

УДК 629.764.4 + 629.76.415
DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.09

Е.С. Курилова, Е.А. Зарницына

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ В ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

Одна из задач теплообменных аппаратов ракетно-космической техники состоит в обеспечении и поддержании необходимого для безаварийной работы уровня температур всех элементов летательных аппаратов. Характерной особенностью всех источников тепла является непостоянство передаваемого тепла. От решения данной проблемы зависит целостность ракетных двигателей и летательных аппаратов, поэтому в статье рассматриваются конструкции теплообменных аппаратов жидкостных ракетных двигательных установок, их предназначение, классификация, достоинства и недостатки.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, жидкостные ракетные двигательные установки, рекуперативные теплообменные аппараты, кожухотрубчатые теплообменные аппараты, цилиндрические теплообменные аппараты, пластинчато-ребристые теплообменные аппараты, теплоноситель.

E.S. Kurilova, E.A. Zarnitsina

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

ANALYSIS OF HEAT-EXCHANGING DEVICE APPLICATION IN LIQUID PROPELLANT JET ENGINES

One of the tasks of space rocket hardware heat-exchangers is to provide and maintain the temperature level required for trouble-free operation of all elements of flying vehicles. A characteristic feature of all heat sources is the inconstancy of transmitted heat. The integrity of rocket engines and aircraft as a whole depends on the solution of this problem, so the article deals with the design of heat-exchange apparatuses for liquid rocket propulsion systems, their purpose, classification, advantages and disadvantages.

Keywords: heat-exchanging device, liquid rocket propulsion systems, regenerative exchanger, shell-and-tube heat exchanger, cylindrical heat exchanger, plate-finned heat exchanger, heat-transfer agent.

Космические летательные аппараты (КЛА) находятся в безвоздушном пространстве, и в этом заключается сложность их проектирования, так как передача тепла осуществляется посредством излучения: прямое солнечное излучение, излучение, отраженное от космического тела, или собственное излучение космического тела, а также внутренние источники тепла [1, 2].

Теплообменный аппарат (ТОА) – это устройство, в котором происходит теплообмен между двумя или несколькими средами, имеющими различные температуры [3]. Теплообменники (ТО) используются как в двигателях, так и в системах жизнеобеспечения КЛА, где необходимо помнить еще и о биологических возможностях человека (обмене веществ в организме человека, выделениях тепла от тела и т.д.) [4]. Если рассматривать двигатель, то предназначение ТО будет заключаться в нагреве или испарении сжиженного газа (обычно азота или гелия), который, поступая в топливные баки, создает давление наддува. Это помогает улучшить антикавитационную работу бустерных насосов и увеличивает работоспособность вытесняющего газа. Отработанный на турбине высокотемпературный генераторный газ используется в качестве элемента, отдающего тепло для нагрева сжиженного газа [5].

В ракетно-космической области, как и в любой другой, существуют особые требования, предъявляемые к ТОА:

- получение требуемых параметров теплоносителей (ТН) на выходе из ТОА;
- высокая величина количества теплоты, передаваемой ТН;
- способность работы при высоких давлениях;

- работоспособность в широком диапазоне изменения температур;
- высокая герметичность;
- высокая прочность и надежность конструкции при различных нагрузках;
- технологичность в изготовлении;
- простота конструкции, компактность и малая масса;
- экономичность работы;
- соответствия требованиям охране труда;
- оптимальная стоимость.

ТОА могут быть подогревателями, испарителями, паропреобразователями, конденсаторами, холодильниками, радиаторами и т.п. Выбор зависит от назначения данного аппарата. Как и для любого аппарата, у данных ТОА имеется свое разделение на классы (типы). Например, их разделяют по принципу работы на поверхностные и контактные.

Поверхностные ТОА чаще всего применяются в проектировании ЛА. Они делятся на два подвида – регенеративные и рекуперативные [6]. Чаще всего в жидкостных ракетных двигателях (ЖРД) используются рекуперативные ТОУ.

Рекуперативными называются такие ТО, в которых теплота передается от одной среды к другой через разделяющую твердую стенку, при этом тепловой поток сохраняет постоянное направление. Такие ТОА относятся к типу с принудительной циркуляцией. Однако они работают в стационарном режиме [7, 8].

Наиболее распространенными для КЛА можно считать следующие виды рекуперативных ТОА: кожухотрубчатые, цилиндрические, пластинчато-ребристые.

Кожухотрубчатые ТОА – самый распространенный тип теплообменной аппаратуры (рис. 1). Данный ТО может работать с теплоносителями типа «жидкость – жидкость», «пар – жидкость», «газ – жидкость», «газ – газ». Он состоит из семи рядов спиральных труб, которые собираются в пучок. Между трубами находятся четыре пластины, которые скрепляют их и обеспечивают зазор. Все это помещается внутрь кожуха. Концы труб закрепляются в трубных решётках сваркой, пайкой, развальцовкой, с сальниковыми уплотнениями. В магистраль подвода жидкого азота устанавливается расходная шайба. Она организует необходимый расход азота через теплообменник [9]. Преимущества данных ТО:

- широкий диапазон применения по рабочим параметрам;
- высокая стойкость к гидроударам;
- относительная дешевизна конструкции.

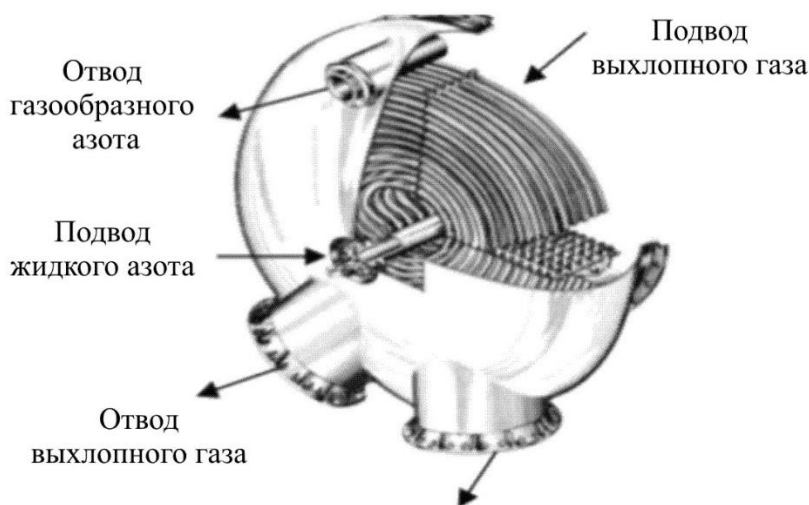


Рис. 1. Схема кожухотрубчатого теплообменного аппарата

Кожухотрубчатый ТО двигателя РД-107 РН «Союз» осуществляет охлаждение газа, вырабатанного в газогенераторе, для наддува бака горючего. На рис. 2 приведена ПГС данной двигательной установки [10].

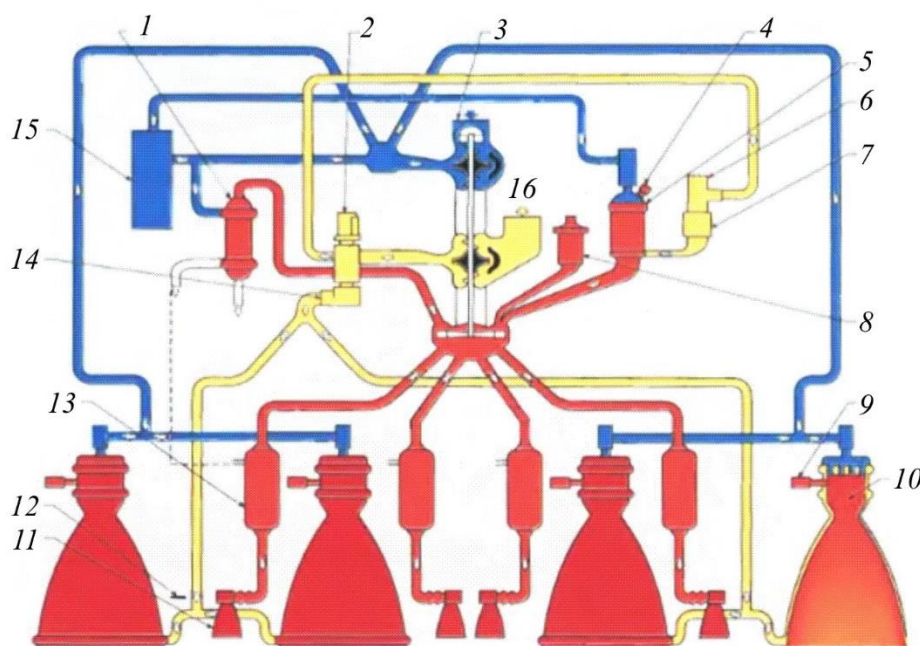


Рис. 2. ПГС кожухотрубчатого теплообменника двигателя РД-107 ракеты-носителя «Союз»:
 1 – теплообменник; 2 – дроссель; 3 – ТНА; 4 – запальник газогенератора; 5 – газогенератор;
 6 – стабилизатор; 7 – клапан горючего №1; 8 – пиростартер; 9 – запальник; 10 – камера сгорания;
 11 – сопло рулевое; 12 – ось качания; 13 – газификатор; 14 – клапан горючего №2; 15 – регулятор;
 16 – подвод горючего в ТНА

Кожухотрубчатые ТОА применяются также в двигателях РД-108, РД-111, РД-119. Их опыт использования исчисляется годами, но они имеют ряд значимых недостатков:

- имеют большие габариты;
- давления и нагрузки в современных двигателях довольно высоки, и данный тип ТОА трудно обеспечить хорошей работоспособностью при заданных параметрах;
- сложность изготовления (например, соединение каждой трубки с кожухом осуществляется посредством ручной пайки);
- необходимость использования новых материалов, не свойственных данному типу ТОА (обычные материалы не обладают необходимой стойкостью к возгоранию);
- сложность компоновки на транспортном средстве (двигателе).

На данную конструкцию было найдено три запатентованных изобретения.

Первый патент опубликован в 2002 г. Р.Г. Ризвановым, Р.Г. Абдеевым, А.М. Забатуриным и Р.Ф. Теляевым. Их формула изобретения: «Кожухотрубчатый теплообменник, содержащий корпус с торцевыми коллекторами среды трубного пространства, имеющими перегородку и ограниченными трубными решетками, в которых укреплен пучок труб, и кольцевые расширители среды межтрубного пространства с патрубками, расположенными в зоне трубных решеток, имеющие диаметр, больший диаметра корпуса, и снабженные внутри перфорированными отбойниками с радиусом, большим радиуса корпуса, а суммарное сечение перфорации отбойника и зазор между ним и корпусом не меньше проходного сечения патрубка кольцевого расширителя, отличающийся тем, что отбойник имеет каплевидную форму в виде перфорированного кольца с выступом в направлении патрубков, а торцевая часть отбойника имеет скос под углом...» [11].

Второй патент опубликован в 2006 г. Авторами данного изобретения являются Р.Р. Сафин, С.Г. Рогачев, Р.З. Сюняев, О.Г. Сафиев, Р.З. Сафиева. Их ТОА отличается рядом параметров, что делает его уникальным [12].

Автором третьего патента является Р.И. Насибуллин. Опубликовано в 2019 г. Его формула: «Кожухотрубчатый теплообменный аппарат с трубным пучком, размещенным в кожухе, в котором в зазоре между трубным пучком и кожухом аппарата расположен наполнитель, отличающийся тем, что наполнитель выполнен из чередующихся слоев объемной сетки и малопроницаемого материала или из нескольких слоев гофрированного листового материала» [13].

Цилиндрические ТОА совершеннее кожухотрубчатых (рис. 3).

Они имеют те же достоинства, но при меньших габаритах выдерживают более высокие вибронагрузки.

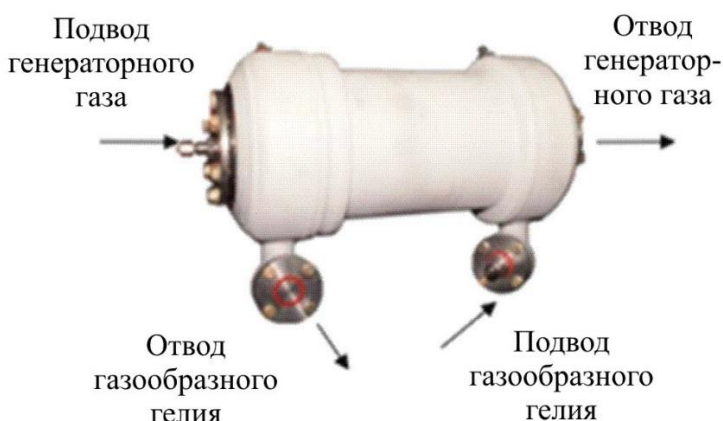


Рис. 3. Схема цилиндрического теплообменника

Данный тип ТО – это неразъемная паяно-сварная конструкция, включающая в себя корпус и необходимые детали подвода и отвода теплоносителей. Корпус состоит из нескольких элементов: наружной стенки, двух трактов генератора и двух трактов гелия. Тракты подогревающего (генераторный газ) и подогреваемого (гелий) теплоносителей чередуются между собой.

В трактах генераторного газа с помощью оребрения для интенсификации процесса теплообмена реализуется вихревое течение [14].

Цилиндрический ТО двигателя РД-171 РН «Зенит» выполняет нагрев гелия, который находится в газообразном состоянии, чтобы обеспечить наддув баков окислителя. На рис. 4 данный ТОА находится под номером 9.

Цилиндрические ТО также применяются в двигателях РД-120 и РД-170, и довольно успешно. Однако, несмотря на его эффективное использование, следует учитывать некоторые недостатки:

- имеет значительные габаритно-массовые характеристики, потому что в центральной части ТО предусматривается объем, не участвующий в теплообмене (усложняется компоновка ДУ);
- сложность технологии изготовления;
- использование разных материалов в конструкции ТОА.

На данные ТОУ существует несколько патентов.

Один из них – это усовершенствованный цилиндрический ТОА коаксиального типа, опубликованный в феврале 2020 г. Авторами данного патента являются А.П. Пирожникова и М.А. Говорунов. Задачей изобретения является интенсификация процесса теплообмена между греющей и нагреваемой средами, т.е. организация улучшенного развития производства [15].

Пластинчато-ребристые ТОА – наиболее современные и подходящие ТО для КЛА (рис. 5).

Преимущества данных ТОУ:

- компактность;
- металлоемкость;
- экономичность в работе;
- способность к точному контролю температуры.

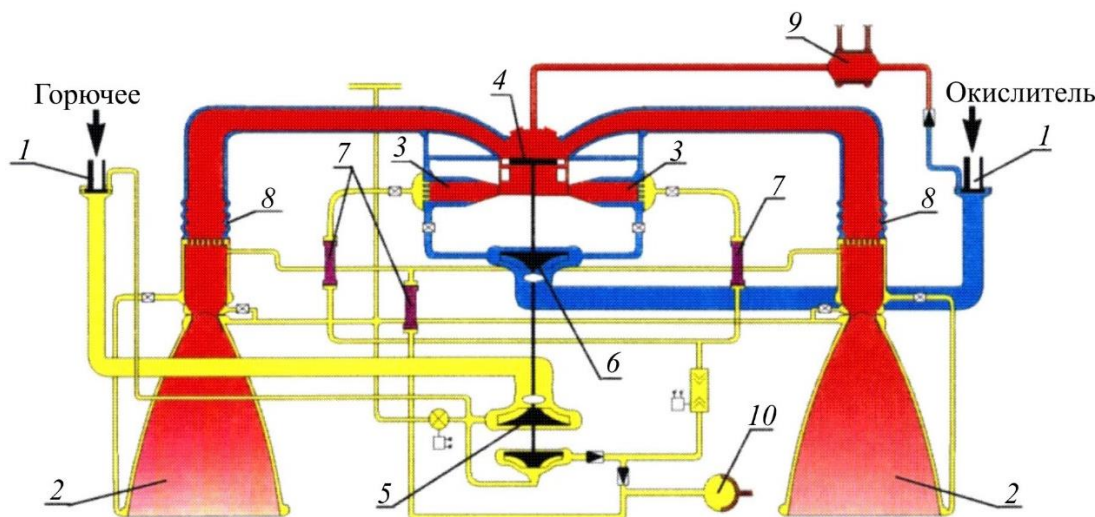


Рис. 4. ПГС цилиндрического теплообменника двигателя РД-171 ракеты-носителя «Зенит»:
 1 – бустерные насосные агрегаты; 2 – камера двигателя; 3 – газогенераторы; 4 – турбина; 5 – насос горючего; 6 – насос окислителя; 7 – воспламенитель; 8 – шарнир; 9 – теплообменник;
 10 – бак пускового горючего

Данный ТОА состоит из набора параллельночередующихся слоев ребер с расположенными между ними разделительными пластинами. За исключением входов и выходов рабочей среды края каждого слоя закрываются боковыми крышками, которые обеспечивают механическую прочность устройства и предотвращают утечку рабочей среды. Корпус, как и в цилиндрическом ТОА, состоит из стенок тракта генераторного газа и стенок тракта гелия, цилиндра и крышек. Теплоносители подводятся к корпусу через втулку, различные коллекторы, фланец и штуцера. Отвод теплоносителей осуществляется с помощью тех же втулок, коллекторов и т.д. Тракты подогреваемого и подогревающего теплоносителей чередуются. Теплоноситель подводится к необходимым магистралям через соответствующие отверстия и прорези. Отвод теплоносителя происходит точно так же. Коллекторы тракта генераторного газа и коллекторы тракта гелия выполняются штамповкой.

Чтобы повысить компактность и улучшить организацию производства, пластины профилируют. Ребра изготавливают из материалов, которые имеют лучшую теплопроводность для того, чтобы увеличить их эффективность.

Пластинчато-ребристый ТО однокамерного двигателя РД-191 (рис. 6) так же, как и цилиндрический, нагревает гелий, который находится в газообразном состоянии, и использует его для наддува. Однако существует различие между ними, здесь наддув происходит не только бака окислителя, а всех топливных баков ракеты-носителя «Ангара». ТО является неразъемной паяно-сварной конструкцией, которая включает в себя корпус и элементы отвода и подвода теплоносителей. Такой ТО применяется также и в РД-180.

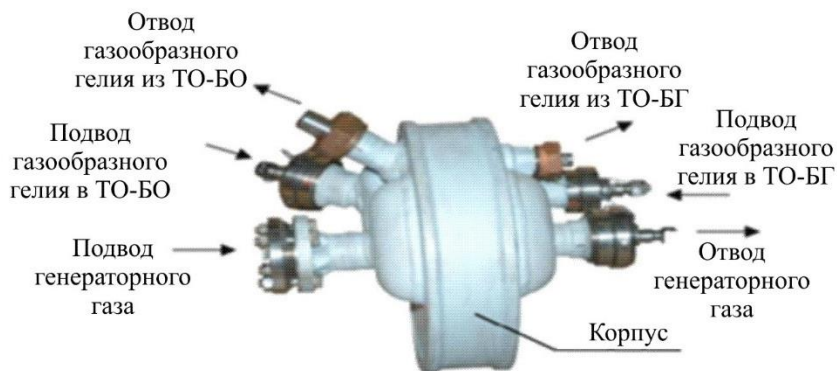


Рис. 5. Схема пластинчато-ребристого теплообменника

Несмотря на все положительные качества данных ТОА, имеется ряд недостатков:

- из-за возможного неравномерного распределения теплоносителей по теплообменной поверхности стенок уменьшается КПД теплопередачи ТО;
- большое количество деталей, паяных и сварных швов уменьшает его технологичность, прочность и надежность.

Однако, несмотря на недостатки, именно пластинчато-ребристые ТО являются самыми подходящими ТО по надежности, технологичности, эффективности и экономичности.

В 1987 г. опубликован патент на усовершенствование пластинчато-ребристого рекуперативного ТОА. Его авторами являются П.А. Мильштейн, В.А. Мышенко, А.Н. Кабаков, В.П. Парфенов. Цель данного изобретения – интенсификация теплообмена. Описан данный патент следующим образом: изобретение относится к пластинчато-ребристым теплообменникам и может быть использовано для охлаждения сжатых газов и конденсирования воздуха [16].

Все ТОА, рассмотренные выше, применяются в ракетной технике, однако не всегда уровень интенсификации теплообмена достаточен для охлаждения стенок камеры сгорания в условиях высоких температур. Поэтому, чтобы повысить эффективность ТОА, куда включается уменьшение массы и габаритов, снижение затрат мощности и потерь тепла, данные устройства создают из новых легких материалов. Например, можно использовать нетрадиционные пористые сетчатые металлы (ПСМ). Также новые материалы можно совместить с принципом межканальной транспирации теплоносителя (МКТТ), при котором у теплоносителя уменьшается траектория движения, а площадь сечения проходного тракта увеличивается. Таким образом, снижается перепад давления теплоносителя. Следовательно, в тракте с МКТТ получаем низкие гидравлические потери и высокую теплоотдачу [18].

Ракетно-космическая техника – техника экзотическая, не имеющая каких-либо аналогов. При ее проектировании возникает много трудностей. Их преодоление приводит к появлению оригинальных конструкций и необычных технических решений. И ТОА не являются исключением. С каждым годом конструкторы совершенствуют системы охлаждения в КЛА и находят все больше интересных решений.

Было рассмотрено три теплообменных устройства, каждое имеет свои достоинства и недостатки. Какое из них использовать в определенном двигателе, решать только конструктору, опираясь на все известные факты. Также необходимо помнить о конкретных особенностях каждого двигателя.

Библиографический список

1. Салахутдинов Г.М. Тепловая защита в космической технике. – 7-е изд. – М.: Знание, 1982. – 64 с.
2. Системы терморегулирования космического аппарата. [Электронный ресурс] // Википедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/> (дата обращения: 10.10.2021).

3. Теплообменный аппарат. Виды, устройство, классификация теплообменников. [Электронный ресурс] // ЭлеткроТехИнфо. – URL: <https://eti.su/articles/> (дата обращения: 07.10.2021).
4. Шарп М. Р. Человек в космосе. – 12-е изд. – М.: Мир, 1971. – 200 с.
5. Ключева О.Г. Разработка унифицированных компактных пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов для жидкостных ракетных двигателей: дисс. ... канд. техн. наук. [Электронный ресурс]. – М., 2008. – 168 с. // Техносфера. – URL: <https://tekhnosfera.com> (дата обращения 09.09.2021).
6. Что такое теплообменник, зачем он нужен. [Электронный ресурс] // Ремстроймаш. – URL: <https://www.npommmz.ru/> (дата обращения: 09.09.2021).
7. Рекуперативные теплообменные аппараты непрерывного действия. [Электронный ресурс] – URL: <https://helpiks.org> (дата обращения: 10.09.2021).
8. Пелевин Ф.В., Пономарев А.В., Семенов П.Ю. Рекуперативный теплообменный аппарат с пористым металлом для жидкостного ракетного двигателя [Электронный ресурс] // Elibrary. – URL: <https://www.elibrary.ru/> (дата обращения: 16.09.2021).
9. Кожухотрубчатый теплообменник / Р.Г. Ризванов, Р.Г. Адеев, А.М. Забатурин, Р.Ф. Теляев. [Электронный ресурс] // Elibrary: [сайт]. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37884949> (дата обращения: 10.09.2021).
10. В это день... [Электронный ресурс] // Беседы о ракетных двигателях: [сайт]. – URL: <https://rocketengines.ru/historical-digest/events> (дата обращения: 10.09.2022).
11. Пат. 2190816 Российская Федерация, МПК F28D 7/00. Кожухотрубчатый теплообменник / Абдеев Р.Г., Забатурин А.М., Ризванов Р.Г., Теляев Р.Ф.: заявители и патентообладатели; заявл. 05.06.2001; опубл. 10.10.2002.
12. Пат. 2282808 Российская Федерация, МПК F28D7/16. Кожухотрубчатый теплообменник с каналами, параллельно расположенными в пространстве / Сафин Р.Р., Рогачев С.Г., Сюняев Р.З., Сафиев О.Г.: заявители и патентообладатели; заявл. 30.11.2001; опубл. 27.08.2006.
13. Пат. 269804 Российская Федерация, МПК F28D7/16. Кожухотрубчатый теплообменный аппарат / Насибулин Р.И.: заявитель; заявл. 21.07.2016; опубл. 04.07.2019.
14. Ключева О. Г. Цилиндрический теплообменник двигателя РД-171М ракеты-носителя семейства «Зенит» [Электронный ресурс] // Elibrary. – URL: <https://www.elibrary.ru/> (дата обращения: 17.09.2021).
15. Пат. 2714133 С1 Российская Федерация, МПК F28D7/16 Цилиндрический рекуперативный теплообменный аппарат коаксиального типа / Пирожникова А.П.; Говорунов М.А.: заявители и патентообладатели; заявл. 02.08.2019; опубл. 13.02.2020.
16. Пат. 1839227 А1 СССР, МПК F28F3/02. Пакет пластинчатого теплообменника / Мильштейн П.А., Мышенко В.А., Кабаков А.Н. Парфенов В.П.: заявители и патентообладатели; заявл. 10.12.1984; опубл. 30.12.1993.
17. Козлов В.В., Пелевин Ф.В. Совершенствование теплообменных аппаратов для снижения экологической опасности теплоэнергетического оборудования [Электронный ресурс] // ЭБС Лань. – URL: <https://e.lanbook.com> (дата обращения: 18.09.2022).
18. Пелевин Ф. В., Пономарев А.В., Семенов П.Ю. Рекуперативный теплообменный аппарат с пористым металлом для жидкостного ракетного двигателя [Электронный ресурс] // Elibrary. – URL: <https://www.elibrary.ru/> (дата обращения: 18.09.2022).

References

1. Salakhutdinov G.M. et al. Thermal protection in space technology. Moscow, Znanie, 1982, 64 p.
2. Spacecraft thermal management systems // Wikipedia; URL: <https://ru.wikipedia.org/> (date of access 10.10.2021).
3. Heat-exchange apparatus. Types, device, classification of heat exchangers. // EletroTechInfo; URL: <https://eti.su/articles/> (date of access: 7.10.2021).
4. Sharp M. R. et al Man in Space. Moscow, Mir, 1971, 200 p.
5. Klyueva O. G. Creation of a unified heat exchanger of a single-chamber liquid rocket engine: dissertation // Technosphere; URL: <https://tekhnosfera.com/> (date of access 09.09.2021).
6. What is a heat exchanger, why it is necessary // Remstroy mash: URL: <https://www.npommmz.ru/> (date of access: 09.09.2021).
7. Recuperative heat exchangers of continuous operation. – Text: electronic // URL: <https://helpiks.org> (date of reference: 10.09.2021).
8. Pelevin F.V., Ponomarev A.V., Semenov P.Yu. Recuperative heat-exchange apparatus with porous metal for a liquid rocket engine // Elibrary; URL: <https://www.elibrary.ru/> (date of access 16.09.2021).

9. Rizvanov R.G., Adeev R.G., Zabaturin A.M., Telyaev R.F. Shell and tube heat exchanger // Elibrary; URL: <https://www.elibrary.ru> (date of access: 10.09.2021).

10. On this day... // Conversations about rocket engines: [website]. – URL: <https://rocketengines.ru/historical-digest/events> (date of access: 10.09.2022).

11. Patent 2190816 Russian Federation MPK F28D 7/00 Shell and tube heat exchanger / R.G. Abdeev, A.M. Zabaturin, R.G. Rizvanov, R.F. Telyaev. Petitioners and patentees; application. 05.06.2001; publ. 10.10.2002.

12. Patent 2282808 Russian Federation MPK F28D7/16 Shell-and-tube heat exchanger with the channels parallel located in space / Safin R.R., Rogache S.G., Syunyaev R.Z., Safiev O.G. Applicants and patentees; application. 30.11.2001; publ. 27.08.2006.

13. Patent 12. Patent 269804 Russian Federation MPK F28D7/16 Shell and tube heat exchanger / Nasibulin R.I: applicant; application. 21.07.2016; publ. 04.07.2019.

14. Klyueva O.G. Cylindrical heat exchanger of the RD-171M engine of the Zenit family launch vehicle // Elibrary; URL: <https://www.elibrary.ru/> (date of access: 17.09.2021).

15. Patent 2714133 C1 Russian Federation MPK F28D7/16 Cylindrical recuperative heat-exchange apparatus of coaxial type / Pirozhnikova A.P.; Govorunov M.A.: applicants and patentees; application. 02.08.2019; publ. 13.02.2020.

16. Patent 1839227 A1 USSR MPK F28F3/02 Package of a plate heat exchanger / Milstein P.A., Myshenko V.A., Kabakov A.N., Parfenov V.P.: applicants and patentees; application. 10.12.1984; publ. 30.12.1993.

17. Kozlov, V.V. Improvement of heat-exchange apparatuses for decrease in ecological hazard of heat-and-power equipment // EBS Lan; URL: <https://e.lanbook.com> (date of access: 18.09.2022).

18. Pelevin, F. V. Recuperative heat-exchange apparatus with porous metal for liquid rocket engine // Elibrary; URL: <https://www.elibrary.ru/> (date of access: 18.09.2022).

Об авторах

Курилова Евгения Сергеевна (Челябинск, Россия) – студент кафедры «Двигатели летательных аппаратов», Южно-Уральский государственный университет (454080, Челябинск, ул. Ленина, 76, e-mail: kurilovajenika25@mail.ru).

Зарницына Екатерина Анатольевна (Челябинск, Россия) – заместитель директора, Южно-Уральский государственный университет (454080, Челябинск, ул. Ленина, 76, e-mail: zarnitsyna@susu.ru).

About the authors

Evgeniya S. Kurilova (Chelyabinsk, Russian Federation) – Student, Department of Aircraft Engines, South Ural State University (76, Lenina str., 454080, Chelyabinsk, e-mail: kurilovajenika25@mail.ru).

Ekaterina A. Zarnitsyna (Chelyabinsk, Russian Federation) – Deputy Director, South Ural State University (76, Lenina str., 454080, Chelyabinsk, e-mail: zarnitsyna@susu.ru).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Поступила: 23.09.2022

Одобрена: 30.09.2022

Принята к публикации: 05.12.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Курилова, Е.С. Анализ применения теплообменных устройств в жидкостных ракетных двигательных установках / Е.С. Курилова, Е.А. Зарницына // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 71. – С. 83–90. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.09

Please cite this article in English as: Kurilova E.S., Zarnitsyna E.A. Analysis of heat-exchanging device application in liquid propellant jet engines. PNRPU Aerospace Engineering Bulletin, 2022, no. 71, pp. 83-90. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.09