

Г. А. З а р и ц к и й, В. П. Л е о н о в,
В. И. Л и х а ч е в

АНАЛИЗ И ВЫБОР РАБОЧИХ ТЕЛ ДЛЯ ГАЗОВОГО КОНТУРА ТЕПЛОВОГО НАСОСА

На основе проведенных расчетов выбрано рабочее тело верхнего газового контура двухкаскадного теплового насоса, обеспечивающего сброс теплоты из приборного отсека космического аппарата.

E-mail: crio@power.bmstu.ru

Ключевые слова: тепловой насос, газовый контур, турбоагрегат.

Развитие космической техники, характерное для настоящего времени, сопровождается ростом энерговооруженности космических систем и, как следствие, возрастанием нагрузки на системы обеспечения теплового режима (СОТР) приборных комплексов космических аппаратов (КА), обеспечивающих отвод в окружающее космическое пространство значительной доли подводимой к приборам и оборудованию КА энергии в соответствии с весьма невысокими КПД этих потребителей. Для систем среднесрочной и отдаленной перспективы уровни отводимой от оборудования КА мощности могут составлять десятки и сотни киловатт, причем уровень рабочих температур для термостатируемого оборудования СОТР, как правило, лежит ниже 325 К. Чтобы получить в рассматриваемой ситуации приемлемые площади радиационных теплообменников (РТО), с поверхности которых осуществляется сброс излучением неиспользуемой энергии, в состав СОТР требуется включить тепловые насосы (ТН), способные при минимальных затратах энергии обеспечить существенное повышение температуры поверхности РТО относительно рабочей температуры оборудования КА. Очевидно, что от эффективности ТН значительно зависят массогабаритные характеристики КА, которые являются одними из важнейших характеристик космической техники.

Исследование, результаты которого приведены в настоящей статье, посвящено вопросам повышения эффективности газового контура ТН, предназначенного для использования в составе СОТР перспективных космических систем, причем одним из существенных факторов, определяющих эффективность ТН, является соответствующий выбор газового рабочего тела.

Рассматриваемый газовый контур, принципиальная схема которого представлена на рис. 1, содержит газонагреватель, в котором теплота от термостатируемого оборудования передается к рабочему телу контура, компрессорно-детандерный турбоагрегат (компрессорная

ступень, детандерная ступень, электродвигатель), регенератор и концевой теплообменник, от которого тепловая энергия отдельным контуром передается к РТО.

Температура газа на входе газонагревателя (нижняя температура цикла) в рамках выполненных исследований принималась равной 345 К, температура на выходе из компрессора (верхняя температура цикла), достигнутая в ходе выполненных расчетно-конструкторских проработок, составила 607 К. Тепловая мощность, передаваемая в контуре, составляет 100 кВт. При этом давление на входе в компрессор равно 0,9 МПа, на выходе из компрессора — 1,13 МПа.

В настоящих исследованиях были рассмотрены следующие рабочие тела: гелий, смесь гелия и ксенона (11,6% масс. He и 88,4% масс. Xe, $M = 28$), аргон, неон, ксенон, криптон. Наиболее оптимальный из них выбирался с учетом следующих соображений. Азот (аналог гелий-ксеноновой смеси) как рабочее тело не рассматривался в настоящих исследованиях, поскольку данный газ не рассчитан на системы с длительным периодом эксплуатации, потому что азот реагирует с конструкционными материалами, используемыми в теплообменных аппаратах теплового насоса, в результате чего происходят нежелательные реакции с образованием нитридов. Например, реакция азота и ванадия с образованием нитрида ванадия: $2V + N_2 = 2VN$.

Минимальные массогабаритные характеристики теплообменного оборудования и турбомашины ТН достигаются повышением числа оборотов ротора турбомашин, снижением потерь в газовом контуре и снижением энергозатрат на прокачку рабочего тела, а также повышением эффективности теплообменного оборудования. Перечисленные параметры во многом определяются характеристиками используемого в контуре газа, а именно его теплоемкостью и молекулярной массой.

Для каждого из рассмотренных газов был рассчитан термодинамический цикл (рис. 2), были определены расходы газа, а также размеры рабочих колес турбокомпрессора и скорость вращения вала компрессорно-детандерного турбоагрегата. Основные результаты расчетных исследований представлены в таблице. Причем эффективность теплообменного оборудования в первом приближении может оцениваться по теплоемкости используемого в нем газа.

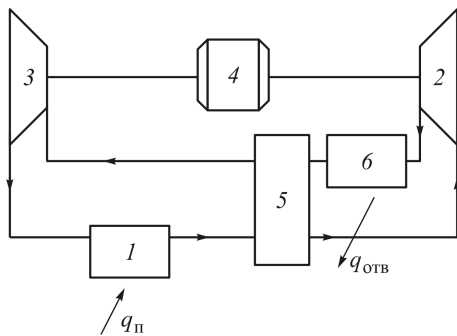


Рис. 1. Принципиальная схема газового контура:

1 — рабочее тело; 2 и 3 — компрессорная и детандерная ступени; 4 — электродвигатель; 5 — регенератор; 6 — теплообменник

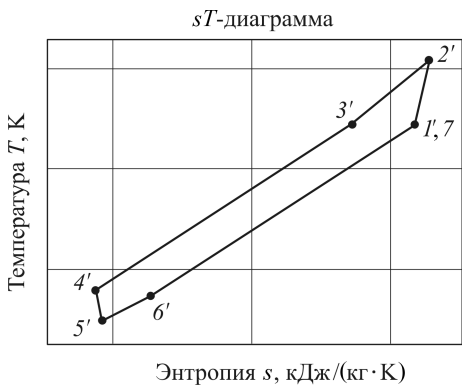


Рис. 2. Термодинамический цикл газового каскада ТН в общем виде:

1' — вход в компрессорную ступень; 2' и 3' — вход и выход из ТО и вход в регенератор; 4' и 5' — вход и выход из детандерной ступени, вход в К-ПТО; 6' — выход из К-ПТО, вход в регенератор; 7' — выход из регенератора

ет окружную скорость на рабочем колесе компрессора больше допустимой, ограниченной для титановых колес значением 500 м/с.

Основные характеристики рабочих тел и газового контура с их использованием

Параметр	Гелий	Неон	Смесь He + Xe	Аргон	Криптон	Ксенон
Молекулярная масса	4	20	28	40	83,8	131,2
Теплоемкость, кДж/(кг·К)	5,192	1,031	0,74	0,523	0,251	0,162
Расход, кг/с	1,288	6,495	7,398	12,7	26,61	41,14
Окружная скорость на рабочем колесе, м/с	709,5	315,9	268,7	226,8	157,4	125,13
Частота вращения, 1/с	1167	347	300	209,6	120,9	86,7
Диаметр рабочего колеса компрессора, м	0,193	0,29	0,285	0,344	0,414	0,459
Мощность двигателя, кВт	249,6	249,4	204	248	247,6	245,5

Неон имеет большую теплоемкость, чем смесь He + Xe, но энергетические и массогабаритные показатели неоновой турбомашины несколько хуже, чем для варианта с предлагаемой смесью.

Таким образом, для рассматриваемого типа ТН в качестве оптимального рабочего тела может быть рекомендована смесь гелия и ксенона (11,6% масс. He и 88,4% масс. Xe, $M = 28$).

Как следует из таблицы, минимальные энергозатраты достигаются при использовании в контуре смеси гелий–ксенон. По сравнению с ксеноном, аргоном и криптоном при прочих равных условиях смесь газов имеет бóльшую теплоемкость, меньший расход (а следовательно, и меньшие гидрпотери в контуре) и меньший диаметр рабочего колеса компрессора.

При этом бóльшая эффективность теплообменного оборудования может достигаться при использовании гелия или неона.

Однако гелий не годится в качестве рабочего тела, поскольку имеет