

УДК 629.78.048.7-716

П. Г. ГАКАЛ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА БАЗЕ ДВУХФАЗНОГО КОНТУРА ТЕПЛОПЕРЕНОСА

Системы терморегулирования космических аппаратов на базе двухфазных контуров теплопереноса обладают существенными преимуществами по сравнению с системами на базе однофазных контуров. Однако, наряду с достоинствами, двухфазные контуры имеют и некоторые недостатки. В частности, значительное перераспределение теплоносителя между контуром и гидравлическим аккумулятором в переходных режимах работы. В статье представлены различные способы уменьшения негативных эффектов, связанных с перераспределением теплоносителя. Анализ проводился на экспериментальном стенде, созданном для исследования теплогидравлических процессов в системах терморегулирования космических аппаратов.

Ключевые слова: теплогидравлический процесс, экспериментальный стенд, система терморегулирования космических аппаратов, двухфазный контур теплопереноса.

Введение

Мировой тенденцией развития космических аппаратов (КА) является расширение их функциональных возможностей, что приводит к росту потребляемой ими электрической энергии, большая часть которой затем выделяется в оборудовании КА, электронных приборах в виде теплоты. Для отвода теплоты, переноса ее к месту теплосброса с последующим отводом в окружающую среду, а также для поддержания требуемого температурного режима работы оборудования используются системы терморегулирования.

В настоящее время наиболее широко используются системы терморегулирования (СТР) на базе однофазных контуров теплопереноса (ОФ СТР). Однако рост энерговооруженности и линейных размеров КА привел к появлению систем на базе двухфазных контуров теплопереноса, так называемых двухфазных систем терморегулирования (ДФ СТР) с вынужденной прокачкой теплоносителя. Принципиальное отличие двухфазных систем терморегулирования от однофазных систем заключается в том, что теплоноситель в процессе переноса теплоты изменяет свое агрегатное состояние. В результате, двухфазные системы терморегулирования получают ряд преимуществ по сравнению с системами, использующими однофазные контуры. В частности [1]: ДФ СТР могут переносить значительно большее количество теплоты на единицу массового расхода, температуру охлаждаемых объектов можно поддерживать практически постоянной на всем участке теп-

лоподвода и близкой к температуре насыщения, так как она зависит только от давления, которое из-за малого расхода теплоносителя изменяется незначительно. Кроме того, все процессы теплопередачи, протекающие при изменении агрегатного состояния вещества (кипении, конденсации) более интенсивны, чем при обычном конвективном теплообмене. Поэтому масса, габариты теплообменных аппаратов ДФ СТР будут меньше по сравнению с аналогичным оборудованием ОФ СТР. Тем не менее, ДФ СТР обладает и недостатками, один из которых, заключается в более существенном перераспределении теплоносителя между элементами системы в переходных режимах работы.

1. Постановка задачи

Принципиальная схема системы терморегулирования на базе двухфазного контура теплопереноса с вынужденной прокачкой теплоносителя перспективного телекоммуникационного спутника корпорации THALES ALENIA SPACE с указанием типа приборов, их тепловыделения и температурного диапазона функционирования показана на рис. 1 [2, 3]. Система предназначена для отвода 6 кВт теплоты от электронных приборов и поддержания требуемого температурного диапазона их функционирования.

Система состоит из насоса (Н), трубопроводов, теплообменников-испарителей, расположенных в приборных панелях (ПП), радиаторов-излучателей (РИ), клапанов (Кл), гидроаккумулятора с тепловым регулированием (ТГА), конденсаторов (К), переох-

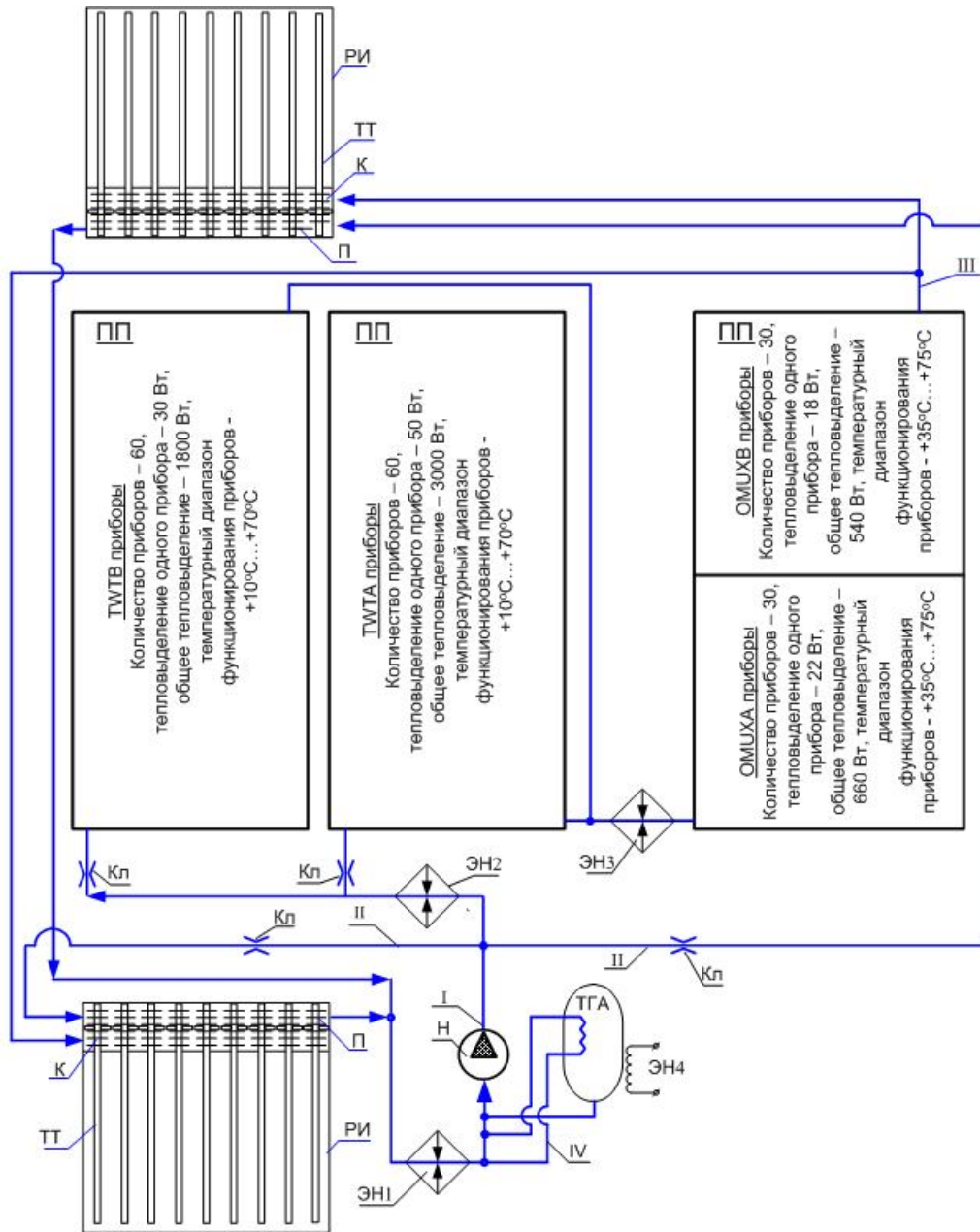


Рис. 1. Принципиальная схема системы терморегулирования на базе двухфазного контура теплопереноса телекоммуникационного спутника корпорации THALES ALENIA SPACE [2, 3]

ладителей (П) и электронагревателей (ЭН). Теплоноситель – аммиак. Радиаторы-излучатели соединены параллельно, испарители в приборных панелях – параллельно-последовательно.

Насос по напорной магистрали I нагнетает теплоноситель в контур. За насосом поток разделяется – большая часть по байпасной линии (II) поступает в переохладители (П), а оставшаяся часть в теплообменники-испарители, расположенные в приборных панелях. В теплообменниках-испарителях теплота от электронных приборов подводится к теплоносителю, который нагревается до состояния насыщения и кипит. На выходе из ПП теплоноситель находится

в двухфазном состоянии с паросодержанием $x \sim 0,8$. Для защиты системы от низких температур используются нагреватели ЭН1...ЭН3.

Отвод теплоты от теплоносителя в окружающую среду происходит в двух радиаторах-излучателях, соединенных параллельно. Каждый радиатор-излучатель включает в свой состав 27 теплоотводящих элементов (см. рис. 2). В теплоотводящем элементе в одном корпусе последовательно установлен конденсатор и переохладитель. Переохладители предназначены для поддержания кавитационного запаса на входе в насос на уровне $\Delta t_{\text{кав}} \geq 5^\circ\text{C}$. Для предотвращения попадания пара в зону переохлаж-

дения между конденсатором и переохладителем установлен капиллярный затвор. Двухфазный теплоноситель поступает в конденсаторы, где конденсируется. Затем конденсат, через капиллярный затвор, поступает в полость переохладителя, где смешивается с теплоносителем, поступающим по байпасной линии (II), и переохлаждается до температуры ниже температуры насыщения. Теплота, отводимая от теплоносителя в конденсаторе и переохладителе, по тепловым трубам передается излучающим панелям и отводится в окружающую среду.

Для регулирования давления и количества теплоносителя в контуре используется гидроаккумулятор с тепловым регулированием (ТГА). Давление в ТГА регулируется поддержанием баланса между теплотой, отводимой от двухфазного теплоносителя в ТГА к теплоносителю в байпасной линии IV и теплотой, подводимой электронагревателем ЭН4 (см. рис. 1). Если теплоты отводится больше, чем подводится – давление уменьшается и теплоноситель перетекает из контура в ТГА, если меньше – возрастает и теплоноситель перетекает из ТГА в контур.

В переходных режимах работы масса теплоносителя в системе изменяется. Если теплоноситель в системе при включении тепловой нагрузки или переходе на более «горячую» орбиту испаряется, то давление в контуре возрастает, и некоторая часть теплоносителя перетекает в ТГА. Если же теплоноситель конденсируется при снижении тепловой нагрузки или переходе на более «холодную» орбиту, то давление в контуре понижается, и теплоноситель из ТГА перетекает в контур.

Процесс перетекания теплоносителя из контура в ТГА может вызвать рост давления как в ТГА, так и во всей системе. Причина в том, что входящий жидкий теплоноситель, действуя как «жидкий» поршень сжимает пар, находящийся в ТГА. Затем, в результате теплообмена с холодной жидкостью, пар начинает конденсироваться, и давление понижается, но первоначальный рост давления может привести к росту температуры насыщения и, как следствие, к росту температуры электронных приборов.

Для уменьшения негативного влияния этого процесса предлагаются разные способы. Так, в [4], предлагается с помощью регуляторов расхода жидкости поддерживать примерно постоянное паросодержание на выходе из испарителей и, тем самым, минимизировать перетекание теплоносителя из контура в ТГА и обратно. Недостаток данного способа в том, что регуляторы расхода жидкости создают дополнительное гидравлическое сопротивление, что приводит к росту мощности насоса, его массы. В работе [5] предлагается использовать капиллярные теплообменники, на выходе из которых всегда насыщенный или перегретый пар. Однако в этом слу-

чае возникают проблемы с запуском системы, перераспределением расходов при неравномерном тепловыделении, особенно, когда в некоторых теплообменниках нет подвода тепла. Поэтому, в статье будут рассмотрены и проанализированы два других способа минимизации негативных эффектов, связанных с массообменом между контуром и ТГА, а именно:

1-й способ – Интенсификация отвода теплоты в байпасную линию IV путем увеличения через нее расхода теплоносителя

2-й способ – Варьирование расхода теплоносителя через теплообменники-испарители изменением оборотов насоса при изменении тепловой нагрузки или параметров окружающей среды.

2. Описание экспериментального стенда

Принципиальная схема экспериментального стенда, на котором проводился анализ, представлена на рис. 2 [2, 3]. Экспериментальный стенд состоит из модели ДФ СТР, системы, имитирующей теплоотвод, системы заправки и утилизации теплоносителя, системы управления и регулирования, системы измерения. Суммарный объем модели ДФ СТР с учетом объема ТГА (16,6 литров) равен ~27 литров. Масса заправляемого теплоносителя ~10,5 кг. Теплоноситель – аммиак. В стенде используется центробежный насос компании RealTechnology. Для минимизации влияния гравитации все элементы системы размещены в горизонтальной плоскости. Ключевые элементы оборудования, испарители, конденсаторы, насос полностью подобны аналогичным элементам прототипа. То есть, для них выдержано геометрическое подобие, выдержаны определяющие числа подобия. Кроме того, схема разводки трубопроводов в испарителе в стенде и прототипе полностью подобны.

Как и испарители, радиаторы-излучатели в стенде подобны аналогичным элементам прототипа. Каждый радиатор-излучатель стенда состоит из 27-ми теплоотводящих элементов, соединенных параллельно. Для теплоотводящих элементов стенда выдержано геометрическое подобие с аналогичными элементами ДФ СТР. Различие между штатной системой и стендом заключается в условиях теплоотвода в ОС. Так, в экспериментальном стенде теплота отводится к антифризу, который прокачивается через внутренний канал каждого теплоотводящего элемента (в штатной системе здесь устанавливается тепловая труба), затем антифриз переносит теплоту к месту теплосброса, где и осуществляется отвод теплоты в ОС (рис. 3).

Наряду с системой теплосброса, в состав стенда входит система измерения и регулирования. Сис-

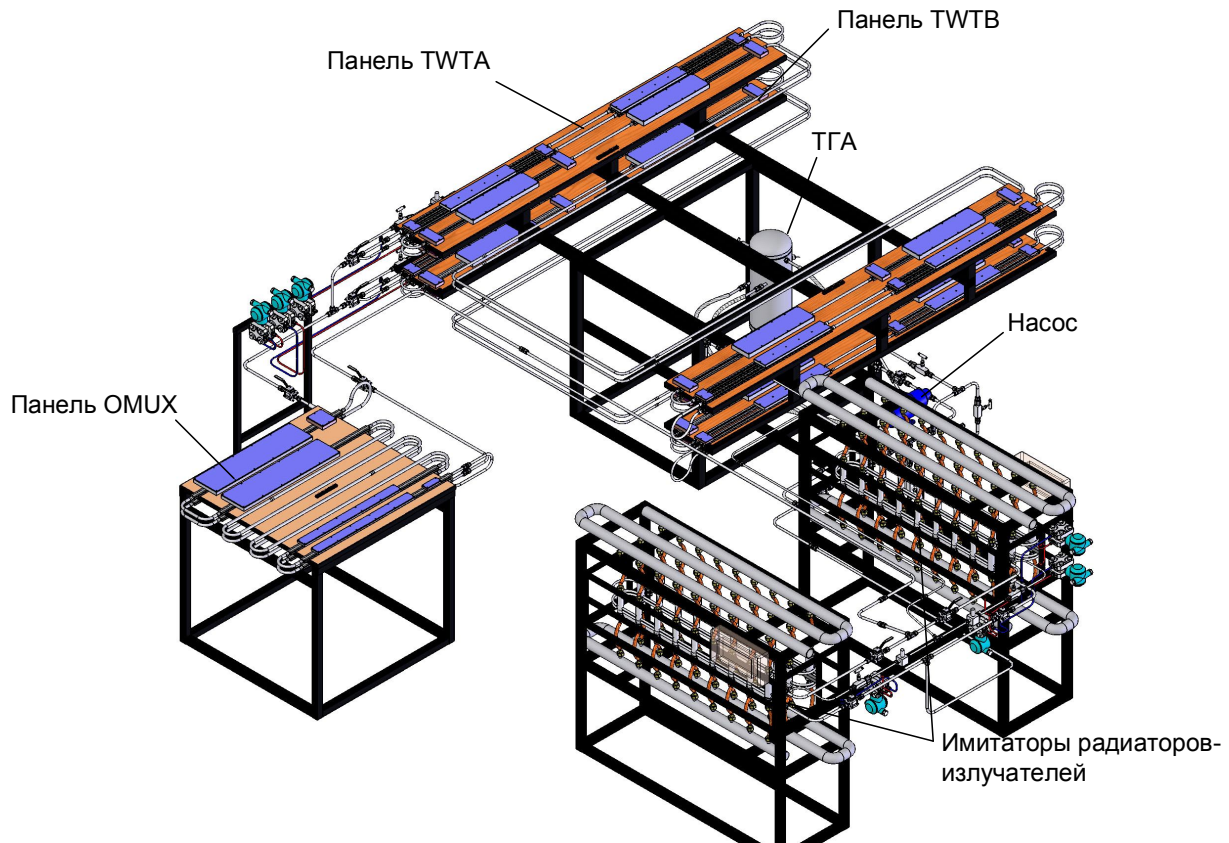


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального стенда

тема измерения и регулирования осуществляет измерение, запись и хранение ключевых параметров системы. Погрешности измерения составляют:

- давление - $\pm 0,5\%$ верхнего предела измерения (верхний предел 60 бар);
- перепад давления - $\pm 0,5\%$ верхнего предела измерения (верхний предел 0.6 бар);
- объемный расход - $\pm 0,5\%$ верхнего предела измерения, который составил: 0,016 л/с для расходомера TWTA и 0,010 л/с для расходомера TWTV;
- температура теплоносителя - $\pm 0,5\%$ верхнего предела измерения (верхний предел 70°C);
- температура приборов - $\pm 0,5\%$ верхнего предела измерения (верхний предел 70°C);
- напряжения, силы тока - $\pm 0,5\%$ верхнего предела измерения.

3. Результаты экспериментальных исследований

Целью экспериментов было исследование переходных процессов, связанных с изменением тепловой нагрузки. Одним из недостатков ДФ СТР является то, что при изменении тепловой нагрузки меняется паросодержание и, как следствие, происходит интенсивное перераспределение массы теп-

лоносителя между контуром и ТГА. Такое перераспределение может вызвать существенное изменение давления в ТГА, и соответственно в контуре. В результате изменяется температура приборов, так как в двухфазной области температура теплоносителя зависит только от давления. Так, например, при увеличении тепловой нагрузки паросодержание возрастает, теплоноситель из контура перетекает в ТГА. При этом на первом этапе, входящий в ТГА снизу холодный теплоноситель, действует как «жидкий» поршень, сжимая находящийся в верхней части ТГА пар и повышая давление в ТГА и системе. Затем, в результате, теплообмена, пар начинает конденсироваться и давление снижается.

Увеличение давления в ТГА приводит к росту давления во всем контуре и к росту температуры насыщения, что может привести к выходу температуры приборов за верхний предел их работоспособности. Для предотвращения роста давления предложено использовать следующие способы:

1. Путем увеличения расхода теплоносителя через байпас гидроаккумулятора IV (см. рис. 1) интенсифицировать отвод теплоты от теплоносителя в ТГА к теплоносителю в байпасе.
2. Варьируя оборотами насоса, регулировать параметры в контуре таким образом, чтобы исклю-

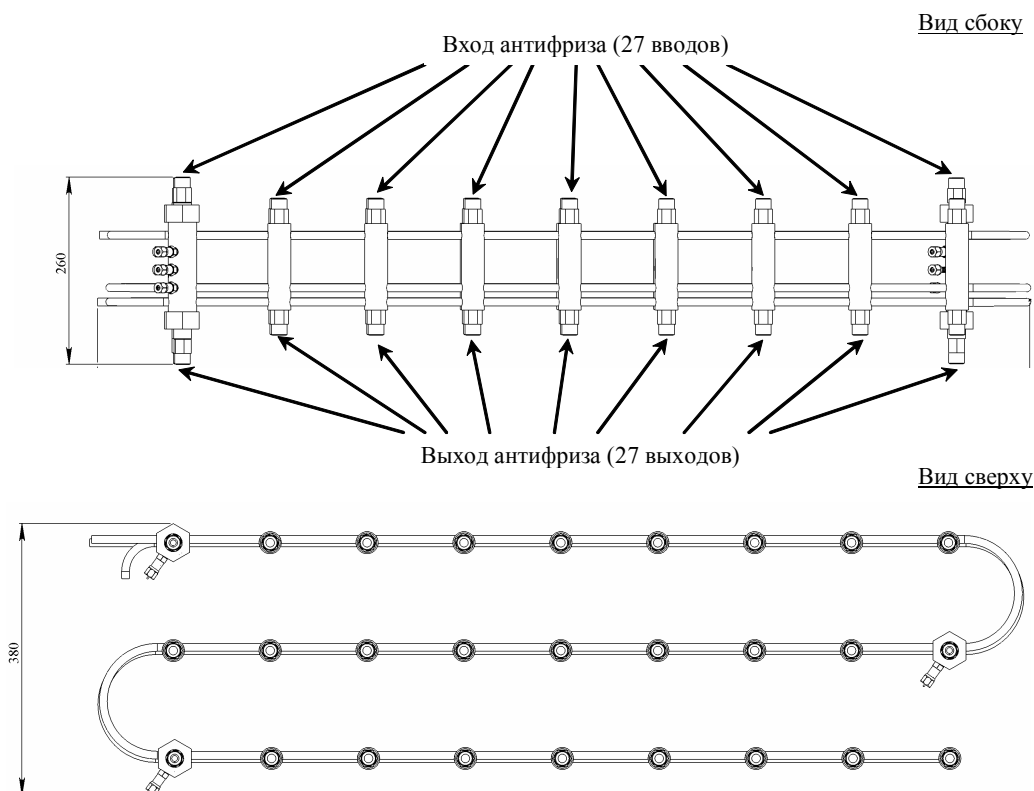


Рис. 3. Принципиальная схема радиатора-излучателя экспериментальной установки

чить существенное изменение паросодержания в контуре при изменении тепловой нагрузки.

Проанализируем влияние каждого из способов на следующие параметры: максимальную температуру приборов, кавитационный запас. При анализе также будем учитывать тип регулирования (активное или пассивное).

В процессе анализа проведено 4-и эксперимента с уменьшением и последующим увеличением тепловой нагрузки Q_{Σ} . Первые три эксперимента различаются между собой только величиной массового расхода в байпасной линии ТГА (линия IV, см. рис. 1): 0,0 г/с, 1,2 г/с и 1,8 г/с. В четвертом эксперименте варьировались обороты насоса, расход через байпас не изменялся и был равен 1,2 г/с. При снижении Q_{Σ} обороты насоса уменьшались с 22500 до 12600 об/мин. При увеличении Q_{Σ} обороты увеличены до исходной величины 22500 об/мин.

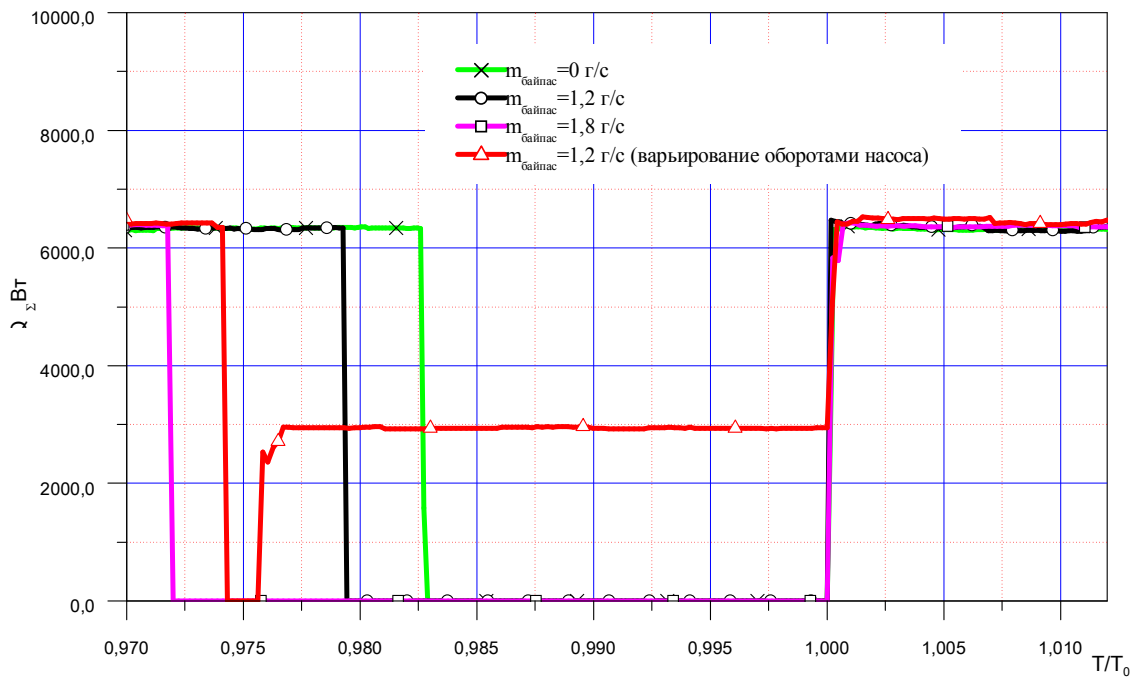
В 1-3 экспериментах в начальный момент времени тепловыделение уменьшалось с $Q_{\Sigma} \sim 6$ кВт до нуля, затем тепловыделение увеличивалось до исходной величины ($Q_{\Sigma} \sim 6$ кВт). В эксперименте #4 тепловыделение уменьшалось до нуля, затем увеличивалось до ~ 3 кВт и затем увеличивалось до $Q_{\Sigma} \sim 6$ кВт. Во всех экспериментах моделируются условия «горячей» орбиты (температура антифриза в радиаторах была примерно 51°C).

Результаты экспериментов представлены на графиках на рис. 4 – 6. Для удобства анализа на графиках используется безразмерная шкала времени, в которой T_0 – время увеличения тепловой нагрузки. На рис. 4,а приведены графики изменения тепловыделения, на рис. 4,б - изменения давления в ТГА. На рис. 5,а показано как меняется кавитационный запас насоса, на рис. 5,б – массовый расход через насос. И, наконец, на рис. 6,а – изменение массы теплоносителя в ТГА, на рис. 6,б – максимальной температуры прибора.

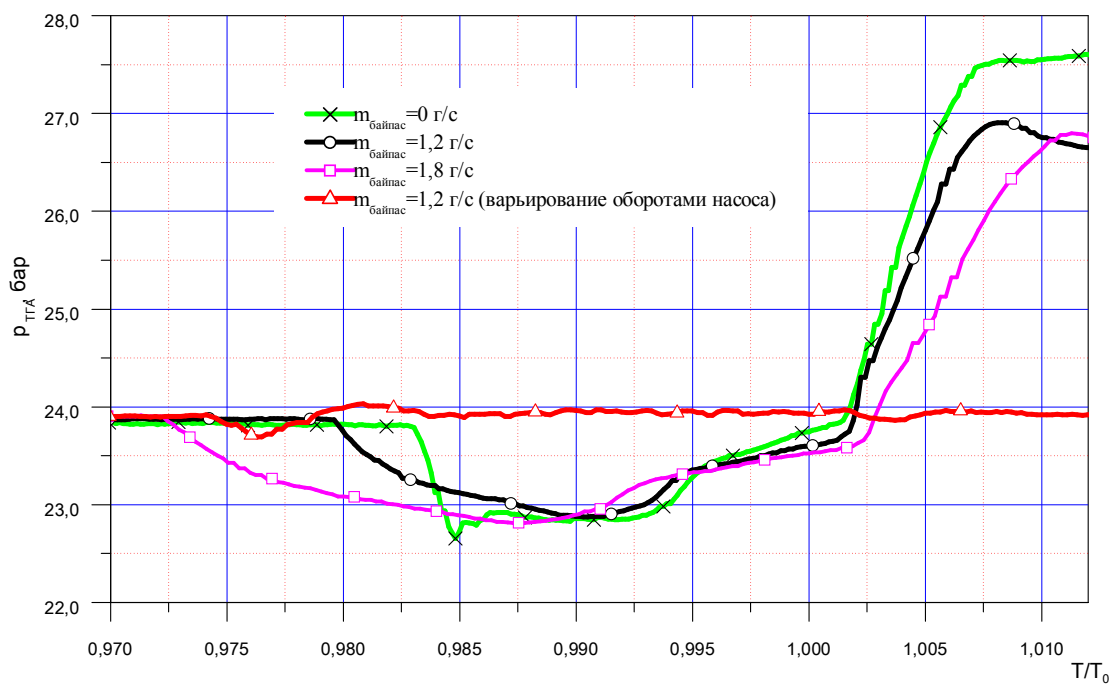
Из представленных результатов следует:

1. Увеличение расхода через байпас ТГА и, как следствие, интенсификация теплопередачи между теплоносителем в ТГА и теплоносителем в байпасе, уменьшает заброс давления (см. рис. 4,б). Однако увеличение расхода через байпас вызывает более существенное снижение давления при уменьшении тепловой нагрузки и, как следствие, снижение кавитационного запаса насоса (см. рис. 5,а). Достоинством данного способа является отсутствие активного регулирования.

2. Варьирование оборотами насоса при изменении тепловыделения позволило поддерживать постоянным паросодержание на выходе из испарителей. Как следствие, нет больших перепадов теплоносителя между контуром и ТГА. Масса теплоноси-



а



б

Рис. 4. Изменение параметров ДФ СТЯ: а – тепловыделения приборов; б – давления в ТГА

теля в ТГА остается примерно постоянной (см. рис. 6,а). Давление в ТГА также остается примерно постоянным (см. рис. 4,б). Недостаток данного способа в необходимости активного регулирования.

3. Максимальная температура приборов не превышает максимального значения 70°C (см. рис. 6,б). Однако, в эксперименте с полностью закрытым байпасом (эксперимент #1) она возрастает практически до верхнего предела с температурой 70 °С. В

эксперименте #4 максимальная температура возвращается к исходному значению (~ 63°C).

Из всех рассмотренных вариантов наиболее приемлемым с точки зрения максимальной температуры приборов и кавитационного запаса является поддержание постоянным паросодержания на выходе испарителей изменением оборотов насоса, однако при выборе необходимо учитывать то, что для его реализации необходимо активное регулирование.

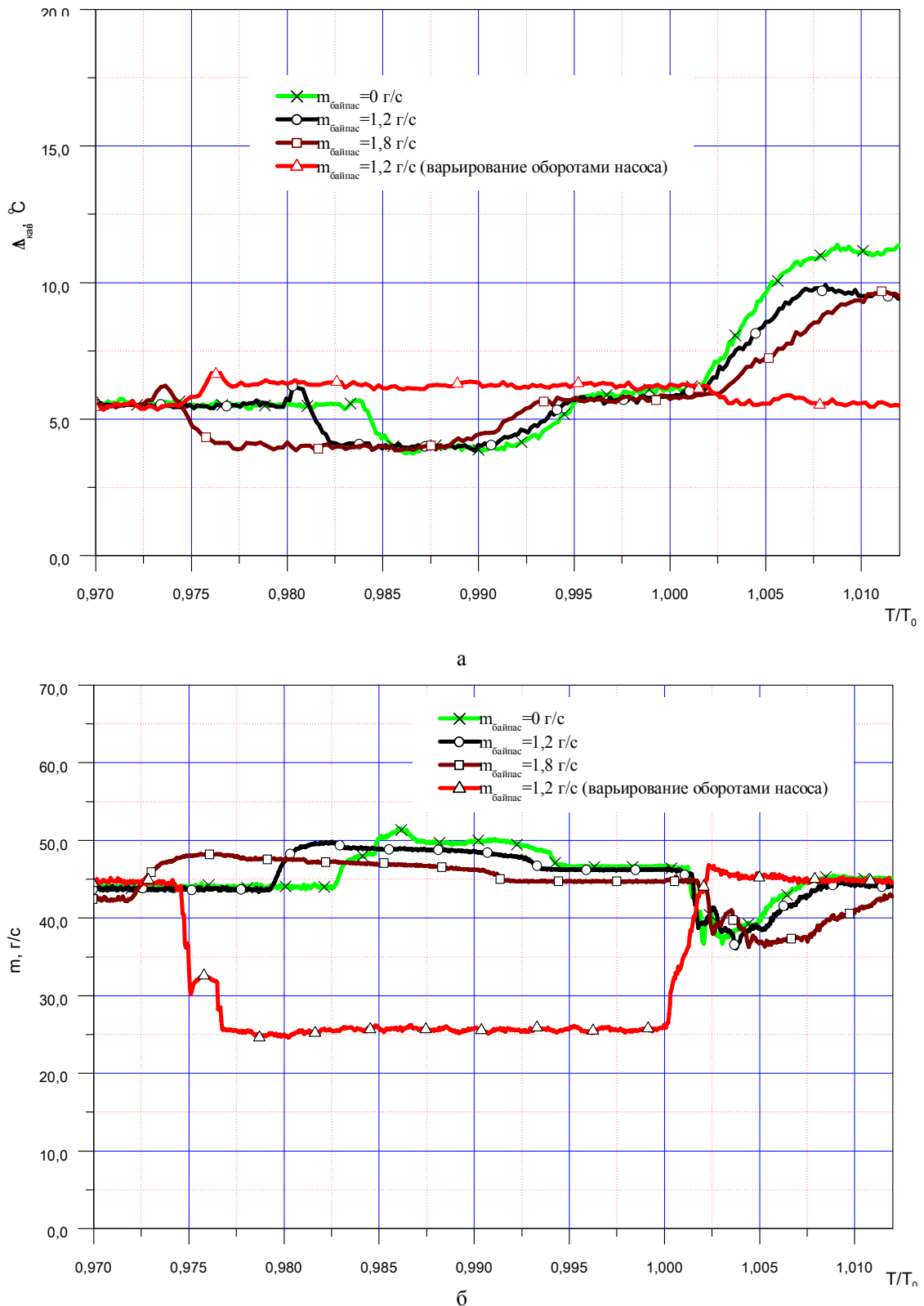


Рис. 5. Изменение параметров ДФ СТР: а – кавитационного запаса насоса; б – расхода через насос

Выводы

В результате выполненного анализа минимизации негативных эффектов, обусловленных значи-

тельным перераспределением массы между контуром и ТГА, выявлено, что:

1) для минимизации перераспределения массы наиболее эффективным является способ, основанный на поддержании примерно постоянного паро-

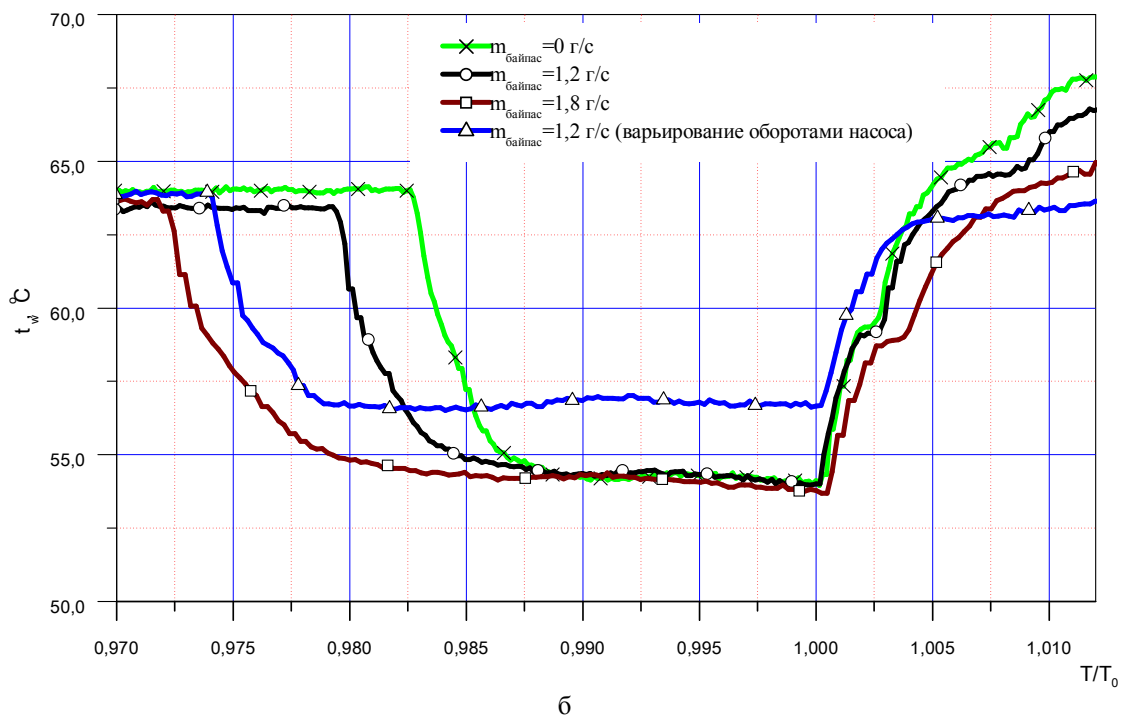
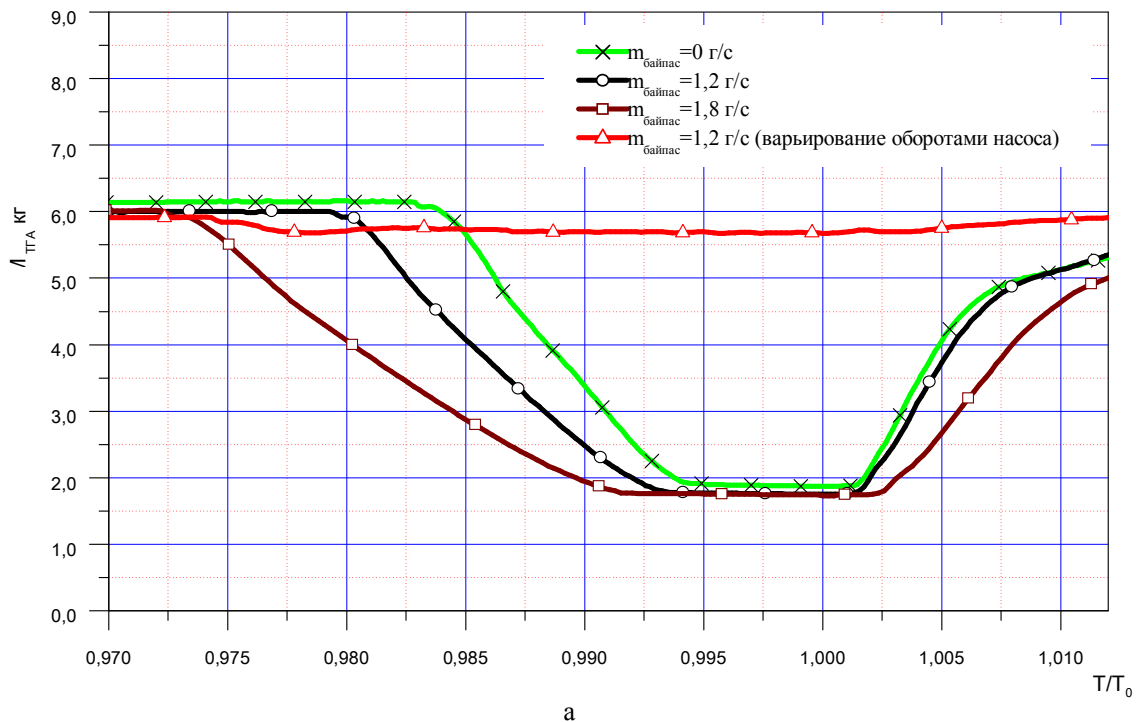


Рис. 6. Изменение параметров ДФ СТР:
 а – массы теплоносителя в ТГА; б – максимальной температуры прибора

содержания на выходе из испарителей варьированием оборотов насоса. Однако для его реализации требуется активное регулирование, установка дополнительных измерительных датчиков, регулирующих устройств;

2) достоинством способа, основанном на увеличении расхода через байпас ТГА, является реали-

зация в нем пассивного регулирования. Но, необходимо учитывать снижение кавитационного запаса насоса при уменьшении тепловой нагрузки и дополнительные затраты энергии для компенсации отвода теплоты от теплоносителя в байпасную линию ТГА.

Литература

1. Никонов, А. А. Теплообменные контуры с двухфазным теплоносителем для систем терморегулирования космических аппаратов [Текст] / А. А. Никонов, Г. А. Горбенко, В. Н. Блинков. – М. : Центр научно-технической информации «Поиск», 1991. – 302 с.

2. Гакал, П. Г. Физическое моделирование теплогидравлических процессов в системах терморегулирования космических аппаратов [Текст] / П. Г. Гакал // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 5(72). – С. 29 – 34.

3. Экспериментальный стенд для исследования теплогидравлических процессов в системе терморегулирования телекоммуникационного спутника [Текст] / П. Г. Гакал, В. И. Рузайкин, Р. Ю. Турна,

Д. В. Чайка, В. М. Тимощенко, Н. И. Иваненко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 5(82). – С. 21 – 30.

4. Prediction of parameters of International space station Alpha Russian segment two-phase thermal control system under various orbit environmental conditions [Text] / Y. I. Grigoriev, V. M. Cykhotsky, Y. M. Prokhorov, O. V. Surguchev, G. A. Gorbenko, V. N. Blinkov, N. A. Brus, E. P. Ganja // *Proceeding of National Heat Transfer Conference*. – Houston, Texas, USA, August 3 – 5, 1996. – P. 25 – 31.

5. Hoang, T. T. Hybrid Two-Phase Mechanically [Text] / T. T. Hoang, R. W. Baldauff and K. H. Cheung // *Capillary Pumped Loop for High-Capacity Heat Transport / SAE International*. – 2007-01-3198.

Поступила в редакцию 28.10.2013, рассмотрена в редколлегии 11.12.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры аэрокосмической теплотехники Г. А. Горбенко, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ ТЕРМОРЕГУЛЮВАННЯ КОСМІЧНОГО АПАРАТУ НА БАЗІ ДВОФАЗНОГО КОНТУРУ ТЕПЛОПЕРЕНОСУ

П. Г. Гакал

Системи терморегулювання космічних апаратів на базі двофазних контурів теплопереносу мають суттєві переваги у порівнянні з системами на базі однофазних контурів. Однак, крім позитивних якостей, двофазні контури мають і деякі недоліки. Зокрема, суттєвий перерозподіл теплоносія між контуром та гідравлічним акумулятором в перехідних режимах роботи. В статті представлено аналіз різних способів зменшення негативних ефектів, пов'язаних з перерозподілом теплоносія. Аналіз виконувався на експериментальному стенді, створеному для дослідження теплогидравлічних процесів в системах терморегулювання космічних апаратів.

Ключові слова: теплогидравлічний процес, експериментальний стенд, система терморегулювання космічних апаратів, двофазний контур теплопереносу.

TRANSIENTS EXPERIMENTAL INVESTIGATION IN SPACECRAFT THERMAL CONTROL SYSTEM ON A BASE OF TWO-PHASE HEAT TRANSFER LOOP

P. G. Gakal

The spacecraft thermal control systems on the base of two-phase heat transfer loop have the significant advantages in comparison with ones on the base of one-phase loop. However, besides the positive properties, two-phase loop possess some disadvantages. In particular, there is the essential mass redistribution between loop and hydraulic accumulator during transients. The different methods of negative effects decreasing due to mass redistribution are presented in the paper. The analysis was made with using of experimental stand which was created for thermal hydraulic processes investigation in the spacecraft thermal control systems.

Key words: thermal hydraulic process, experimental facility, spacecraft thermal control system, heat transfer two-phase loop.

Гакал Павел Григорьевич – д-р техн. наук, доцент, заведуючий кафедрой аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ctrph.kharkiv@google.com.