

С.Д. Антонов¹, С.П. Столяров²

¹ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАГРЕВАТЕЛЯ И ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕШНЕГО КОНТУРА ДВИГАТЕЛЯ С ВНЕШНИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования в данной работе является двигатель с внешним подводом теплоты по циклу Стирлинга. Цель исследований – создание метода согласования параметров во внешнем нагревательном контуре с учетом требований по эффективности, удельной мощности и экологии.

Материалы и методы. Работа выполнена на базе методов теории сложных систем, классической термодинамики, тепломассообмена.

Основные результаты. Сформулированы актуальные задачи по повышению эффективности внешнего контура двигателя Стирлинга, такие как повышение температуры в пространстве горения, повышение температуры теплообменных поверхностей нагревателя при уменьшении ее неравномерности во внешнем контуре; повышение эффективности нагревателя при уменьшении его габаритов, применение в нагревателе систем косвенного нагрева, комбинированного теплообмена, постановка задачи неравномерного нагрева в тонких толстостенных трубках нагревателя.

Заключение. Полученные результаты позволяют сформулировать задачи на моделирование рабочих процессов в пространстве горения с вариативным расположением отдельных элементов с учетом заданных граничных условий для камеры сгорания двигателя Стирлинга.

Ключевые слова: двигатель Стирлинга, внешний нагревательный контур, камера сгорания.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Антонов С.Д. Столяров С.П. Конструктивные особенности нагревателя и элементов внешнего контура двигателя с внешним подводом теплоты. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 1(383): 101–106.

УДК 629.5.035

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-101-106

S. Antonov¹, S. Stolyarov²

¹ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg Maritime State University, St. Petersburg, Russia

DESIGN PECULIARITIES OF HEATER AND EXTERNAL CIRCUIT ELEMENTS FOR THE ENGINE WITH EXTERNAL HEAT INPUT

Object and purpose of research. This research studies an engine with external heat input as per Stirling cycle. The purpose of this study was to develop a harmonization method for external heating circuit parameters, taking into account efficiency, specific power and environmental requirements.

Materials and methods. This work is based on the methods of complex systems theory, classic thermodynamics and heat & mass exchange.

Main results. This study formulated current challenges in improving the external circuit efficiency for Stirling engine, e.g. increase of temperature in the combustion space, increase of temperature for heat exchange surfaces of the heater and making the temperature in the external circuit more uniform; efficiency increase and size reduction of the heater, application of indirect heating systems in the heater, formulation of non-uniform heating problem in thin thick-walled heater tubes.

Conclusion. Obtained results make it possible to formulate simulation problems for the working processes in the combustion space with varying arrangement of separate elements, taking into account specified boundary conditions for the combustion chamber of Stirling engine.

Key words: Stirling engine, external heating circuit, combustion chamber.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Antonov S., Stolyarov S. Design peculiarities of heater and external circuit elements for the engine with external heat input. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 1(383): 101–106 (in Russian).

УДК 629.5.035

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-101-106



К двигателям с внешним подводом теплоты (ДВПТ) относят двигатели, работающие по замкнутому регенеративному циклу Стирлинга. Двигатели Стирлинга имеют следующие достоинства:

- высокий теоретический КПД;
- высокая удельная мощность;
- отсутствие шума и вибрации при работе;
- возможность применения таких видов топлива, как биогаз, уголь, отходы деревообрабатывающей промышленности, а также использование любых других видов энергии;
- низкая токсичность продуктов сгорания.

Перспективной является возможность применения двигателей Стирлинга в составе когенерационных установок, работающих на альтернативных видах топлива, применение которых возможно в децентрализованных системах энергоснабжения, солнечных энергетических установках, а также в воздушонезависимых установках подводных объектов [1]. Это делает совершенствование элементов двигателей Стирлинга актуальной задачей.

Практически на всех современных двигателях применяются нагреватели трубчатого типа. Длина трубок нагревателя составляет от 250 до 450 мм, внутренний диаметр – от 2 до 12 мм, толщина стенок – от 1 до 3 мм. Увеличение длины и уменьшение диаметра трубок ограничены гидравлическим

сопротивлением, увеличение диаметра – допустимым значением мертвого объема. Наиболее часто применяются U-образные трубки, собранные в «корзину», также встречаются конструкции с прямыми трубками и сборными коллекторами, двойной трубкой (труба Фильда) с внешними ребрами и внутренним ядром (двигатель SE-40Z). Теплообменный канал также может быть выполнен в виде щели шириной от 0,5 до 2 мм между плоскими или изогнутыми пластинами (двигатель DMC 5). Основные требования, предъявляемые к трубкам нагревателя:

- возможно высокий удельный тепловой поток;
- минимальный мертвый объем;
- минимальное гидравлическое сопротивление.

На рис. 1 приведены схемы нагревателей.

В таких конструкциях при использовании прямого способа нагрева трубок продуктами сгорания теоретические требования к теплообменным поверхностям по внешнему и внутреннему контуру находятся в противоречии друг с другом.

Условия, повышающие эффективность теплообмена во внешнем контуре, фактически сводятся к снижению удельного теплового потока и могут быть сформулированы в двух пунктах:

- большая теплообменная поверхность, набранная из трубок малого диаметра;

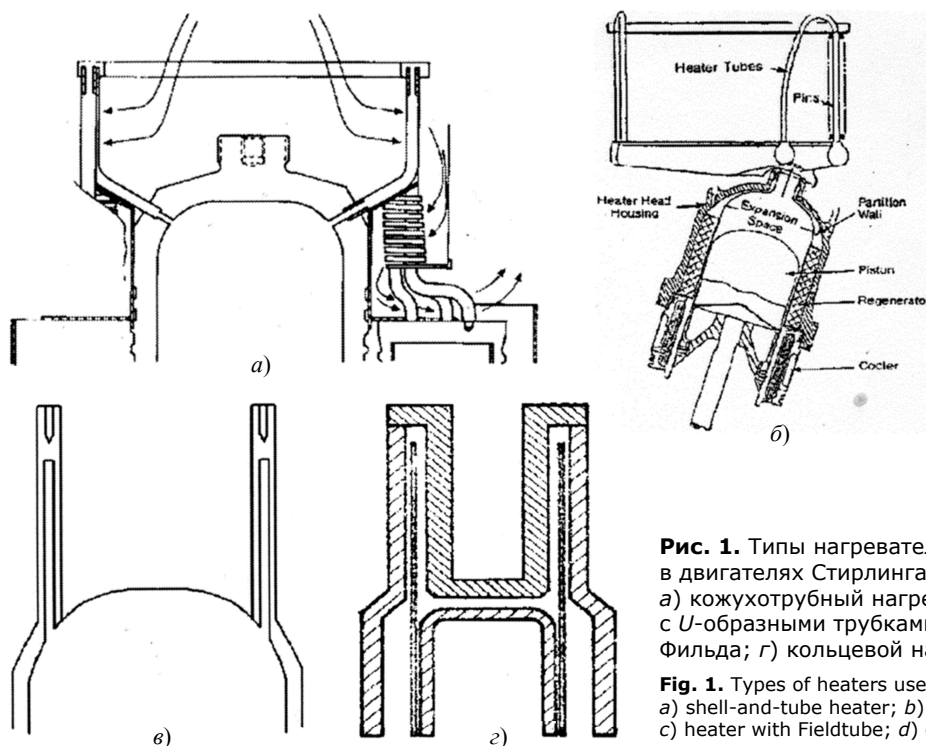


Рис. 1. Типы нагревателей, применяемые в двигателях Стирлинга:

а) кожухотрубный нагреватель; б) нагреватель с U-образными трубками; в) нагреватель с трубкой Фильда; г) кольцевой нагреватель

Fig. 1. Types of heaters used in Stirling engines:
a) shell-and-tube heater; b) heater with U-shaped tubes;
c) heater with Fieldtube; d) circular heater

- плотная многорядная компоновка, обеспечивающая эффективный теплообмен и экранирование стенок камеры сгорания от воздействия лучевой составляющей.

Во внутреннем контуре вследствие высокой скорости вынужденного движения рабочего тела условия теплообмена значительно лучше, и необходимые размеры теплообменной поверхности нагревателя определяются из комплексного, как правило, оптимизационного расчета внутреннего контура с учетом уровня форсировки ДВПТ по мощности, величине тепловых потерь, термического и гидравлического сопротивлений. Использование принципа прямого нагрева делает нагреватель конструктивно и технологически сложным. Вследствие конструктивной сложности, множественности типов теплофизических процессов, высоких удельных тепловых потоков, а также неоднородности структуры и параметров пламени горелки, в нагревателе возникают температурные перекосы. Применение системы передачи теплоты с промежуточным теплоносителем позволяет обеспечить независимость геометрических характеристик теплопередающих поверхностей внешнего и внутреннего контуров, а также равномерное температурное поле нагревателя ДВПТ [2]. Схема системы подвода теплоты с промежуточным теплоносителем приведена на рис. 2.

Оребрение трубок применяется для повышения эффективности теплообмена со стороны внешнего контура. Ребра обычно устанавливаются на втором ряду трубок нагревателя, где температура газов и удельный тепловой поток значительно ниже, чем в первом ряду. Для обеспечения высокого качества теплообмена ребра должны быть приварены к трубке. Высота ребер определяется температурой на их конце. Также на ребра могут устанавливаться проставки, направляющие поток газов на трубки за счет блокирования промежутков между ребрами смежных трубок.

Камера сгорания представляет собой объем, в котором расположены следующие элементы:

- горелочное устройство;
- трубки нагревателя;
- экраны;
- головки цилиндров;
- каналы ввода воздуха;
- эжекторы.

Температура в камере сгорания достигает 2000°C и более, что предъявляет повышенные требования к жаростойкости материалов [3]. Распределение температуры показано на рис. 3.

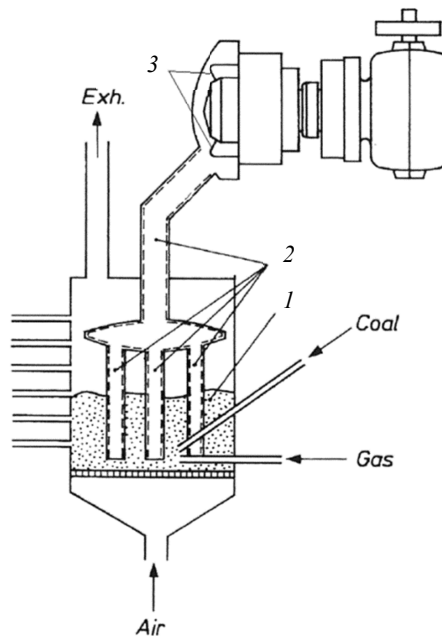


Рис. 2. Схема системы подвода теплоты с промежуточным теплоносителем:
1 – псевдоожженный слой; 2 – тепловая труба;
3 – трубки нагревателя

Fig. 2. Heat input system with intermediate heat carrier:
1 – fluidized layer; 2 – heat pipe; 3 – heater tubes

Горелочное устройство осуществляет подачу топлива и воздуха в правильных пропорциях и в точно определенном количестве. Это требуется для поддержания постоянной температуры независимо от изменяющейся нагрузки на двигатель и для обеспечения оптимальных условий для процесса сгорания. Горелочные устройства, работающие на жидком топливе, имеют большую сложность в сравнении с газовыми. Т.к. топливо испаряется и распыляется под давлением, требуются воздушный компрессор и регулятор, система зажигания. Качество сгорания определяется качеством перемешивания топлива и воздуха. Для выполнения этого условия применяются конструкции горелочных устройств различных типов.

Конструкции первого типа состоят из нескольких цилиндрических камер с тангенциальным подводом воздуха, обеспечивающим эффективное перемешивание с газом (двигатель Type 24D) [3]. Пламя образуется сразу под такими камерами, факел получается коротким, а его конфигурация обеспечивает хорошее распределение температуры и очень малое образование сажи. Недостатком таких горелок является сложность пуска.

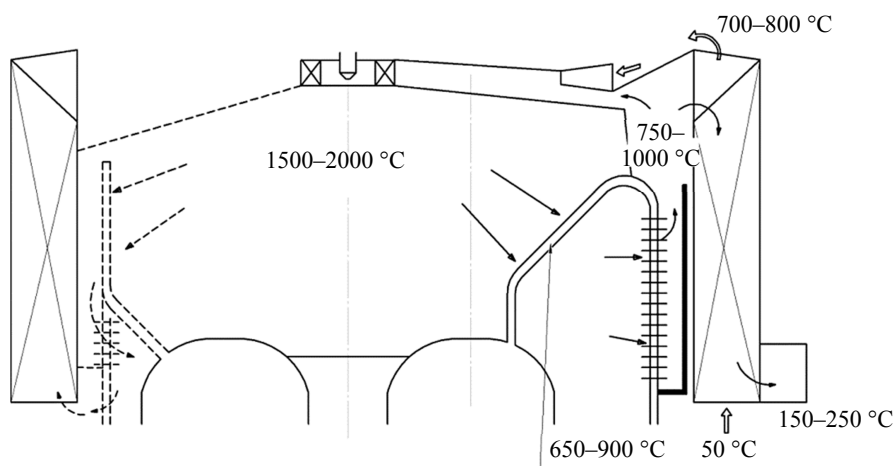


Рис. 3. Распределение температуры во внешнем нагревательном контуре двигателя Стирлинга

Fig. 3. Temperature distribution in external heating circuit of Stirling engine

Следующий вид – горелочные устройства с меньшим числом вихревых камер, которые работают на жидком топливе (двигатель 1-365 и некоторые другие, выпущенные до 1970 г.). Жидкое топливо в горелке распыляется сжатым воздухом, затем испаряется при контакте с горячей поверхностью и попадает в вихревые камеры. Преимуществом является меньшая сложность пуска. Однако имеет место более длинный факел, что является недостатком по сравнению с конструкцией, описанной выше, т.к. приводит к увеличению высоты двигателя и значительной неравномерности распределения температуры в камере сгорания.

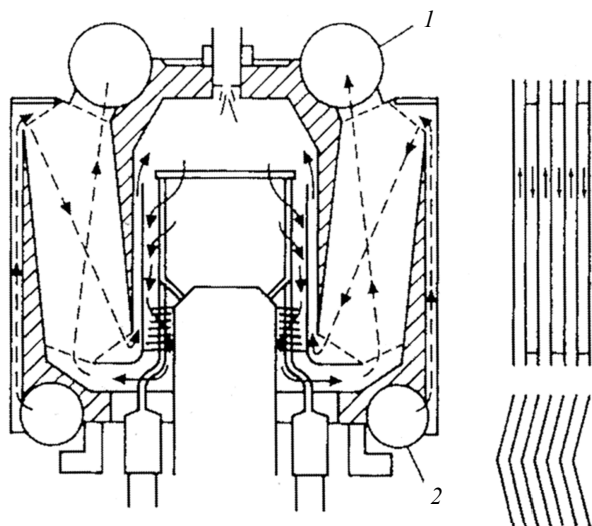


Рис. 4. Схема щелевого преднагревателя:
1 – воздушный коллектор;
2 – выхлопной коллектор

Fig. 4. Layout of slot pre-heater: 1 – air collector;
2 – exhaust collector

Другим интересным вариантом могут стать горелки с одной вихревой камерой. Такие горелочные устройства отличаются легкостью пуска, но имеют очень длинный факел, что приводит к увеличению высоты двигателя.

По параметрам пуска и перемешивания хороши щелевые горелки, применяемые в двигателях 10-36, 80-15. Однако такой тип горелочных устройств также обладает достаточно длинным факелом.

Современные двигатели (4-235, P-40, Mod I, Mod II и др.) чаще оснащаются горелочными устройствами с завихрителями, установленными сразу за распылителем топлива. Такая конструкция обеспечивает достаточно короткий факел и стабильное горение.

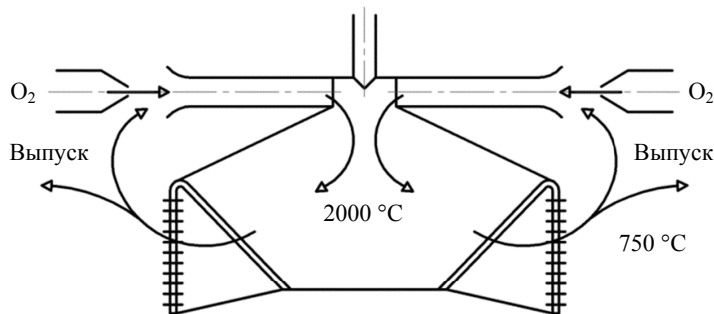
Экраны отделяют камеру сгорания от преднагревателя. Применяются также более толстые керамические экраны, устанавливаемые за рядами трубок и возвращающие часть тепла газов излучением [4].

Преднагреватель является элементом, в значительной степени определяющим эффективность внешнего контура в целом [5]. После прохождения газов через ряды трубок их температура, как правило, составляет 750–1000 °C. Без преднагревателя до 40 % теплоты, полученной при сгорании топлива, было бы выброшено в атмосферу. Преднагреватель позволяет сократить эту потерю на две трети и более. На выходе температура газов может быть снижена до 200 °C, а воздух, поступающий в камеру сгорания, нагрет до 800 °C. Схема щелевого преднагревателя, состоящего из узких каналов, по которым газы и воздух движутся в противотоке, приведена на рис. 4.

Для решения задачи обеспечения однородности теплового поля, уменьшения выбросов оксидов азота, снижения температуры в камере сгорания двига-

Рис. 5. Схема рециркуляции в камере сгорания двигателя 4-275 для ПЛ

Fig. 5. Layout of recirculation in the combustion chamber of engine 4-275 for submarines



телей подводных технических средств, работающих на чистом кислороде без доступа атмосферного воздуха, применяются эжекторные устройства, предназначенные для организации внутренней рециркуляции продуктов сгорания.

Рециркуляция продуктов сгорания позволяет получить преднагретую смесь с температурой значительно выше точки самовоспламенения топлива, обеспечивающей стабильное горение. Также однородность теплового поля позволяет лучше контролировать максимальную температуру и положительно влияет на ресурс материала нагревателя [6]. Схема камеры сгорания с внутренней рециркуляцией представлена на рис. 5.

На основании рассмотрения различных вариантов конструктивного исполнения внешнего контура двигателя с внешним подводом теплоты (двигателя Стирлинга) и особенностей протекания процессов в элементах внешнего контура, обобщенную кон-

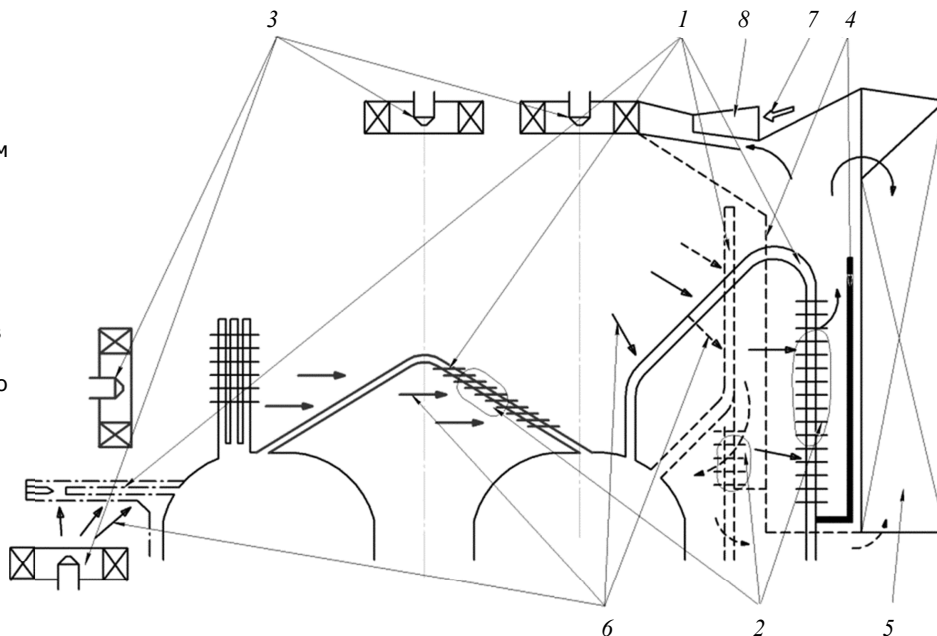
структивную схему пространства горения можно представить в виде, на котором отдельные элементы вариативно представлены средствами инфографики (рис. 6).

Основными элементами внешнего нагревательного контура являются [7–9]:

- горелочное устройство (3, рис. 6);
- нагреватель двигателя, в котором, как правило, различные ряды трубок или оребренные стенки (1, 2, рис. 6) могут быть рассмотрены как секции, использующие различные виды теплообмена на различных поверхностях;
- эжекторные устройства (8, рис. 6), которые могут быть встроены для организации внутренней рециркуляции;
- экраны (4, рис. 6), направляющие потоки воздуха и газов, теплоизолирующие и теплорассеивающие экраны, а также элементы конструкции, выполняющие роль тепловых зеркал.

Рис. 6. Схема основных элементов внешнего контура двигателя Стирлинга с вариативным расположением отдельных элементов:
1 – трубки нагревателя;
2 – ребра; 3 – горелки;
4 – экраны;
5 – преднагреватель;
6 – направления потоков газов; 7 – воздух;
8 – эжекторное устройство

Fig. 6. Main external circuit elements of Stirling engine with varying arrangement of separate elements:
1 – heater tubes;
2 – fins;
3 – burners;
4 – shields;
5 – pre-heater;
6 – gas flow directions;
7 – air; 8 – ejector



Можно выделить следующие актуальные задачи по повышению эффективности внешнего контура двигателя Стирлинга:

- повышение температуры в пространстве горения;
- повышение температуры нагревателя и уменьшение ее неравномерности во внешнем контуре;
- повышение эффективности нагревателя и уменьшение его габаритов;
- применение комбинированного теплообмена;
- применение косвенного нагрева;
- решение проблемы неравномерного нагрева в тонких толстостенных трубках нагревателя;
- обеспечение легкости пуска.

Для решения поставленных выше задач планируется разработка математической модели внешнего нагревательного контура с учетом сложного теплообмена, позволяющей добиться оптимизации его элементов, постановка эксперимента по определению неравномерности температуры в сечении трубки нагревателя и влияния экранов на эффективность теплообмена, верификация расчетных и экспериментальных данных.

Библиографический список

References

1. Барановский В.В., Никитин В.С., Половинкин В.Н. Современное состояние и перспективы развития отечественных корабельных энергетических установок // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 2(380). С. 70–91. [V. Baranovsky, V. Nikitin, V. Polovinkin. Current status and future development prospects of Russian marine diesel power plants. // KSRC Transactions. 2017; 2(380): 70–91. (in Russian)].
2. Столяров С.П. Методика расчета и результаты исследований системы передачи теплоты к нагревателю двигателя с внешним подводом теплоты. Дис. ... канд. техн. наук. СПб.: 2003. [S. Stolyarov. Calculation procedure and research results for the system of heat transfer to the heater of engine with external heat input. Dissertation for the degree of the Candidate of Technical Sciences, St. Petersburg, 2003. (in Russian)].
3. Hargreaves C.M. The Philips Stirling engine. Amsterdam – London – New York – Tokyo, 1991.
4. Гоннов И.В., Логинов Н.И., Столяров С.П. Теплообменники с жидкометаллическим теплоносителем в двигателях Стирлинга. М.: ЦНИИАтоминформ, 1989. [I. Gonnov, N. Loginov, S. Stolyarov. Heat exchangers with fluid-metal heat carrier in Stirling engines. Moscow: TSNIIatominform, 1989. (in Russian)].
5. Ernst W.D., Shaltens R.K. Automotive Stirling engine development project. MTI Report 91 TR15. February 1997.
6. Kojima H., Hashimoto K., Takei Y. The development of the Z-type Stirling engine and its application // Proceedings of the 20th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1986: 272–7.
7. Chucas D.M. Development of a Stirling engine battery charger based on a low cost wobble mechanism. A thesis submitted for the degree of DPh in mechanical engineering at the University of Canterbury. Christchurch, New Zealand, 1993.
8. Akazawa T., Hirata K., Hoshino T., Fujiwara K. SiC Ceramics hearther for free piston type of Stirling engine // Proceedings of the 16th International Stirling Engine Conference. Spain, 2014: 1–10.
9. Lu T., Liu Z., Jing Y., Gu G. Numerical and experimental investigation of a MILD combustion burner for Stirling engines // Proceedings of the 16th International Stirling Engine Conference. Spain, 2014: 325–32.

Сведения об авторах

Антонов Станислав Дмитриевич, инженер 1 категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Телефон: 8 (812) 415-49-57. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Столяров Сергей Павлович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок, декан факультета корабельной энергетики и автоматики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, д. 3. Телефон: 8 (812) 714-16-41. E-mail: stsp56@yandex.ru.

About the authors

Antonov, Stanislav D., Engineer 1st category, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-49-57. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Stolyarov, Sergei P., Cand. Sc. (Tech.), Assistant Professor, Head of Ship Internal Combustion Engines & Diesel Installations Chair, Dean of Ship Power Engineering and Automation Department, St. Petersburg State Marine Technical University, Address: Lotsmanskaya 3, St. Petersburg, 190121, Russia. Tel.: 8 (812) 714-16-41. E-mail: stsp56@yandex.ru.

Поступила / Received: 08.02.18
Принята в печать / Accepted: 05.03.18
© Антонов С.Д. Столяров С.П., 2018