



УДК 629.7.08

**<sup>1</sup>Г. В. Дмитриев, <sup>1</sup>О. В. Шилкин, <sup>1</sup>А. П. Колесников,  
<sup>1</sup>В. В. Двирный, <sup>2</sup>Е. С. Сидорова**

<sup>1</sup>ОАО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнева»,  
г. Железногорск, Красноярский край, Россия

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛООБМЕННИКОВ В ДВУХФАЗНОЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ПРИ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*Разработан автономный двухфазный модуль (АДМ), применяемый в качестве средства термостатирования КА при наземной отработке. Рассмотрены технические характеристики составляющих АДМ. Приведены преимущества термостатирования КА с помощью АДМ. Представлена двухфазная система терморегулирования с механическим насосом для прокачки теплоносителя, определены преимущества двухфазного контура по сравнению с однофазным.*

*Ключевые слова: двухфазная система терморегулирования, наземная отработка, автономный двухфазный модуль, система терморегулирования КА, термостатирование КА, компрессорная машина, парогенератор, гидроаккумулятор, электромеханический насос.*

**<sup>1</sup>G. V. Dmitriev, <sup>1</sup>O. V. Shilkin, <sup>1</sup>A. P. Kolesnikov,  
<sup>1</sup>V. V. Dvirny, <sup>2</sup>E. S. Sidorova**

<sup>1</sup>JCS «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»,  
Zheleznogorsk, Russia

<sup>2</sup>Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

## APPLICATION OF HEAT-EXCHANGE UNITS IN BINARY RETURN SYSTEM FOR TECHNOLOGY GROUND WORK DEVELOPING OF SPACECRAFT

*Abstract: An on-board binary return system module, which is used as thermal control chamber instrument for technology ground work developing of spacecraft, has been developed. We provide the analysis of the specification of the binary return system module. We present the advantages of mechanical pump-based temperature control chamber for heat transfer fluid injection by means of binary return system module versus the single-phase module.*

*Key words: Binary return system, technology ground work, on-board binary return system module, temperature control chamber for spacecraft, temperature control, compressor station, vapor generator, hydro accumulator, electromechanical pump.*

Разработка активных двухфазных систем терморегулирования космических аппаратов (далее – КА) имеет более чем 20-лет-

нюю историю, и по сей день создание совершенных летных систем остается вопросом будущего [1].

Создание совершенных прототипов и их наземные испытания дают опыт, незаменимый при создании столь сложных и многофактор-

ных систем, как циркуляционные двухфазные системы терморегулирования (далее – СТР) [2].

Рассмотрим активную двухфазную систему терморегулирования, применяемую в качестве средства термостатирования КА при наземной отработке.

В рамках научно-исследовательских работ в ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» был создан прототип двухфазной СТР – автономный двухфазный модуль (далее – АДМ). После завершения экспериментальной отработки в 1997 году АДМ используется для термостатирования КА при наземных электрических испытаниях. Он позволяет проводить испытания КА тепловыделением до 3 кВт.

При наземных испытаниях штатная однофазная СТР КА находится в нерегулируемом циркуляционном режиме. Тепловая связь контура штатной СТР с двухфазным наземным контуром осуществляется через пластинчатый теплообменник.

Терморегулирование КА посредством АДМ производится по одной из трех бортовых температур в зависимости от режима испытаний: верхний, нижний температурный предел, нормальный уровень температур. Управление АДМ полностью автоматическое, осущест-

вляется автоматизированным испытательным комплексом. Программа управления АДМ является частью пакета программ управления КА при наземных испытаниях. Алгоритм управления основан на дежурном контроле параметров АДМ и температурных параметров КА. Схема АДМ приведена на рис. 1.

### В составе АДМ имеется:

- циркуляционный лабиринтно-винтовой насос;
- аккумулятор жидкости с нагревателями;
- капиллярные испарители;
- парогенератор;
- холодильная машина;
- рекуперативный теплообменник;
- дроссели;
- вентили;
- гибкие трубопроводы;
- датчики расхода, температуры, давления и т.п.

Терморегулирование АДМ осуществляется с помощью нагревателей аккумулятора жидкости и нагревателей капиллярных испарителей.

Режим хладотеплопроизводительности устанавливается подводом пониженной или повышенной мощности к парогенератору.

- 1 – насос
- 2 – гидроаккумулятор
- 3 – парогенератор
- 4 – холодильная машина
- 5 – рекуператор
- 6 – расходомер
- 7 – дроссель
- 8 – капиллярный испаритель
- 9 – вентиль
- 10 – гибкий трубопровод
- 11 – технологический теплообменник КА

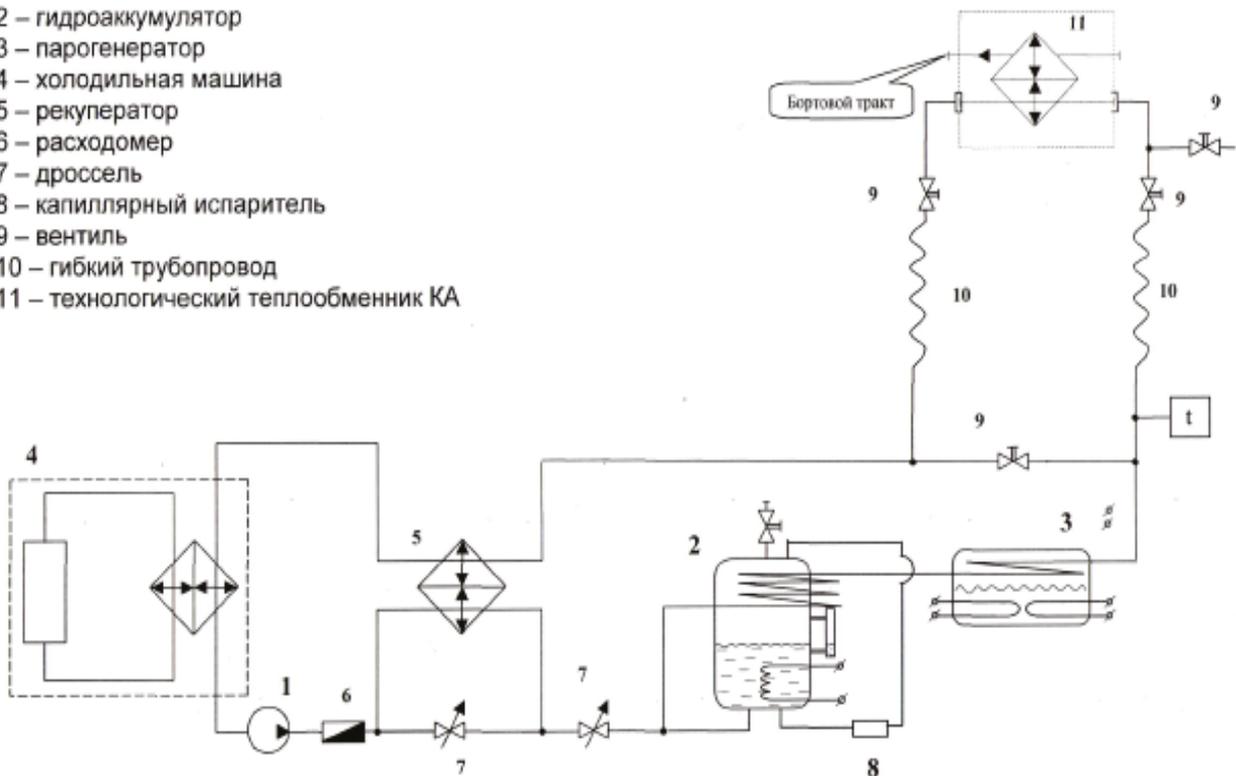


Рис. 1. АДМ, состыкованный с бортовым теплообменником КА

## 1. Электронасосный агрегат (ЭНА)

Поскольку в двухфазной системе не исключены случаи работы насоса вблизи линии насыщения паров и при этом требуется значительный по величине напор, была разработана конструкция самовсасывающего лабиринтно-винтового насоса:

- насос обеспечивает расход теплоносителя  $20 \text{ см}^3/\text{с}$  при напоре  $1,5 \text{ кгс}/\text{см}^2$ ;
- энергопотребление составляет  $40 \text{ Вт}$ , напряжение питания  $27 \text{ В}$ ;
- ресурс работы  $10$  лет;
- в составе ЭНА имеются резервный насос и обратный клапан.

## 2. Гидроаккумулятор

Является как емкостью для хранения теплоносителя, так и органом регулирования рабочей температуры АДМ. Схема гидроаккумулятора с устройствами регулирования температуры показана на рис. 2.

Используются два способа нагрева аккумулятора: два нагревателя расположены непосредственно в корпусе; два нагревателя установлены вне корпуса в контурах с капиллярными испарителями.

Капиллярные испарители были применены для повышения динамики системы, чтобы исключить необходимость нагрева всей массы жидкости в гидроаккумуляторе. Поток пара в полость гидроаккумулятора поступает при включении капиллярного испарителя. При поступлении пара в гидроаккумулятор одновременно с ростом давления пара происходит вытеснение из него части жидкости. Количество жидкости в конденсаторе холо-

дильной машины увеличивается, то есть увеличивается термическое сопротивление контура. В результате устанавливается более высокая рабочая температура в системе.

Снижение температуры происходит при преобладании процесса конденсации. Конденсация пара в гидроаккумуляторе происходит на проточном змеевике.

Хладопроизводительность змеевика настраивается дросселем байпасной линии рекуперативного теплообменника. На предельных режимах она равна суммарной мощности нагревателей.

Баланс нагрева и охлаждения на режиме устанавливается посредством алгоритмического управления нагревателями.

Суммарная мощность нагревателей гидроаккумулятора составляет  $400 \text{ Вт}$ .

## 3. Парогенератор

Парогенератор двухфазного контура имеет два назначения:

- в режиме охлаждения КА он обеспечивает экономийзерный нагрев жидкости и подготовку двухфазной смеси, поступающей в теплообменник КА (работающий в режиме испарения);
- в режиме нагрева КА парогенератор обеспечивает испарение теплоносителя, поступающего в теплообменник КА (работающий в режиме конденсации).

Максимальная мощность парогенератора  $4,5 \text{ кВт}$ . Для исключения кризисов кипения и перегрева пара в конструкции парогенератора применен промежуточный теплоноситель. Теплоноситель основного контура проходит

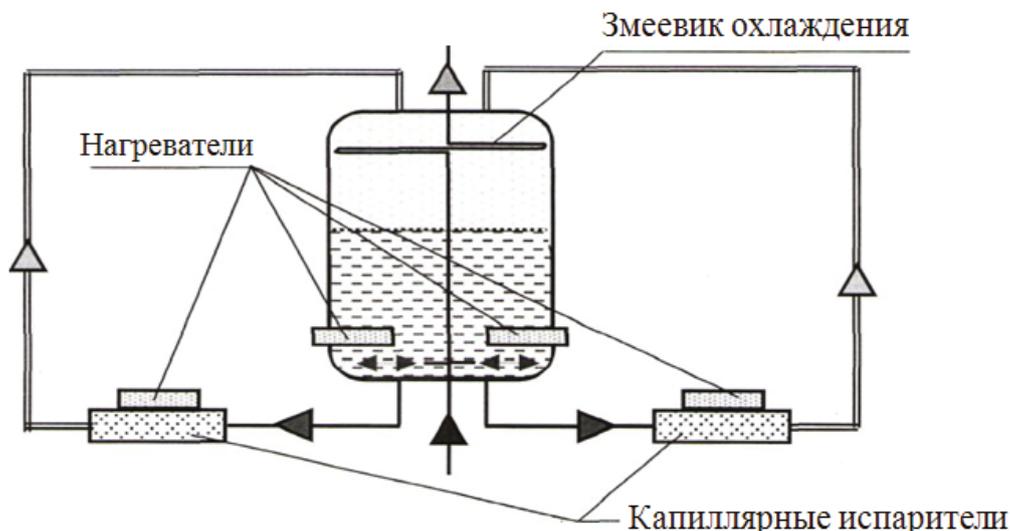


Рис. 2. Гидроаккумулятор с устройствами регулирования температуры

по змеевику, расположенному в паровой полости парогенератора, испытывая при этом нагрев и частичное испарение. Тепло к промежуточному теплоносителю подводится трубчатыми нагревателями, установленными в жидкостной полости. Для обеспечения эффективной конденсации паров на поверхности змеевика промежуточный теплоноситель при заправке деаэрируется.

#### 4. Компрессорная холодильная машина

Холодильная машина воздушного охлаждения обеспечивает конденсацию и переохлаждение теплоносителя. В ее составе используется пластинчатый теплообменник. Хладопроизводительность холодильной машины до 4,5 кВт. В составе АДМ имеется резервная холодильная машина.

#### Технические характеристики АДМ:

- теплоноситель-R-142b;
- хладопроизводительность до 3 кВт;
- теплопроизводительность до 3 кВт;
- длина гибких транспортных магистралей 12 м;
- ресурс работы 10 лет;
- управление активное алгоритмическое;
- рабочий диапазон температур от  $-15$  до  $+45$  °С;
- точность поддержания температуры  $\pm 2,5$  °С (в любой точке рабочего диапазона).

#### Преимущества термостатирования КА с помощью АДМ

Использование двухфазного теплоносителя существенно упрощает операции с технологическим теплообменным оборудованием.

Не требуется его предварительная заправка, так как достаточно отвакуумировать полость после стыковки для удаления неконденсирующихся газов (воздуха), а затем открыть концевые вентили АДМ, после чего состыкованная полость оказывается заполненной парами теплоносителя.

Не требуется использование гидравлических разъемов, гибких трубопроводов, компенсационного устройства в составе технологического теплообменного оборудования. Достигается эффективный механизм отвода тепловой нагрузки, выделяемой оборудованием спутника. Коэффициент теплопередачи технологического теплообменника увеличи-

вается в 1,5–1,6 раза по сравнению с однофазным течением по обеим полостям.

При кипении теплоносителя отвод тепла происходит изотермически, что также дает существенный выигрыш по температурному напору.

Процессы передачи тепла для случая жидкостно-жидкостного и двухфазно-жидкостного механизма теплообмена, полученные исходя из условия равных входных температур подаваемого теплоносителя СОР и расходной теплоемкости однофазного теплоносителя (на базе изооктана), равной 130 Вт/К, представлены на рис. 3 и 4.

График на рис. 3 получен применительно к теплообменнику с параметром  $kF = 200$  Вт/К. Как можно видеть, для отвода тепла 3000 Вт требуется два теплообменника (среднеарифметический температурный напор составляет  $\Delta T = 7,5$  °С).

График на рисунке 4 получен исходя из того, что  $kF$  теплообменника при испарении теплоносителя по полости АДМ составляет по величине  $kF = 350$  Вт/К.

Среднеарифметический температурный напор составляет 10,5 °С, а отводимое тепло при этом более 3600 Вт.

Малые размеры технологического теплообменника позволяют интегрировать его в конструкцию КА в целях повышения надежности, так как в этом случае по завершении испытаний КА не требуется демонтаж технологических элементов гидротракта СТР, не требуется наличие концевых вентилях.

АДМ является прототипом двухфазной циркуляционной СТР, для которого решены задачи:

- безотказной работы циркуляционного насоса при обеспечении высоких гарантийных сроков эксплуатации;
- локального отвода больших тепловых нагрузок;
- терморегулирования без использования механических устройств, посредством нагрева аккумулятора жидкости;
- использования капиллярных структур в составе активных систем (для преодоления неопределенности в положении границы раздела фаз при невесомости);
- автоматического управления ДФ СТР совместно с управлением другими подсистемами КА.

Использование АДМ в качестве средства термостатирования КА при наземных испы-

таниях позволило применить компактное технологическое теплообменное оборудование, упростить операции по его использованию.

Значительный срок успешной эксплуатации АДМ позволяет использовать примененные в нем технические решения для создания перспективных бортовых двухфазных СТР.

### Двухфазная система терморегулирования с механическим насосом для прокачки теплоносителя

Такая СТР представляет собой парожидкостный контур, проходящий через приборный блок и радиатор, и дополнительно вклю-

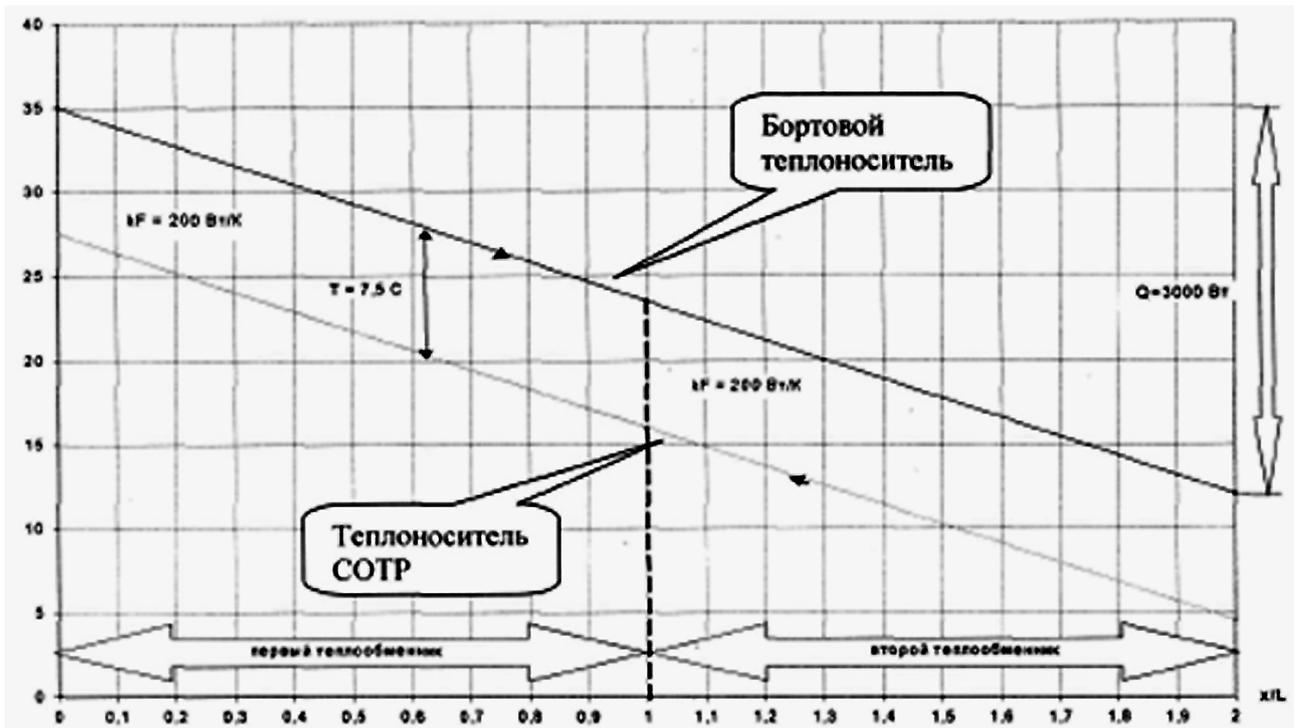


Рис. 3. Жидкостно-жидкостный теплообменник

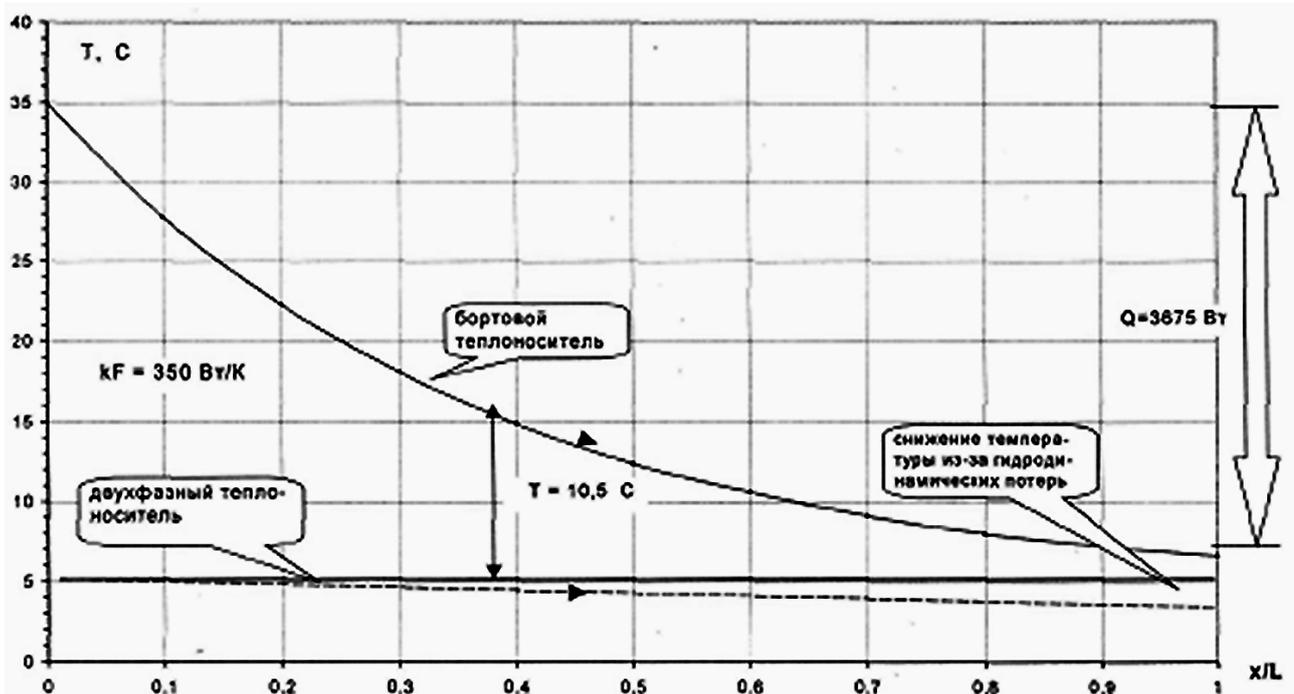


Рис. 4. Двухфазно-жидкостный теплообменник

чает в себя гидроаккумулятор, смеситель и перепускной клапан (рис. 5).

Для нормального функционирования электромеханического насоса двухфазного контура необходимо, чтобы на его вход поступала только жидкая фаза. Однако в условиях невесомости положение границы раздела фаз «пар-жидкость» четко не определено, что требует применения смесителя и гидроаккумулятора (ГА) с двумя полостями, разделенными гибкой мембраной.

Рассмотрим схему теплопередачи, осуществляемой в двухфазном контуре. Теплоноситель в жидкой фазе (ЖТ) принудительно прокачивается через приборный блок, в котором в зависимости от температуры прибора происходит переход теплоносителя либо в паровую фазу (ПТ) при охлаждении прибора, либо в жидкую фазу при его нагреве. В результате происходит выравнивание температур в приборном блоке и отбор излишков тепла для их последующей передачи на радиатор.

Расход теплоносителя в контуре подбирается таким образом, чтобы при пиковых тепловыделениях приборов в нем после выхода

из приборного блока присутствовала в основном паровая фаза.

В процессе прохождения ПТ через радиатор происходит передача тепла в окружающее космическое пространство, вследствие чего теплоноситель конденсируется (полностью или частично) и поступает в смеситель. В смесителе конденсация теплоносителя завершается, и в ГА передается только жидкая фаза.

Регулирование процесса перевода паровой фазы теплоносителя в жидкую происходит по сигналу датчика температуры, управляющего положением перепускного клапана, с помощью которого часть теплоносителя может отводиться мимо радиатора.

Таким образом, ГА обеспечивает термостабилизацию теплоносителя в тракте перед насосом вблизи температуры фазового перехода жидкости в пар.

Гидроаккумулятор также стабилизирует давление в гидротракте за счет изменения объема газовой полости в процессе работы двухфазного компонента (ДФК). Так, на момент начала работы ДФК, когда в нем отсутствует паровая фаза, весь гидротракт заполнен жидкой фазой и газовая полость ГА расширяется

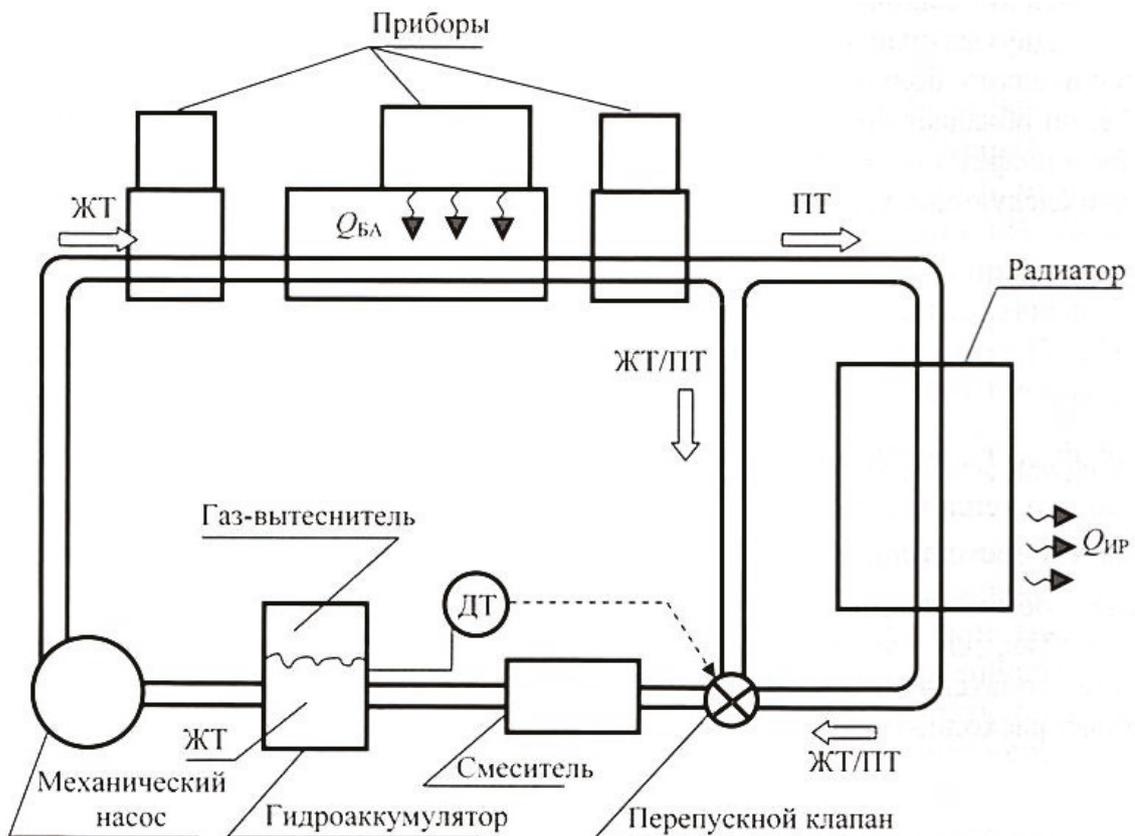


Рис. 5. Гидравлическая схема двухфазной СТР с механическим насосом: ЖТ – жидкий теплоноситель; ПТ – парообразный теплоноситель

до максимального размера за счет жидкостной полости. В процессе работы ДФК и появления паровой фазы часть ЖТ вытесняется в ГА.

Двухфазный контур с механическим насосом позволяет переносить значительно больше тепла на единицу массового расхода теплоносителя, то есть он обладает большей тепловой эффективностью, чем в случае применения однофазного жидкого теплоносителя, что может быть оценено с помощью следующих уравнений:

$$Q_{\text{БА}} = \dot{m}_{\text{ДФ}} \cdot r_{\text{ТН}} \cdot \dot{r}_{\text{П}} = \dot{m}_{\text{ОФ}} \cdot \Delta T \cdot C_{\text{ОФ}}, \quad (1)$$

$$\frac{\dot{m}_{\text{ДФ}}}{\dot{m}_{\text{ОФ}}} = \frac{\Delta T \cdot C_{\text{ОФ}}}{r_{\text{ТН}} \cdot r_{\text{П}}},$$

где  $\dot{m}_{\text{ДФ}}$ ,  $r_{\text{ТН}}$  – массовый расход и скрытая теплота преобразования двухфазного теплоносителя;  $r_{\text{П}}$  – доля теплоносителя, находящегося в парообразном состоянии;  $\dot{m}_{\text{ОФ}}$ ,  $\Delta T$ ,  $C_{\text{ОФ}}$  – массовый расход, перепад температур и теплоемкость однофазного теплоносителя.

Так, для однофазного жидкостного контура с теплоносителем на основе изооктана (ЛЗТК) и двухфазного контура на аммиаке отношение массовых расходов будет следующим:

$$\frac{\dot{m}_{\text{ДФ}}}{\dot{m}_{\text{ОФ}}} = \frac{5^\circ\text{C} \cdot 2064 \text{ дж/кг}}{0,6 \cdot 1200,4 \cdot 10^{-3}} = 0,014, \quad (2)$$

то есть использование двухфазного контура, обладающего более высокой тепловой эффективностью по сравнению с однофазным, существенно снижает массу теплоносителя и энергозатраты на его прокачку.

Необходимо также отметить постоянство температуры паровой фазы теплоносителя по всей омываемой им поверхности, что улучшает условия работы приборов и повышает эффективность излучения радиатора.

Обобщенное сравнение двухфазной СТР с однофазной проводится с помощью удельного коэффициента переноса теплоты  $K_{\text{T}}$ :

$$K_{\text{T}} = \frac{Q_{\text{БА}} \cdot l}{M_{\text{СТР}} \cdot P_{\text{СТР}} \cdot m_{\text{рСЭП}}}, \quad (3)$$

где расстояние теплопереноса;  $M_{\text{СТР}}$ ,  $P_{\text{СТР}}$  – масса и энергопотребление СТР;  $m_{\text{рСЭП}}$  – удельные энергетические затраты СЭП, кг/Вт.

Таким образом, для обеспечения теплового режима КА негерметичного исполнения с помощью одноконтурной двухфазной СТР с капиллярным насосом требуются тепловые трубы (ТТ, КТТ, ГПТ), экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ), обогреватели. В ДФК с механическим насосом дополнительно используются гидроаккумулятор, смеситель, перепускной клапан, насос и блок управления СТР [3].

## Библиографические ссылки

1. Малоземов В. В. Тепловой режим космических аппаратов. М. : Машиностроение, 1980. 185 с.
2. Фаворский О. Н., Каданер Я. С. Вопросы теплообмена в космосе. М. : Высш. шк., 1967. 141 с.
3. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с., [24] с ил.

Статья поступила в редакцию  
04.11.2014 г.