

УДК 621.453

## СИСТЕМА НАДДУВА ТОПЛИВНЫХ БАКОВ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛА ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА

© 2013 В. В. Бирюк<sup>1</sup>, А. В. Смородин<sup>2</sup>, А. И. Шепелев<sup>2</sup>, Д. А. Оноприенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)  
<sup>2</sup>ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»

Проведен сравнительный анализ теплообменных аппаратов различных типов: перекрестно-поточного, кожухотрубчатого, пластинчатого. Выполнен расчёт массово-энергетических характеристик трёх типов теплообменных аппаратов.

*Давление, наддув, бак, ракета-носитель, гелий, двигатель, компонент топлива, теплообменный аппарат, перекрестно-поточный, кожухотрубчатый, пластинчатый, генераторный газ, мощность.*

Система наддува топливных баков ракет – носителей (РН) проектируется для поддержания избыточного давления в газовой подушке баков в соответствии с расчётной зависимостью, определяемой требованиями подачи компонентов топлива и конструкцией баков.

Обычно условия подачи топлива представляют в виде избыточного давления на входе в насос, обеспечивающего бескавитационные условия работы и определяемого как полное давление на входе минус давление насыщенных паров. Для анализа работы системы наддува удобно выразить избыточное давление на входе в насос в зависимости от потребного для его поддержания давления наддува баков. Потребное давление наддува определяется как

$$P_{\sigma} = \Delta P_{ex} + P_{mp} + P_s,$$

где  $\Delta P_{ex}$  – избыточное давление на входе в насос;  $P_{mp}$  – потери на трение в топливных магистралях;  $P_s$  – давление насыщенных паров.

В двигателях, имеющих турбонасосную систему подачи топлива, величина тяги незначительно зависит от изменения параметров в системе наддува. В двигателях, имеющих вытеснительную систему подачи, тяга двигателя пропорциональна давлению наддува, следовательно, в этом случае требуется особенно тщательный контроль давления в самом баке.

Существуют следующие системы наддува баков:

- с газовым аккумулятором давления;
- автогенераторные;
- газогенераторные;
- испарительные, с жидкостным аккумулятором давления;
- с инъекцией в основной бак;
- с политропным расширением;
- с пороховым аккумулятором давления;
- со вспомогательной насосной системой.

Чаще всего используется система наддува топливных баков с газовым аккумулятором давления. Простейшая схема такой системы приведена на рис. 1 а.

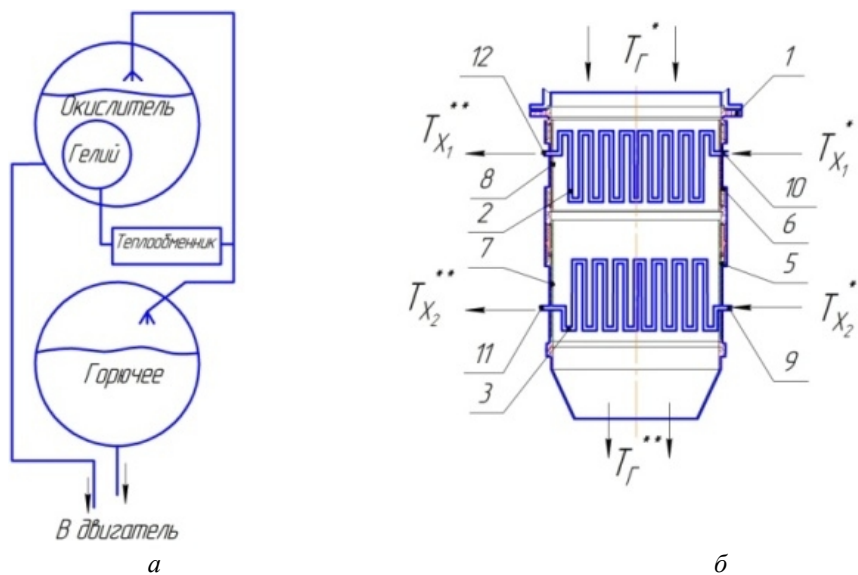


Рис. 1. Схема наддува баков РН (а) с применением теплообменника перекрестно-поточного типа (б)

Для увеличения удельного объёма газа наддува и, следовательно, уменьшения веса системы довольно часто применяют теплообменный аппарат, который значительно повышает эффективность системы наддува баков.

Для достижения максимальной эффективности системы наддува необходимо повышать температуру газа (гелия) на выходе из теплообменника, однако температуру гелия следует ограничивать для предотвращения разрушения наиболее теплонапряженных элементов системы наддува. На рис. 2 приведена зависимость потребного для наддува баков расхода гелия от его температуры для типичной РН.

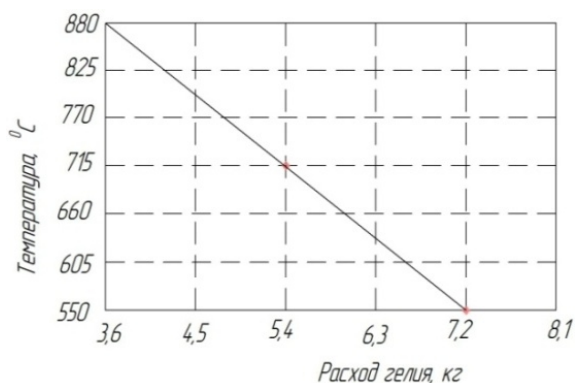


Рис. 2. Влияние температуры гелия на выходе из теплообменного аппарата на его потребный расход

В настоящее время на РН применяются теплообменники рекуперативного (перекрестно-поточного) типа. Типичный теплообменник, применяемый в системе с хранением сжатого газа (гелия) в баке криогенного топлива (окислителя), показан на рис.1 б.

Блок теплообменника представляет собой неразъёмную паяно-сварную конструкцию рекуперативного типа, состоящую из фланца 1, теплообменника горячего 2, теплообменника окислителя 3, корпусов 5, 6, цилиндров 7, 8, штуцеров подвода гелия для наддува баков окислителя 9 и горячего 10 и штуцеров отвода гелия 11, 12 из теплообменника. Все детали блока теплообменника сделаны из нержавеющей стали X18H9T.

Теплообменный аппарат (ТА) работает следующим образом. Гелий через штуцеры подвода подаётся в тракты нагрева теплообменников. Проходя по каналам, гелий нагревается генераторным газом (ГГ), а затем подаётся в баки РН для потребного наддува. ГГ выбрасывается через сопло в атмосферу.

Данный тип теплообменника не имеет развитой поверхности или многотрубчатой системы для улучшения теплообмена.

В настоящее время появилась необходимость повысить эффективность теплообменного аппарата для увеличения коэффициента теплоотдачи и снижения массы.

Для реализации данного требования сравним два типа ТА – кожухотрубчатый и пластинчатый.

Теплопередающая поверхность кожухотрубчатого ТА (рис. 3) образована пучком труб 1, закреплённых в трубных решётках 2, которые охвачены цилиндрическим кожухом 3, снабжённым патрубками входа 4 и выхода 5 ГГ. Также штуцерами (патрубками) для подачи 6 и отвода 8 гелия необходимого на наддув бака окислителя, и, соответственно, 7,9 – на наддув бака горючего. Таким образом, получается три полости, разделённые стенками труб: межтрубное пространство, по которому движется генераторный газ и два трубных пространства, по которым движется холодный гелий. Цилиндрический кожух и соответствующая ему круглая в поперечном сечении форма трубного пучка способны лучше воспринимать температурные нагрузки при более высоких давлениях.

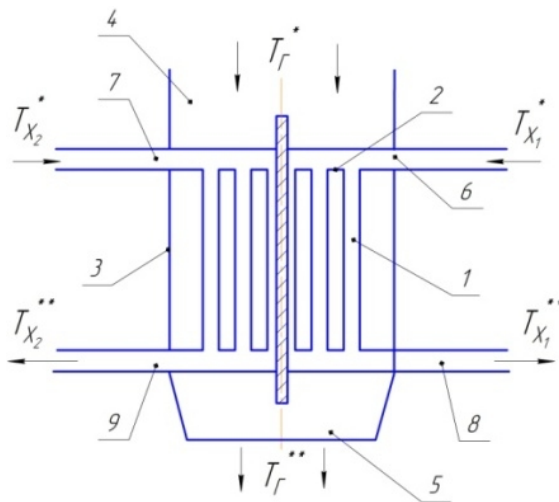


Рис. 3. Конструктивная схема кожухотрубчатого ТА

В пластинчатых ТА поверхность теплообмена образуется из отдельных пластин, а каналы для рабочей среды имеют щелевидную форму. Рабочая среда

движется у поверхности теплообмена тонким слоем, что способствует интенсификации процесса теплоотдачи. Пластины располагаются параллельно друг к другу, причём между рабочими поверхностями двух смежных пластин создаётся небольшой зазор, образующий канал для рабочей среды, подвергаемый нагреванию или охлаждению.

Пластинчатый ТА, конструктивная схема которого приведена на рис. 4, включает в себя определенное число параллельных каналов 1 в соответствии с расходом рабочих сред. Пластинчатый ТА устроен так, что после сборки (сварки) отдельных пластин 2 в аппарате образуются три системы герметичных каналов, изолированные одна от другой металлической стенкой (пластиной) и прокладкой 3: одна для горячего ГГ, две другие для холодного гелия, необходимого для наддува баков окислителя и горючего. Одна из этих систем состоит из нечётных каналов, а другая – из чётных, благодаря чему потоки горячей и холодных рабочих сред чередуются. Обе системы межпластинчатых каналов соединяются со своими коллекторами 4, 5, 6 и далее со штуцерами для входа и выхода рабочих сред.

Гелий подводится в аппарат через штуцеры 7, 8 и попадает в продольные коллекторы 5, 6. По коллектору холодный гелий доходит до пластины и распределяется по нечётным межпластинчатым каналам. При движении по межпластинчатому каналу гелий обтекает волнистую поверхность пластин, обогреваемых с обратной стороны ГГ. Затем подогретый гелий выходит в продольные коллекторы 9, 10, образованные нижними отверстиями, и выходит из аппарата через штуцеры 11, 12. ГГ движется в аппарате навстречу гелию. Он поступает через штуцер 13, проходит через верхний коллектор 4, распределяется по чётным каналам и движется по ним. Через нижний коллектор 14 и штуцер 15 охлаждённый ГГ выходит из ТА в атмосферу.

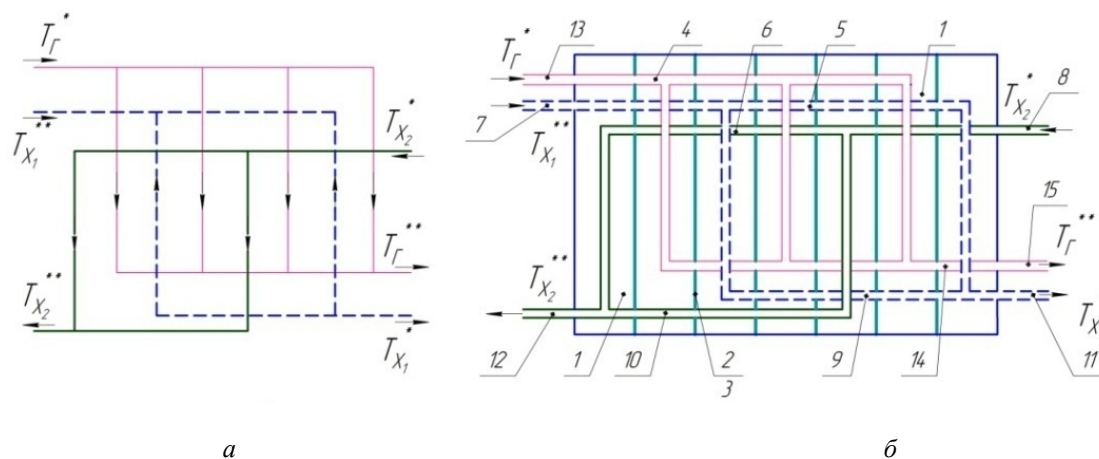


Рис. 4. Условная плоская схема движения рабочих сред через теплообменник (а) и конструктивная схема пластинчатого ТА (б)

Рассчитаем параметры ТА перекрестно-поточного, кожухотрубчатого и пластинчатого типов по методике, изложенной в [3, 4], при этом примем следующие исходные данные:

$$T_{Гел}^{ex} = 80 \text{ K}; T_{Гел}^{выx} = 500 \text{ K}; T_{ГГ}^{ex} = 850 \text{ K}; T_{ГГ}^{выx} = 800 \text{ K};$$

$$P_{Гел}^{ex} = 3000 \text{ кПа}; P_{Гел}^{выx} = 780 \text{ кПа}; P_{ГГ}^{ex} = 450 \text{ кПа}; P_{ГГ}^{выx} = 400 \text{ кПа}.$$

Результаты расчётов ТА приведены в Табл.1.

По результатам расчётов видно, что пластинчатый ТА является наиболее вы-

годным по сравнению с другими. Малая толщина пластин и параллельная расстановка с малыми промежутками между пластинами позволяет размещать в пространстве рабочую поверхность ТА наиболее компактно с такой «плоскостью», которая недостижима в кожухотрубчатых и перекрестно-поточных типах. Это, в конечном счете, приводит к тому, что пластинчатые ТА обладают при равной тепловой нагрузке значительно меньшими габаритными размерами (520×230мм) и массой (104,6 кг), чем кожухотрубчатые и перекрестно-поточные.

Таблица 1. Результаты расчетов ТА

Тип ТА	Рабочая поверхность, м <sup>2</sup>	Размеры ТА, мм	Масса ТА, кг	Затрачиваемая мощность, кВт
Перекрестно-поточный	81,24	L = 810; D = 370	169,8	78,25
Кожухотрубчатый	102,28	L = 1150; D = 450	207,3	92,47
Пластинчатый	95,78	H = 520; B = 230	104,6	105,29

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.0297.

### Библиографический список

1. Двигательные установки ракет на жидком топливе [Текст]/под ред. О.Н. Прядкина. – М.: Мир, 1966. – 404 с.

2. Добровольский, М.В. Жидкостные ракетные двигатели [Текст]/М.В. Добровольский – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 488 с.

3. Коваленко, Л.М. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи [Текст]/Л.М. Коваленко, А.Ф. Глушков. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 240 с.

4. Фраас, А. Расчет и конструирование теплообменников [Текст]/А. Фраас, М. Оцисик – М.: Атомиздат, 1971. – 361 с.

## SYSTEM OF PRESSURIZATION OF THE FUEL TANK OF A LAUNCH VEHICLE USING THE HEAT OF GENERATOR GAS

© 2013 V. V. Biryuk<sup>1</sup>, A. V. Smorodin<sup>2</sup>, A. I. Shepelev<sup>2</sup>, D. A. Onoprienko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University  
named after academician S.P. Korolyov (National Research University)  
<sup>2</sup>SPACE ROCKET CENTER «TsSKB-PROGRESS»

Comparative analysis of heat exchangers of various types is carried out: crossflow, shell- and- tube, plate heat exchangers. Mass- power characteristics of the three types of heat exchangers are calculated.

*Pressure, pressurization, tank, launch vehicle, helium, engine, fuel component, heat exchanger, cross-flow, shell- and- tube, plate heat exchangers, generator gas, rating data.*

### Информация об авторах

**Бирюк Владимир Васильевич**, доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:teplotex_ssau@bk.ru). Область научных интересов: теплообмен, термодинамика.

**Сморodin Алексей Валерьевич**, главный конструктор РН «Союз-2-1в», ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс». E-mail: [lex.samara@rambler.ru](mailto:lex.samara@rambler.ru). Область научных интересов: проектирование, изготовление и эксплуатация ракет-носителей.

**Шепелев Алексей Иванович**, первый заместитель главного конструктора – заместитель начальника отделения, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс». E-mail: [uran\\_74@mail.ru](mailto:uran_74@mail.ru). Область научных интересов: проектирование, изготовление и эксплуатация ракет-носителей.

**Онопrienко Денис Александрович**, инженер-конструктор, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс». E-mail: [den\\_ssau@mail.ru](mailto:den_ssau@mail.ru). Область научных интересов: проектирование, изготовление и эксплуатация ракет-носителей.

**Biryuk Vladimir Vasilyevitch**, doctor of engineering science, professor of the heat engineering department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:teplotex_ssau@bk.ru). Area of research: heat and mass exchange, thermodynamics.

**Smorodin Alexey Valerievich**, chief designer of the launch vehicle «Soyuz-2-1v», Space Rocket Center «TsSKB-PROGRESS». E-mail: [lex.samara@rambler.ru](mailto:lex.samara@rambler.ru). Area of research: launch vehicle designing, production and operation.

**Shepelev Aleksey Ivanovich**, deputy chief designer, Space Rocket Center «TsSKB-PROGRESS». E-mail: [uran\\_74@mail.ru](mailto:uran_74@mail.ru). Area of research: launch vehicle designing, production and operation.

**Onoprienko Denis Aleksandrovich**, design engineer, Space Rocket Center «TsSKB-PROGRESS». E-mail: [den\\_ssau@mail.ru](mailto:den_ssau@mail.ru). Area of research: launch vehicle designing, production and operation.