

СОЗДАНИЕ УНИФИЦИРОВАННОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ОДНОКАМЕРНОГО ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

О.Г. Ключева

ОАО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко», Россия

Теплообменник (ТО) жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) предназначен для нагрева или испарения азота или гелия, который поступает в топливные баки ракеты-носителя (РН) и создает в них давление, обеспечивающее бескавитационную работу бустерных насосов. Нагрев осуществляется за счет теплопередачи от высокотемпературного генераторного газа, отбираемого за турбиной турбонасосного агрегата [1].

Основные требования к ТО ЖРД:

- обеспечение заданных параметров подогреваемого теплоносителя;
- работоспособность при высоких давлениях и в широком диапазоне изменения температур;
- прочность и надежность при работе в двигателе;
- стойкость к возгоранию в высокотемпературном окислительном газе;
- технологичность изготовления;
- минимальные габаритно-массовые характеристики;
- оптимальная стоимость.

Для подтверждения обеспечения основных требований ТО ЖРД проходит следующую экспериментальную проверку:

- приемо-сдаточные и контрольно-выборочные испытания, подтверждающие прочность, герметичность и работоспособность;
- испытания при динамических нагрузках (тряске и вибрации);
- автономные огневые испытания для подтверждения стойкости конструкции к возгоранию в высокотемпературном окислительном газе и определения выходных параметров подогреваемого теплоносителя;
- испытания в двигателе.

Унифицированный ТО однокамерного ЖРД создан с учетом опыта, приобретенного в результате разработки и эксплуатации кожухотрубчатых и цилиндрических ТО ЖРД НПО Энергомаш. Например, на рис. 1 представлен ТО двигателя РД107 РН «Союз», осуществляющий нагрев и испарение жидкого азота для наддува топливных, перекисного и азотного баков РН. Он имеет неразъемную паяно-сварную конструкцию, включающую кожух, коллектор змеевиков и детали подвода и отвода теплоносителей. Коллектор змеевиков состоит из семи рядов спиральных трубок. Для скрепления трубок и обеспечения зазора между ними в коллекторе установлены четыре пластины, каждая из которых включает шесть частей, соединенных между собой стальной проволокой. Трубки проходят через отверстия, равномерно расположенные в пластинах, что предохраняет их от изгиба, вибрации и обеспечивает одинаковую фиксацию. Для свободного прохода выхлопного газа в пластинах имеется большое количество дополнительных отверстий. Крайние ряды трубок крепятся к пластинам контрольной проволокой. Пластины связаны с кожухом скобами, притянутыми к кронштейнам болтами. Штуцера подвода и отвода азота крепятся к коллектору с помощью пайки. Необходимый расход азота через ТО обеспечивается расходной шайбой, установленной в магистраль подвода жидкого азота [2]. Параметры теплоносителей в ТО двигателя РД107 представлены в табл. 1. Технологические и габаритно-массовые характеристики ТО двигателя РД107 представлены в табл. 2.

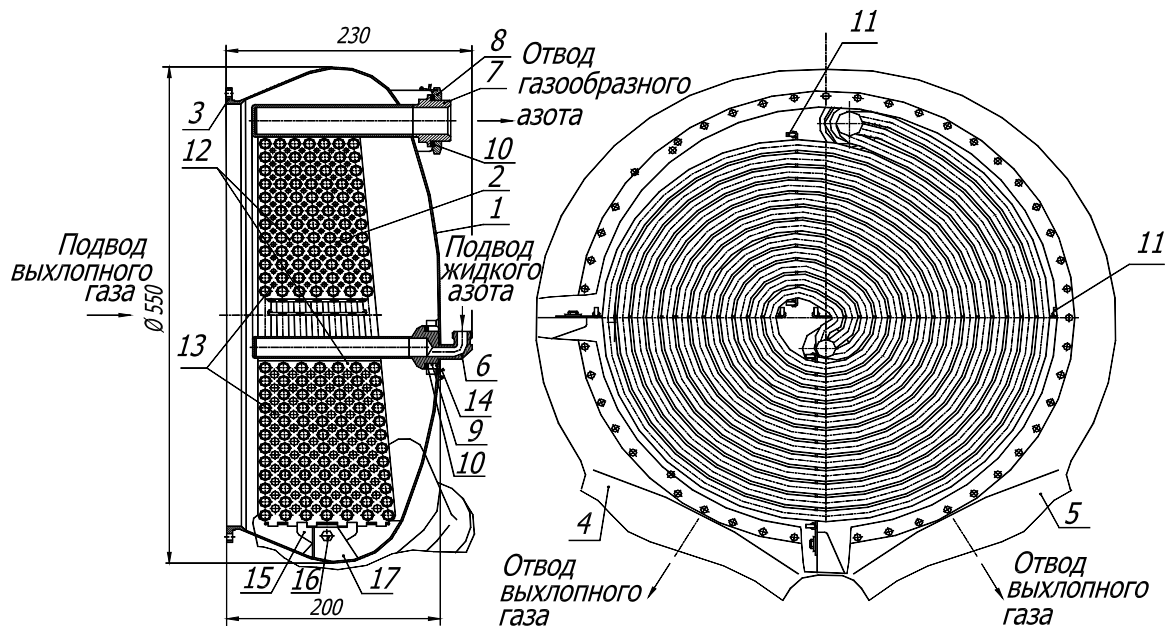
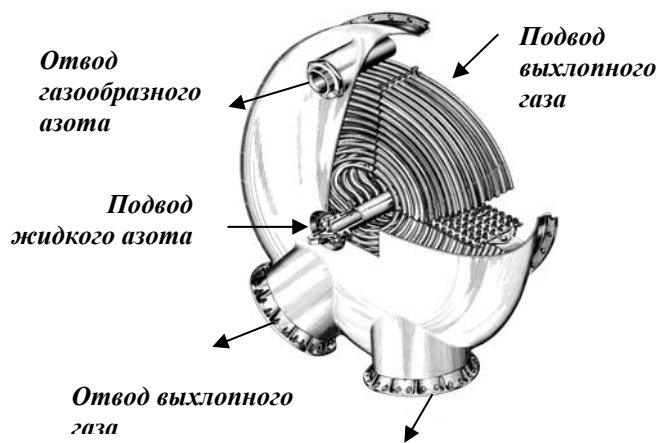


Рис.1. Кожухотрубчатый теплообменник двигателя РД107 ракеты-носителя «Союз»: 1 – кожух; 2 – коллектор змеевиков; 3 – фланец подвода выхлопного газа; 4, 5 – фланцы отвода выхлопного газа; 6 – штуцер подвода жидкого азота; 7 – штуцер отвода газообразного азота; 8, 9 – гайки; 10 – прокладка паронитовая; 11 – пластины; 12 – проволока; 13 – дополнительные отверстия в пластинах; 14 – контрольная проволока; 15 – скоба; 16 – кронштейн; 17 – болт

Таблица 1

Параметры теплоносителей в кожухотрубчатом теплообменнике двигателя РД107

Наименование параметра, размерность	Азот	Выхлопной газ
Массовый секундный расход, кг/сек	1,5	10
Температура на входе в ТО, °С	-196	250
Температура на выходе из ТО, °С	100	150
Давление на входе в ТО, кгс/см ²	20	2,5
Давление на выходе из ТО, кгс/см ²	10	2

Таблица 2

Технологические и габаритно-массовые характеристики теплообменника двигателя РД107

Наименование параметра, размерность	Величина
Технологические характеристики	
Количество деталей, шт.	47
Количество сварных швов, шт.	3
Количество паяных швов, шт.	42
Габаритно-массовые характеристики	
Габариты, мм	Ø550×230
Масса, кг	19

Работоспособность и надежность кожухотрубчатого ТО доказана успешной многолетней работой в составе ЖРД, однако с современной точки зрения он имеет следующие недостатки:

- тип конструкции предусматривает низкую компактность поверхности теплообмена, что увеличивает габаритные размеры ТО;
- трудно обеспечить работоспособность ТО при высоких давлениях и динамических нагрузках, характерных для современных ЖРД;
- имеет сложную технологию изготовления [3].

Более совершенным по сравнению с кожухотрубчатым, является цилиндрический ТО. Например, на рис. 2 представлен ТО двигателя РД171 РН «Зенит», осуществляющий нагрев газообразного гелия для наддува бака окислителя.

ТО является неразъемной паяно-сварной конструкцией, включающей корпус, детали подвода и отвода теплоносителей. Корпус состоит из наружной стенки, двух трактов генераторного газа, образованных четырьмя стенками, и двух трактов гелия, образованных двумя стенками. Стенки представляют собой оребренные трубы, концентрически расположенные одна в другой и соединенные между собой по вершинам ребер с помощью пайки серебряным припоем. Теплообменные тракты подогревающего и подогреваемого теплоносителей чередуются между собой. Поверхности теплообмена стенок тракта гелия образованы оребрением с прямыми каналами. В трактах генераторного газа с помощью оребрения для интенсификации процесса теплообмена реализуется вихревое течение. Параметры теплоносителей в ТО двигателя РД171 представлены в табл. 3. Технологические и габаритно-массовые характеристики ТО двигателя РД171 представлены в табл. 4.

Таблица 3

Параметры теплоносителей в цилиндрическом теплообменнике двигателя РД171

Наименование параметра, размерность	Гелий	Генераторный газ
Массовый секундный расход, кг/сек	0,4	20
Температура на входе в ТО, °С	-200	398
Температура на выходе из ТО, °С	280	353
Давление на входе в ТО, кгс/см ²	30	272
Давление на выходе из ТО, кгс/см ²	15	254

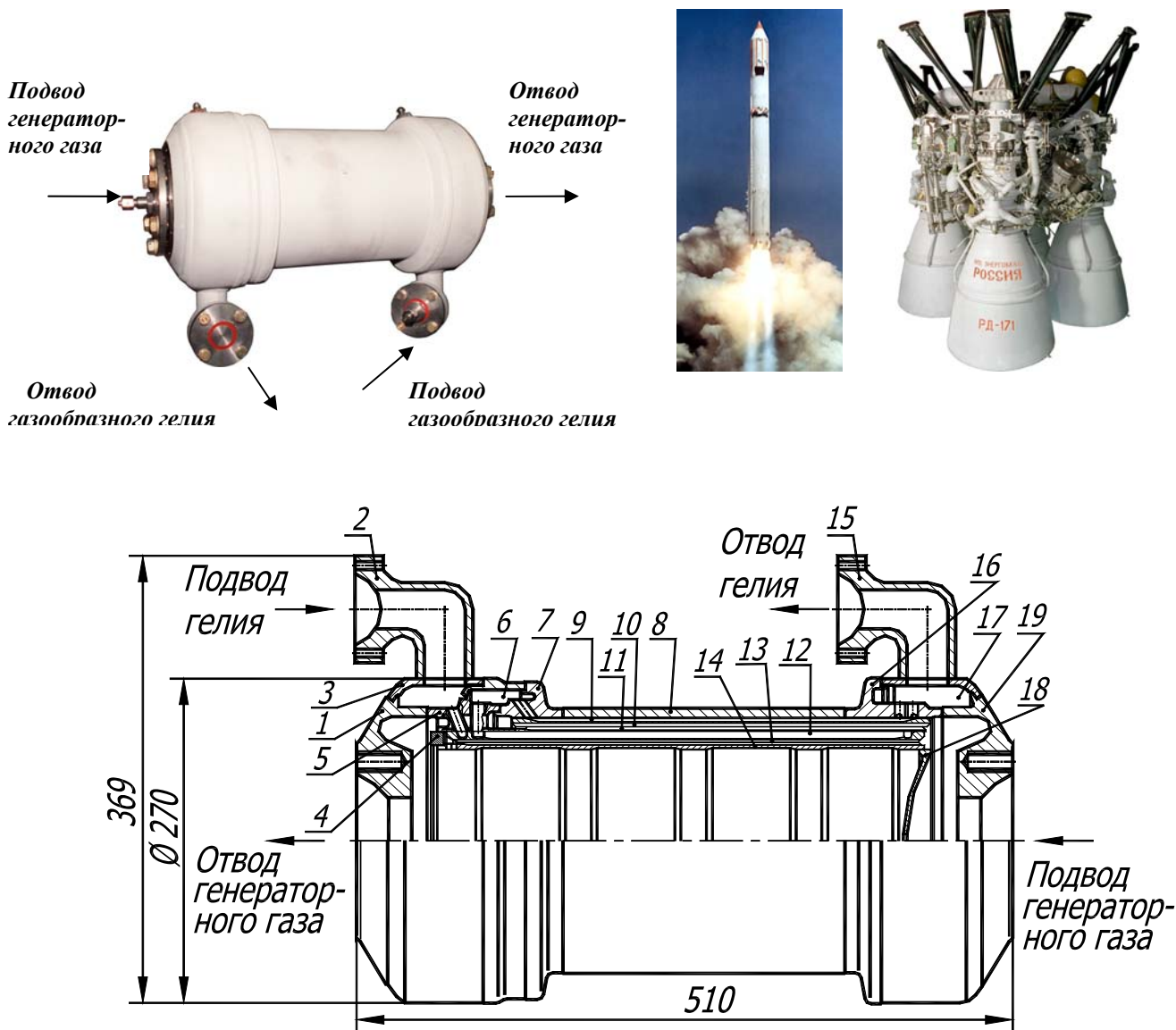


Рис. 2. Цилиндрический теплообменник двигателя РД171 ракеты-носителя «Зенит»: 1, 19 – днище наружное; 2 – фланец подвода гелия; 3 – коллектор подвода гелия; 4, 5, 7, 16 – кольца; 6 – коллектор переброса гелия; 8 – стенка наружная; 9, 12 – стенки тракта гелия; 10, 11, 13, 14 – стенки тракта генераторного газа; 15 – фланец отвода гелия; 17 – коллектор отвода гелия; 18 – днище внутреннее

Таблица 4

Технологические и габаритно-массовые характеристики цилиндрического теплообменника РД171

Наименование параметра, размерность	Величина
Технологические характеристики	
Количество деталей, шт.	32
Количество сварных швов, шт.	19
Количество паяных швов, шт.	323
Габаритно-массовые характеристики	
Габариты, мм	396×510
Масса, кг	75

Работоспособность и надежность цилиндрического ТО доказана успешной многолетней работой в составе ЖРД, однако он обладает следующими недостатками:

- тип конструкции предусматривает наличие объема в центральной части ТО, не участвующего в теплообмене и увеличивающего его габаритно-массовые характеристики;
- выполняется из большого количества разных материалов.

После проведения анализа опыта изготовления и эксплуатации кожухотрубчатых и цилиндрических ТО, при создании ТО однокамерного ЖРД разработчиками был выбран пластинчато-ребристый тип конструкции, главным преимуществом которого является высокая компактность формы поверхности теплообмена, позволяющая значительно уменьшить габаритно-массовые характеристики, трудоемкость и стоимость изготовления [4, 5].

На рис. 3 представлен пластинчато-ребристый ТО однокамерного ЖРД, предназначенный для нагрева газообразного гелия, используемого на наддув бака окислителя (ТО-БО) и бака горючего (ТО-БГ) РН. ТО является неразъемной паяно-сварной конструкцией и включает корпус, детали подвода и отвода теплоносителей.

Корпус состоит из стенок тракта генераторного газа, стенок тракта гелия, цилиндра и крышек, спаянных между собой медно-никелевым припоем. Подвод и отвод теплоносителей к корпусу осуществляется через втулку, коллекторы, фланец и штуцера. Тракта подогревающего и подогреваемого теплоносителей чередуются между собой. Стенки и крышки представляют собой круглые пластины с поверхностью теплообмена в виде концентрических кольцевых каналов, образованных оребрением прямоугольного профиля. Крышки отличаются от стенок большей толщиной. Подвод и отвод теплоносителей к каналам осуществляется через соответствующие группы отверстий и прорезей. Коллекторы тракта генераторного газа и коллекторы тракта гелия имеют фигурную форму и выполняются штамповкой. Параметры теплоносителей в ТО однокамерного ЖРД представлены в табл. 5.

Таблица 5

Параметры теплоносителей в пластинчато-ребристом теплообменнике однокамерного ЖРД

Наименование параметра, размерность	Гелий		Генераторный газ
	ТО-БО	ТО-БГ	
Массовый секундный расход, кг/сек	0,18	0,035	5
Температура на входе в ТО, °С	-183		550
Температура на выходе из ТО, °С	243	286	447
Давление на входе в ТО, кгс/см ²	20		283
Давление на выходе из ТО, кгс/см ²	10		257

Пластинчато-ребристый ТО однокамерного ЖРД успешно прошел экспериментальную проверку, однако при его изготовлении были выявлены следующие недостатки конструкции:

- неравномерное распределение теплоносителей по теплообменной поверхности стенок уменьшает коэффициент полезного действия теплопередачи ТО;
- большое количество деталей, паяных и сварных швов уменьшает его технологичность, прочность и надежность.

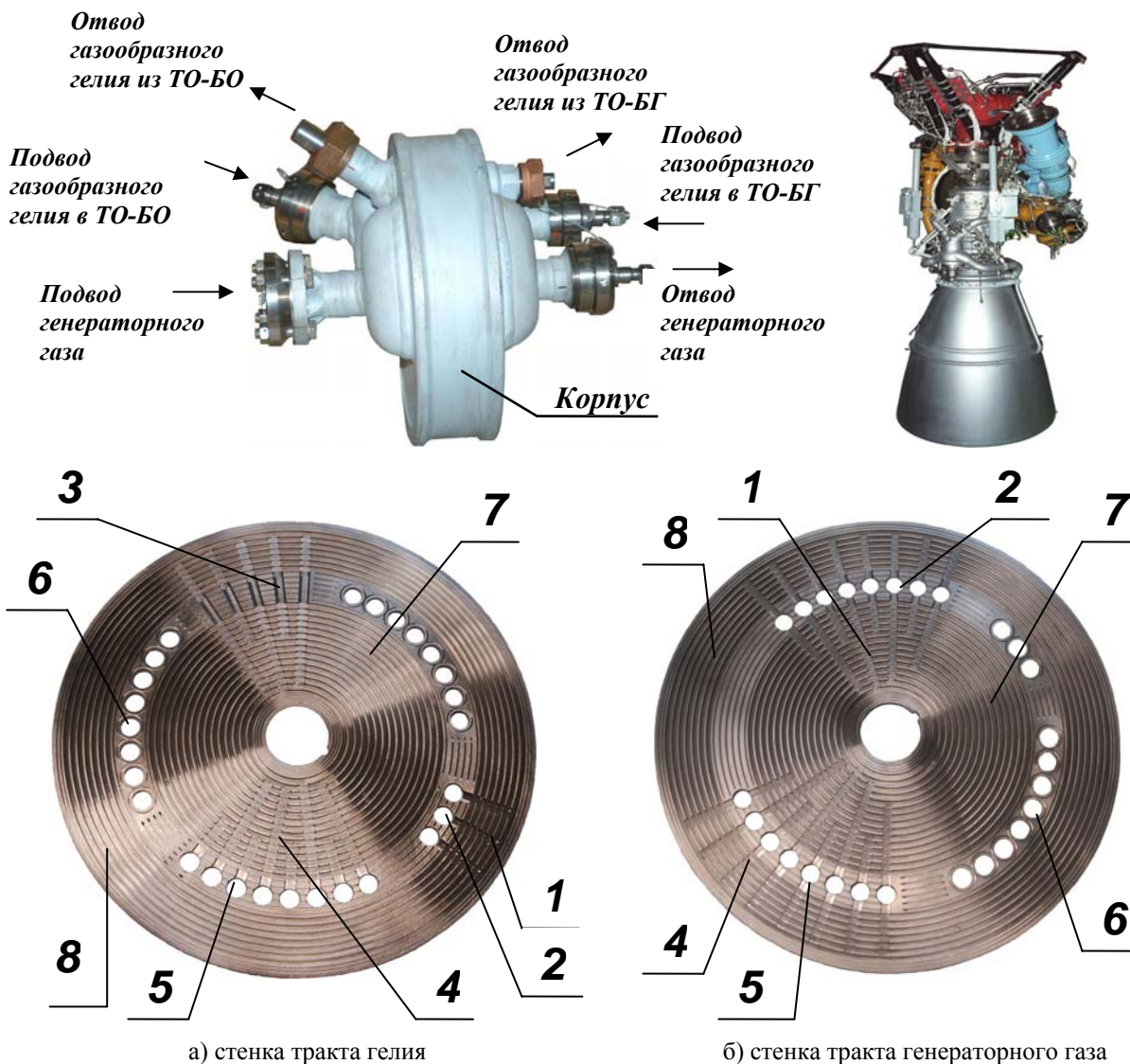


Рис. 3. Пластинчато-ребристый теплообменник однокамерного ЖРД:
 1 – подводящие прорези; 2 – подводящие отверстия; 3 – распределительные прорези;
 4 – отводящие прорези; 5 – отводящие отверстия; 6 – перепускные отверстия;
 7 – центральные каналы; 8 – периферийные каналы

Унифицированный пластинчато-ребристый ТО был создан с учетом недостатков пластинчато-ребристого ТО однокамерного ЖРД (рис. 4). ТО является неразъемной паяно-сварной конструкцией и включает корпус, детали подвода и отвода теплоносителей. Корпус состоит из стенок тракта генераторного газа, стенок тракта гелия, цилиндра и крышек, спаянных между собой медно-никелевым припоем. Подвод и отвод теплоносителей к корпусу осуществляется через втулку, коллекторы, фланец и штуцера.

Главным отличием его конструкции является существенное упрощение теплообменной поверхности стенок и крышек, которая представляет собой каналы прямоугольного профиля, подвод и отвод теплоносителей к каналам осуществляется через соответствующие группы прорезей. За счёт оптимизации теплообменной поверхности удалось добиться равномерного распределения скорости теплоносителей по каналам (рис. 5), что позволило увеличить коэффициент полезного действия теплопередачи ТО и сократить количество стенок в корпусе. Также коллекторы тракта генераторного газа выполнены во втулке, а коллекторы тракта гелия выполнены во внутренней полости цилиндра, что упрощает технологию и сокращает стоимость изготовления. В таблице 6 представлены технологические и габаритные характеристики теплообменников однокамерного ЖРД.

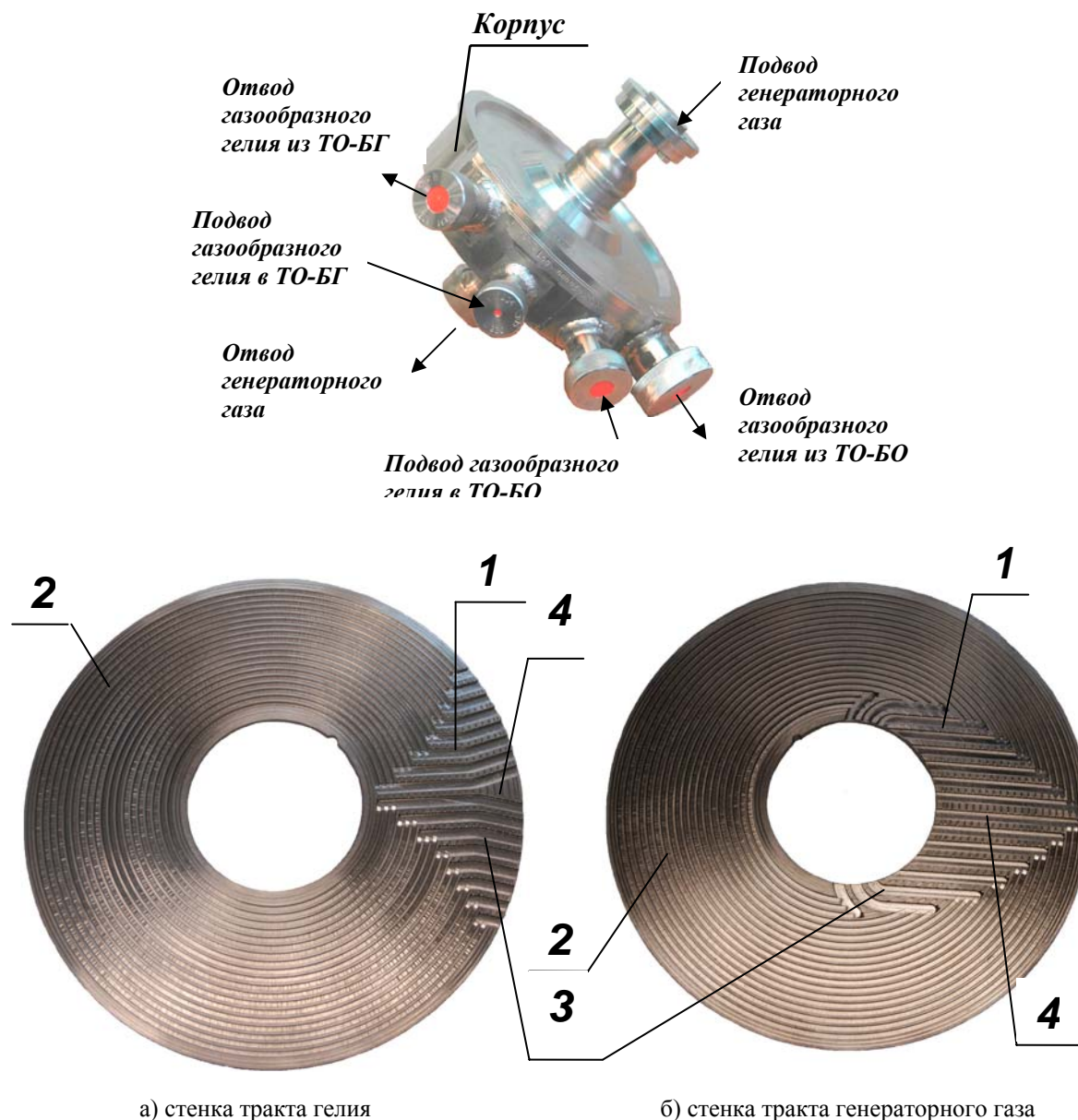


Рис. 4. Унифицированный пластинчато-ребристый теплообменник однокамерного ЖРД:
 1 – подводящие прорезы; 2 – концентрические каналы; 3 – отводящие прорезы; 4 – перегородка

Таблица 6

Сравнение технологических и габаритно-массовых характеристик
 пластинчато-ребристых теплообменников однокамерного ЖРД

Наименование параметра, размерность	Пластинчато-ребристый теплообменник	Унифицированный теплообменник
Технологические характеристики		
Количество деталей, шт.	33	27
Количество сварных швов, шт.	16	10
Количество паяных швов, шт.	245	26
Габаритно-массовые характеристики		
Высота корпуса, мм	74	68
Габариты, мм	279×303	279×351
Масса, кг	33,5	28,5

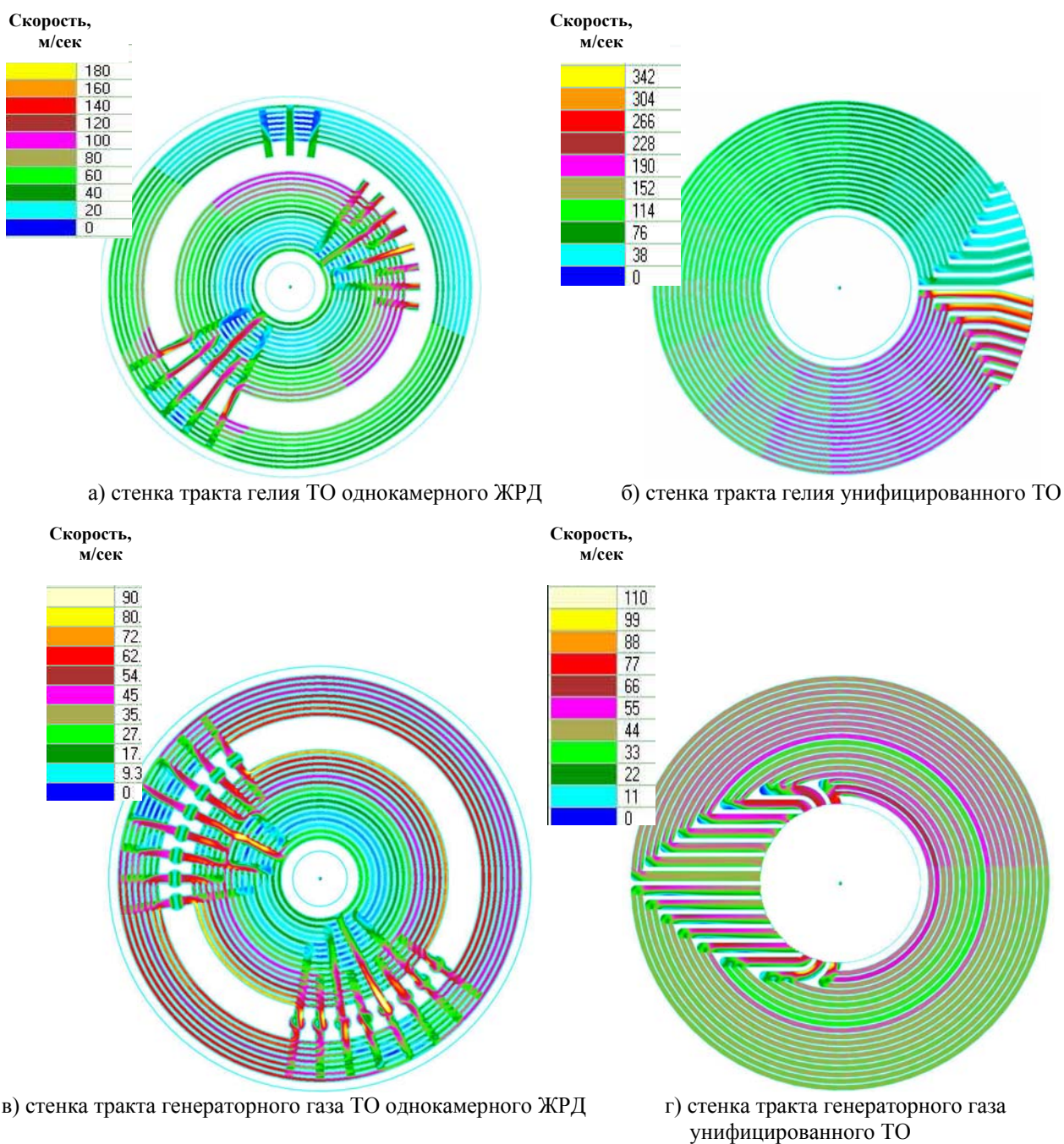


Рис. 5. Распределение скорости теплоносителя по теплообменной поверхности стенки пластинчато-ребристых теплообменников однокамерного ЖРД

Таким образом, унифицированный ТО однокамерного ЖРД имеет следующие преимущества:

- более высокий коэффициент полезного действия теплопередачи;
- более технологичный;
- более надежный;
- более удобный для изготовления и эксплуатации, так как имеет меньшую массу;
- более перспективный, так как его конструкция является унифицированной и позволяет создавать ТО для других ЖРД путем изменения лишь количества стенок и деталей подвода и отвода теплоносителей.

В настоящее время унифицированный ТО однокамерного ЖРД прошел полную автономную отработку и подготовлен к испытаниям в однокамерном ЖРД.

Выводы

1. Весь положительный опыт создания и эксплуатации ТО ЖРД реализован в унифицированном пластинчато-ребристом ТО однокамерного ЖРД, который является на сегодняшний день самым эффективным, технологичным, надежным, перспективным и экономичным.

2. Положительные результаты проведенных работ позволяют прогнозировать дальнейшее применение пластинчато-ребристых ТО на вновь разрабатываемых ЖРД.

Литература

1. Под ред. проф. Гахуна Г.Г. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1989. 423 с.

2. Под руков. академика Глушко В.П. Альбом конструкций ЖРД. Часть третья. // М.: Ордена Трудового Красного Знамени Военное Изд-во Министерства Обороны СССР, 1969. 204 с.

3. Перевод с англ. под ред. Мартышенко О.Г., Михалевича А.А., Шикова В.К. Справочник по теплообменникам в двух томах // М.: Энергоатомиздат, 1987. 1 том 559 с. 2 том 351 с.

4. Кошкин В.К., Калинин Э.К. Теплообменные аппараты и теплоносители (теория и расчёт) М.: Машиностроение, 1971. 200 с.

5. Барановский Н.В., Коваленко Л.М., Ястребенецкий А.Р. Пластинчатые и спиральные теплообменники М.: Машиностроение, 1973. 288 с.