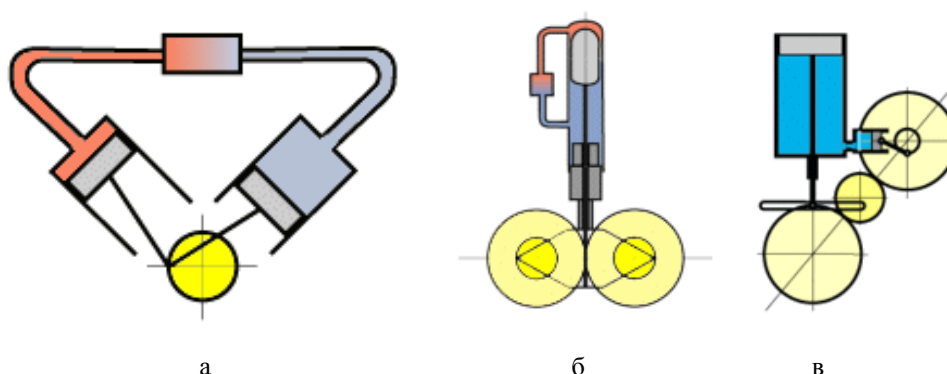


Рис. 1. Основные схемы двигателя Стирлинга:

а – α -тип; б – β -тип; в – γ -тип

Анализ различных схем двигателя Стирлинга

№	Тип двигателя	Полная балансировка	Удельная мощность	Конструктивная сложность	КПД
1	α -тип	нет	средняя	низкая	высокий
2	β -тип	да	высокая	высокая	средний
3	γ -тип	нет	низкая	высокая	низкий

Рабочее тело, используемое в двигателях Стирлинга, может быть реализовано с применением различных газов: воздух, кислород, гелий, водород [3]. При этом наиболее эффективным будет применение гелия и водорода [8]. Основную сложность при применении гелия и водорода составляет высокая диффузия этих газов через металлы и уплотнения. В целом вопрос герметизации рабочего тела является одной из фундаментальных проблем повышения эффективности двигателей Стирлинга.

Результаты и обсуждение

Оптимальной схемой для реализации СЭС в условиях лесозаготовительных предприятий является схема прямой генерации, адаптированная для использования отходов лесозаготовки.

При эксплуатации СЭС в условиях лесоперерабатывающих предприятиях подойдет когенерационная схема, в которой для привода СЭС используется тепло отопительных котлов, работающих на щепе, коре и опилках. Использование тепла газов сушильных камер не представляется перспективным в виду недостаточно высокой температуры этих газов.

Согласно табл. 2, определим требуемый диапазон мощностей СЭС от 12 до 60 кВт.

Исходя из анализа различных схем двигателя Стирлинга, наиболее перспективным для дальнейшей проработки является α -тип. Низкая конструктивная сложность и возможность значительного разнесения горячего и холодного цилиндров позволят получить высокие эксплуатационные показатели в условиях лесозаготовительных предприятий при обеспечении приемлемого ресурса и надежности.

Применение в качестве рабочего тела любых газов, кроме атмосферного воздуха, влечет за собой как фундаментальные проблемы (утечки рабочего

тела), так и необходимость доставки запасов газа к месту эксплуатации СЭС, что по затратам может сравниться с доставкой топлива для ДЭС.

Выводы

Двигатель Стирлинга как привод генератора электростанции, эксплуатирующийся в условиях лесозаготовительных предприятий, является перспективным направлением прикладных исследований. Внедрение СЭС, работающей на отходах лесозаготовки вместо ДЭС, решит несколько вопросов: подвоз топлива, шумовое загрязнение, загрязнение продуктами горения дизельного топлива, а главное, утилизация отходов лесозаготовки. В целом это позволит снизить издержки лесозаготовительного производства [4].

В процессе разработки данного вопроса нами были определены основные исходные данные для дальнейших исследований по разработке СЭС:

- схема прямой генерации;
- температура источника тепла: 350 °С (отходы лесозаготовки);
- диапазон мощностей: от 12 до 60 кВт;
- тип двигателя Стирлинга: α -тип;
- рабочее тело: воздух.

Для успешного решения поставленной задачи необходимо разработать методику разработки и проектирования двигателей Стирлинга, адаптированных под соответствующее топливо и обеспечивающих требуемую мощность генератора. Так как при масштабировании двигателей Стирлинга кардинально меняются процессы тепло-массопереноса [14], то необходимо исследовать несколько диапазонов мощности для определения оптимальных конструктивных параметров двигателей Стирлинга. Для определения границ данных диапазонов необходимо выполнить последовательную, многопараметрическую оптимизацию конструкции с постепенным повышением мощности.

Решение данной задачи сопряжено с огромной сложностью изготовления большого количества экспериментальных образцов. На сегодняшний день эту проблему можно решить, только применяя

методы численного моделирования газодинамики и тепловых процессов с кинематической и динамической параметризацией механической части исследуемых конструкций.

Библиографический список

1. Агапов, Д. С. Результаты экспериментального исследования влияния температуры охлаждающей жидкости на экономические и энергетические показатели дизельного двигателя / Д. С. Агапов // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2016. – № 4. – С. 6-10.
2. Замуков, В. В. Выбор воздуонезависимой энергоустановки неатомных подводных лодок / В. В. Замуков, Д. В. Сидоренко // Судостроение. – 2012. – № 4. – С. 29-33.
3. Кудрявцева, Л. А. Изучение особенностей горения древесных опилок // Современные проблемы науки и образования. – 2009. – № 6 (ч. 3) – С. 85-90.
4. Михайлова, В. С. Сравнительный анализ применения двигателя Стирлинга и дизельного генератора для системы электро-теплоснабжения объектов в Арктических районах России // Молодой ученый. – 2016. – № 8. – С. 261-265. – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/112/28503/> (дата обращения: 13.01.2019).
5. Онучин, Е. М. Разработка схемно-конструктивных решений элементов двигателя внешнего сгорания с устройством для приготовления, подачи и сжигания древесного топлива / Е. М. Онучин, П. Н. Анисимов // Труды Поволжского государственного технологического университета. Серия: технологическая. – 2014. – № 2. – С. 169-190.
6. Распутин, А. Л. Использование двигателя Стирлинга для выработки электроэнергии на вторичных тепловых энергоресурсах / А. Л. Распутин, О. А. Степанов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: матер. междунар. науч.-техн. конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2016. – № 1 – С. 239-242.
7. Расход дизельного генератора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://machineries.ru/a_19.html (дата обращения: 06.12.2018).
8. Соколов, А. П. Функциональная логистика лесозаготовительного предприятия / А. П. Соколов, Ю. Ю. Герасимов. – Петрозаводск, 2013. – 84 с.
9. Суходолов, А. П. Дизельные электростанции Иркутской области и проблемы электроснабжения удаленных населенных пунктов / А. П. Суходолов, В. Ф. Федоров, Д. Ю. Хорохонов // Известия Иркутской государственной экономической академии. – 2004. – № 3. – С. 25-27.
10. Сютёв, В. С. Сравнение технологий лесосечных работ в лесозаготовительных компаниях Республики Карелия / В. С. Сютёв, А. П. Соколов. – Йёнсуу : Изд-во НИИ леса Финляндии, 2008. – 126 с.
11. Цывин, М. М. Использование древесной коры / М. М. Цывин. – М. : Лесн. пром-сть, 1973. – 96 с.
12. Энергетическое использование древесной биомассы: заготовка, транспортировка, переработка и сжигание : учеб. пособие / авт.-сост.: В. С. Сютёв [и др.]. – Петрозаводск, 2014. – 123 с.
13. Açıkkalp, E. Solar driven stirling engine - chemical heat pump - absorption refrigerator hybrid system as environmental friendly energy system / E. Açıkkalp, S. Y. Kandemir, M. H. Ahmadi // Journal of Environmental Management, 232, 455-461. doi:10.1016/j.jenvman.2018.11.055.
14. Ahmed, F. Numerical modeling and optimization of beta-type Stirling engine / F. Ahmed, H. Hulin, A. M. Khan // Applied Thermal Engineering, , 385-400. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.12.003.
15. Kuban, L. A 3D-CFD study of a Г-type stirling engine / L. Kuban, J. Stempka, A. Tyliczszak // Energy, 142-159. doi:10.1016/j.energy.2018.12.009

16. Mendoza Castellanos, L. S. Experimental analysis and numerical validation of the solar Dish/Stirling system connected to the electric grid / L. S. Mendoza Castellanos [et al.] // *Renewable Energy*, 135, 259-265. doi:10.1016/j.renene.2018.11.095.

17. Zare, S. Passivity based-control technique incorporating genetic algorithm for design of a free piston stirling engine / S. Zare, A. R. Tavakolpour-Saleh, T. Binazadeh // *Renewable Energy Focus*, 28, 66-77. doi:10.1016/j.ref.2018.11.003.

References

1. Agapov D. S. *Rezultaty ehksperimental'nogo issledovaniya vliyaniya temperatury ohlazhdayushchej zhidkosti na ehkonomicheskie i ehnergeticheskie pokazateli dizel'nogo dvigatelya* [The results of an experimental study of the effect of coolant temperature on the economic and energy performance of a diesel engine]. *Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa* [Technical and technological problems of service]. 2016. № 4. pp. 6-10 (in Russian).

2. Zamukov V. V., Sidorenko D. V. *Vybor vozdukhonezavisimoy energoustanovki neatomnykh podvodnykh lodok* [Choice of air-independent power installation of non-nuclear submarines]. *Sudostroenie* [Shipbuilding]. 2012. № 4. pp. 29-33 (in Russian).

3. Kudryavceva L. A. *Izucheniye osobennostey goreniya drevesnykh opilok* [Study of the burning features of sawdust]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2009. № 6 (part 3). pp. 85-90 (in Russian).

4. Mihajlova V. S. *Sravnitel'nyy analiz primeneniya dvigatelya Stirlinga i dizel'nogo generatora dlya sistemy elektro-teplosnabzheniya ob'yektov v Arkticheskikh rayonakh Rossii* [Comparative analysis of the use of a Stirling engine and a diesel generator for the system of heat and power supply of objects in the Arctic regions of Russia]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2016. № 8. pp. 261-265. URL <https://moluch.ru/archive/112/28503/> (date of the application: 13.01.2019) (in Russian).

5. Onuchin E. M., Anisimov P. N. *Razrabotka skhemno-konstruktivnykh resheniy elementov dvigatelya vneshnego sgoraniya s ustroystvom dlya prigotovleniya, podachi i szhiganiya drevesnogo topliva* [Development of circuit design solutions for elements of an external combustion engine with a device for the preparation, supply and combustion of wood fuel]. *Trudy Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: tekhnologicheskaya* [Proceedings of the Volga State University of Technology. Series: technological]. 2014. № 2. pp. 190-199 (in Russian).

6. Rasputin A. L., Stepanov O. A. *Ispol'zovaniye dvigatelya Stirlinga dlya vyrabotki elektroenergii na vtorichnykh teplovykh energoresursakh* [Using a Stirling Engine to Generate Electricity on Secondary Thermal Energy Resources]. *Energo- i resursosberezheniye v teploenergetike i sotsial'noy sfere: materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov, uchenykh* [Energy and resource saving in heat and power engineering and social sphere: materials of the international scientific and technical conference of students, graduate students, scientists]. 2016. № 1. pp. 239-242 (in Russian).

7. *Raskhod dizel'nogo generatora* [Diesel generator consumption]. URL: http://machineries.ru/a_19.html (date of the application: 06.12.2018) (in Russian).

8. Sokolov A. P., Gerasimov Yu. Yu. *Funktsional'naya logistika lesozagotovitel'nogo predpriyatiya* [Functional logistics of a logging company]. Petrozavodsk, 2013. 84 p. (in Russian)

9. Suhodolov A. P., Fedorov V. F., Horohonov D. Yu. *Dizel'nyye elektrostantsii irkutskoy oblasti i problemy elektro-snabzheniya udalennykh naselednykh punktov* [Diesel power plants of the Irkutsk region and the problems of power supply of remote settlements]. *Izvestiya Irkutskoy gosudarstvennoy ekonomicheskoy akademii* [News of the Irkutsk State Economic Academy]. 2004. № 3. pp. 25-27 (in Russian).

10. Syunyov V. S., Sokolov A. P. *Sravneniye tekhnologiy lesosechnykh robot v lesozagotovitel'nykh kompaniyakh respubliky Kareliya* [Comparison of logging technologies in logging companies of the Republic of Karelia]. Joehnsuu:Publishing Institute of Forest Research Institute of Finland, 2008. 126 p. (in Russian)
11. Cyvin M. M. *Ispol'zovaniye drevesnoy kory* [Use of bark]. *Lesnaya promyshlennost'* [Forest industry]. Moskva, 1973. 96 p. (in Russian)
12. Syuney V. S. *Energeticheskoye ispol'zovaniye drevesnoy biomassy: zagotovka, transportirovka, pererabotka i szhiganiye: uchebnoye posobiye* [Energy use of woody biomass: harvesting, transportation, processing and incineration: a training manual]. Petrozavodsk, 2014. 123 p. (in Russian)
13. Açıkkalp E., Kandemir S. Y., Ahmadi M. H. Solar driven stirling engine - chemical heat pump - absorption refrigerator hybrid system as environmental friendly energy system. *Journal of Environmental Management*, 232, 455-461. doi:10.1016/j.jenvman.2018.11.055.
14. Ahmed F., Hulin H., Khan A. M. Numerical modeling and optimization of beta-type Stirling engine. *Applied Thermal Engineering*, 385-400. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.12.003.
15. Kuban L., Stempka J., Tyliczszak A. A 3D-CFD study of a Г-type stirling engine. *Energy*, 142-159. doi:10.1016/j.energy.2018.12.009.
16. Mendoza Castellanos L. S. et al. Experimental analysis and numerical validation of the solar Dish/Stirling system connected to the electric grid. *Renewable Energy*, 135, 259-265. doi:10.1016/j.renene.2018.11.095.
17. Zare S., Tavakolpour-Saleh A. R., Binazadeh T. Passivity based-control technique incorporating genetic algorithm for design of a free piston stirling engine. *Renewable Energy Focus*, 28, 66-77. doi:10.1016/j.ref.2018.11.003.

Сведения об авторе

Тихонов Евгений Андриянович – доцент кафедры общетехнических дисциплин, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», кандидат технических наук, доцент, г. Петрозаводск, Российская Федерация; e-mail: tihonov@psu.karelia.ru.

Information about the author

Tihonov Evgeny Andriyanovich – associate professor of the Department of general technical disciplines, FSBEI HE «Petrozavodsk State University», PhD in Engineering, Associate Professor, Petrozavodsk, Russian Federation; e-mail: tihonov@psu.karelia.ru.