

УДК 629.78.048.7-716

**П.Г. ГАКАЛ, В.И. РУЗАЙКИН, Р.Ю. ТУРНА, Д.В. ЧАЙКА,
В.М. ТИМОЩЕНКО, Н.И. ИВАНЕНКО***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО СПУТНИКА

В статье решается задача проектирования экспериментального стенда, предназначенного для исследования теплогидравлических процессов в системе терморегулирования телекоммуникационного спутника. В системе терморегулирования используется двухфазный контур теплопереноса с вынужденной прокачкой теплоносителя. Приводится описание стенда, его элементов оборудования, результаты экспериментальных исследований. В эксперименте исследовались теплогидравлические процессы в системе терморегулирования, обусловленные резким изменением тепловыделения приборов. По результатам экспериментов сформулированы выводы, направленные на повышение эффективности системы.

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

Введение

Новое поколение телекоммуникационных спутников будет обладать расширенными функциональными возможностями, что приведет к росту потребляемой мощности, большая часть которой будет выделяться в элементах оборудования спутника в виде теплоты. Для отвода теплоты, переноса ее к месту теплосброса с последующим отводом в окружающую среду (ОС), а также для поддержания температурного режима работы оборудования используются системы терморегулирования (СТР).

В настоящее время в практике проектирования телекоммуникационных спутников широкое распространение получили системы терморегулирования на базе тепловых труб. В таких системах тепловыделяющие приборы размещаются на внутренних поверхностях панелей, образующих каркас спутника. Для выравнивания поля температур по поверхности панели, а также между панелями, в панели встроены тепловые трубы. В такой системе теплота от приборов через панель непосредственно отводится в окружающее пространство.

Несомненными достоинствами такой системы является простота и надежность. Однако ей присущи и целый ряд недостатков. Прежде всего, ограниченные возможности теплоотвода. Так, для орбит, характерных для телекоммуникационных спутников, количество теплоты, отводимой с единицы поверхности не превышает величины 300...350 Вт/м². Кроме того, такая система терморегулирования имеет ограничения по компоновке тепловыделяющих приборов, точности термостабилизации, накладыва-

ет жесткие требования на минимальный размер панелей, образующих каркас спутника.

Поэтому, в настоящее время для телекоммуникационных спутников активно разрабатываются системы терморегулирования с нагнетанием теплоносителя насосом, так называемая система с вынужденной прокачкой, и отдельными радиаторами-излучателями для отвода теплоты в ОС.

В работе [1] было показано, что системы терморегулирования на базе двухфазных контуров циркуляции теплоносителя (ДФ СТР) имеют преимущества по сравнению с СТР на базе однофазных контуров теплопереноса. В связи с этим, на этапе выбора концепции СТР перспективного телекоммуникационного спутника корпорации THALES ALENIA SPACE была выбрана концепция системы на базе двухфазного контура теплопереноса с вынужденной прокачкой теплоносителя. Системы терморегулирования на базе двухфазных контуров теплопереноса с вынужденной прокачкой теплоносителя являются принципиально новыми, ранее не применявшимися в практике проектирования телекоммуникационных спутников, системой. В результате многие технические решения, характеристики элементов оборудования системы должны быть обоснованы в ходе как расчетных, так и экспериментальных исследований. В статье приводится описание экспериментального стенда, предназначенного для исследования теплогидравлических процессов в ДФ СТР, его элементов оборудования, а также результаты исследования переходного режима работы системы, вызванного изменением тепловыделения электронных приборов.

1. Постановка задачи

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

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

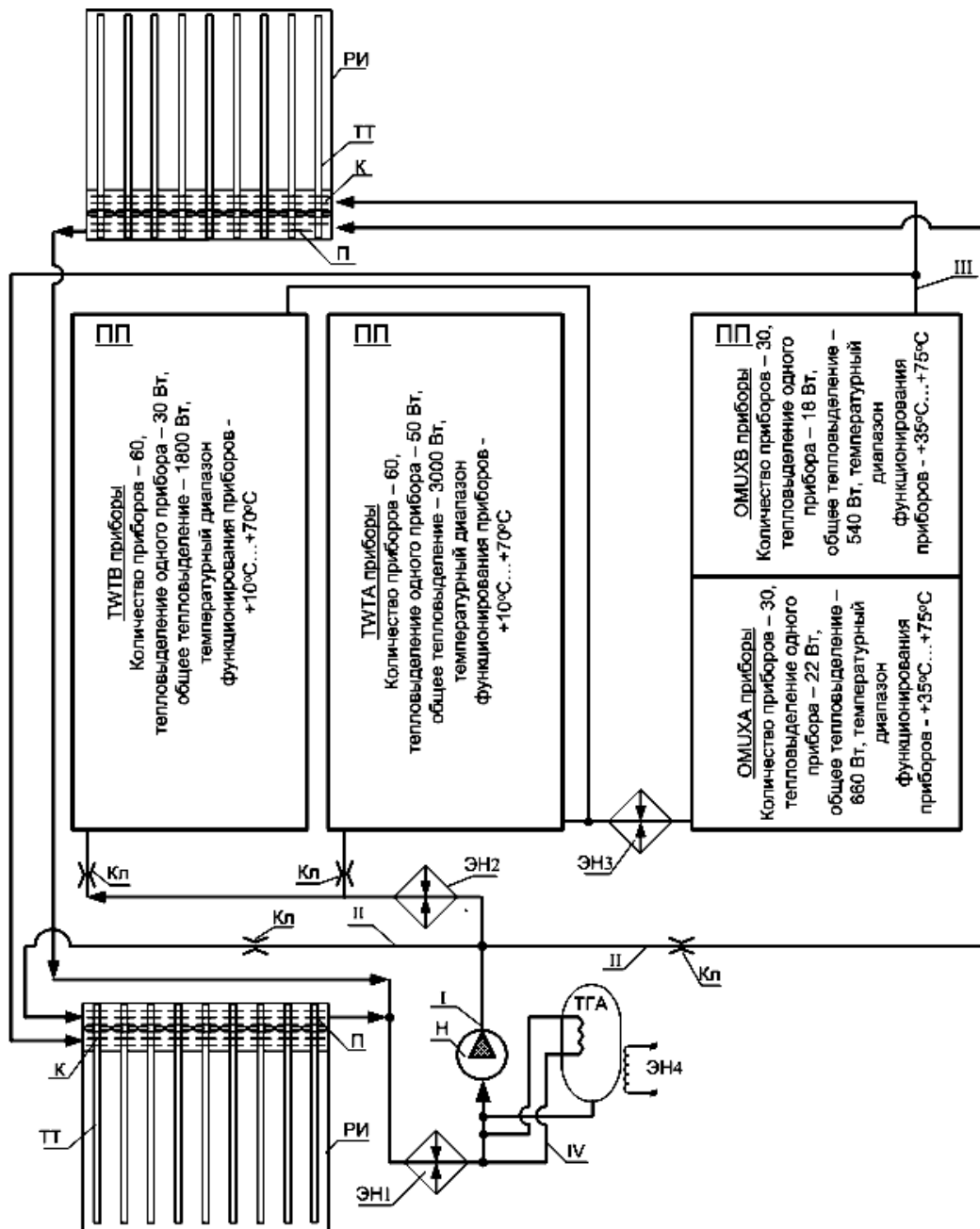


Рис. 1. Принципиальная схема системы терморегулирования на базе двухфазного контура теплопереноса телекоммуникационного спутника корпорации THALES ALENIA SPACE [2]

часть в испарители, расположенные в приборных панелях (ПП). В испарителях теплота от электронных приборов подводится к теплоносителю. В результате теплоноситель нагревается до состояния насыщения и испаряется. На выходе из ПП теплоноситель находится в двухфазном состоянии с паросодержанием $x \sim 0,8$.

Схема разводки испарителей под электронными приборами для различных приборных панелей, представлена на рис. 2.

Особенность разводки является то, что теплоноситель дважды проходит под наиболее теплонеприязненной зоной приборов ТWТА и ТWТВ, в которой выделяется 70% всей теплоты, это, так называемая зона коллектора («collector»). Оставшаяся часть теплоты (30%) выделяется в зоне корпуса («body»). Внутренний профиль испарителя также зависит от

зоны тепловыделения (коллектор или корпус), а также от приборной панели.

Отвод теплоты от теплоносителя происходит в двух радиаторах-излучателях, соединенных параллельно. Каждый радиатор-излучатель включает в свой состав 27 теплоотводящих элементов (рис. 3). В теплоотводящем элементе в одном корпусе последовательно установлен конденсатор и переохладитель. Переохладители предназначены для поддержания на требуемом уровне кавитационного запаса на входе в насос. Рекомендуемый кавитационный запас $\Delta t_{\text{кав}} \geq 5^\circ\text{C}$. Для предотвращения попадания пара в зону переохладения между конденсатором и переохладителем установлен капиллярный затвор. Двухфазный теплоноситель поступает в конденсаторы, где конденсируется. Затем конденсат, через капиллярный затвор, поступает в полость переохла-

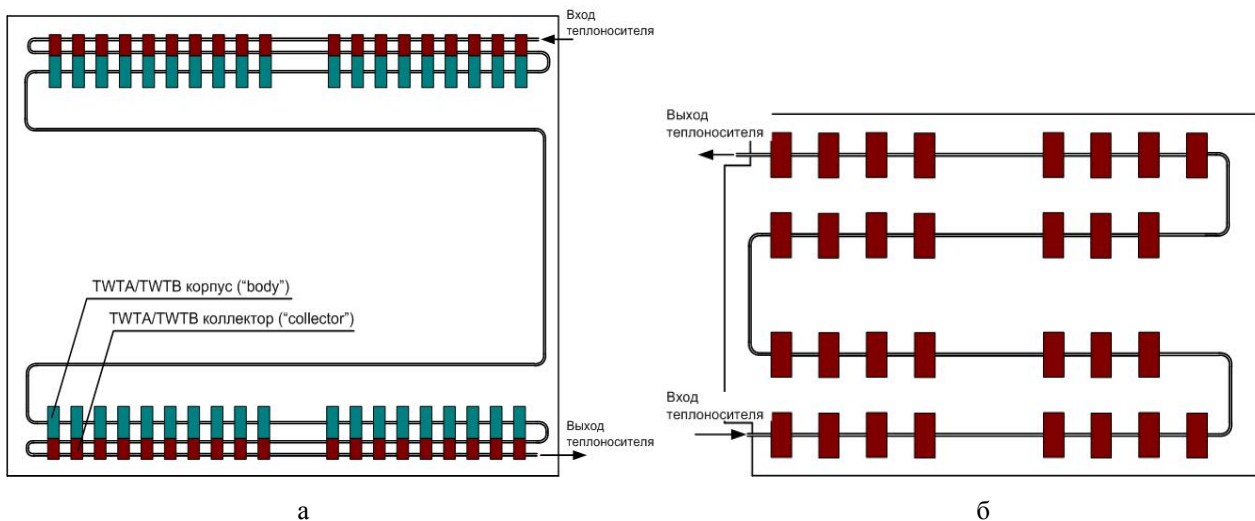


Рис. 2. Схема разводки испарителей в приборных панелях [2]: а – ТWТА и ТWТВ; б – ОМУХА, ОМУХВ

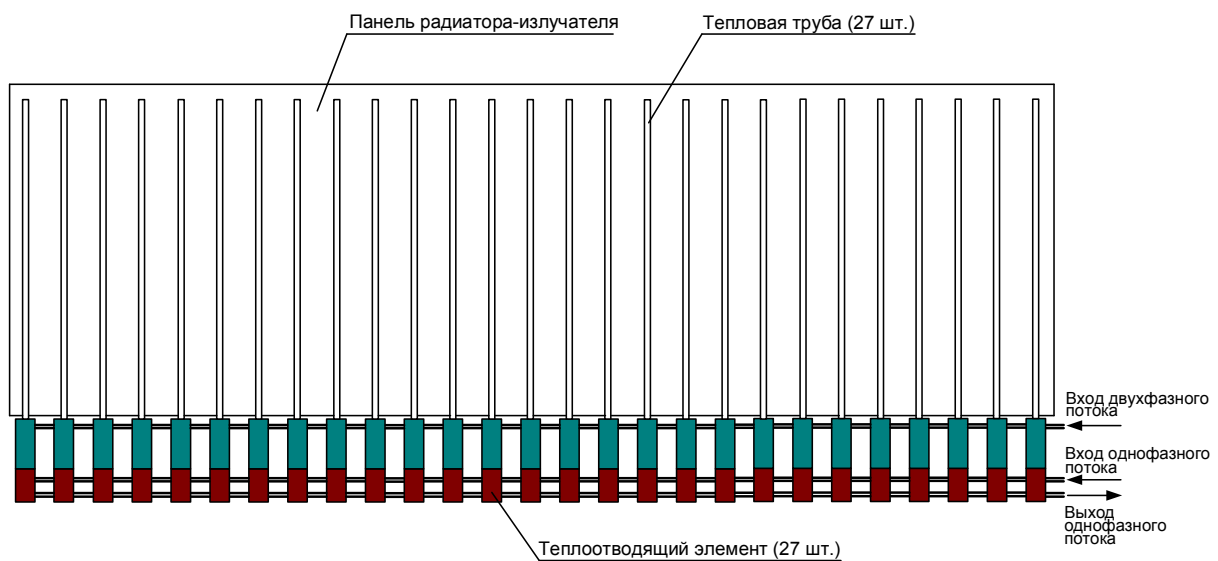


Рис. 3. Принципиальная схема радиатора-излучателя [2]

дителя, где смешивается с теплоносителем, поступающим по байпасной линии (II), и переохлаждается до температуры ниже температуры насыщения. Теплота, отводимая от теплоносителя в конденсаторах и переохладителях, по тепловым трубам передается излучающим панелям и отводится в окружающую среду.

Для регулирования давления в контуре используется гидроаккумулятор с тепловым регулированием (ТГА). Давление в ТГА регулируется путем поддержания баланса между теплотой, отводимой от двухфазного теплоносителя в ТГА к теплоносителю в байпасной линии IV и теплотой, подводимой электронагревателем ЭН4 (рис. 1). Если теплоты отводится больше, чем подводится – давление уменьшается, меньше – возрастает. Для защиты системы от низких температур используются нагреватели ЭН1...ЭН3.

Задачи анализа теплогидравлических процессов в ДФ СТР, структурно-параметрическая оптимизация, как на системном уровне, так и на уровне подсистем и элементов оборудования должны решаться с использованием результатов математического и физического моделирования.

Физическое моделирование проводится на экспериментальных стендах, которые, в общем случае, проектируются с учетом подобия прототипу. Однако, для сложных многоэлементных систем с многочисленными гидравлическими, тепловыми связями между элементами оборудования, связями управления применение классических принципов подобия затруднено, а чаще всего невозможно (зачастую трудно выдержать даже геометрическое подобие). Кроме того, необходимо минимизировать влияние гравитации.

В статье решается задача создания экспериментального стенда для изучения теплогидравлических процессов в ДФ СТР телекоммуникационного спутника корпорации THALES ALENIA SPACE. При проектировании стенда необходимо учитывать сложность выдерживания подобия стенда прототипу ввиду разных причин. Также необходимо провести анализ переходного процесса связанного с резким изменением тепловыделения электронных приборов и по результатам анализа выработать рекомендации по повышению эффективности системы терморегулирования.

2. Описание экспериментального стенда

При проектировании стенда используем подход, представленный в работе [3]. В соответствии с подходом на первом этапе определим задачи, для решения которых создается стенд. Стенд создается для решения следующих задач:

1) анализа работоспособности ДФ СТР при различных условиях окружающей среды, условий подвода теплоты;

2) формирования базы замыкающих соотношений математических моделей для анализа теплогидравлических процессов в ДФ СТР;

3) исследования переходных процессов в ДФ СТР, устойчивости системы.

В соответствии с перечисленными задачами выполним ранжирование элементов оборудования ДФ СТР, процессов и явлений в элементах оборудования системы.

В результате ранжирования определены значимости («веса») элементов оборудования [3]:

- испарители – 0,196;
- насос – 0,078;
- теплоотводящие элементы – 0,196;
- радиатор-излучатель – 0,085;
- система автоматического управления – 0,085;
- клапаны, запорно-регулирующая арматура – 0,047;
- трубопроводы – 0,047;
- гидроаккумулятор с тепловым регулированием (ТГА) – 0,18;
- тепловые трубы – 0,085.

Также, в результате ранжирования определено, что «веса» каждого процесса или явления, с учетом значимости элемента оборудования, в котором они реализуются, равны [3]:

- кипение – 0,11;
- кризис теплоотдачи – 0,12;
- конденсация – 0,14;
- потери давления на трение в двухфазном потоке – 0,11;
- кавитация – 0,097;
- капиллярные эффекты – 0,17;
- «запирание» потока – 0,135;
- переходные процессы – 0,12.

Таким образом, в результате ранжирования процессов и явлений применительно к цели эксперимента было определено, что наибольший приоритет имеют испарители, теплоотводящие элементы, гидроаккумулятор с тепловым регулированием. Таким образом, при проектировании экспериментального стенда будет выдерживаться подобие (в порядке увеличения значимости): испарителя, теплоотводящих элементов, гидроаккумулятора с тепловым регулированием.

Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на рис. 4. Экспериментальный стенд состоит из модели ДФ СТР, системы, имитирующей теплоотвод, системы заправки и утилизации теплоносителя, системы управления и регулирования, системы измерения. Суммарный объем

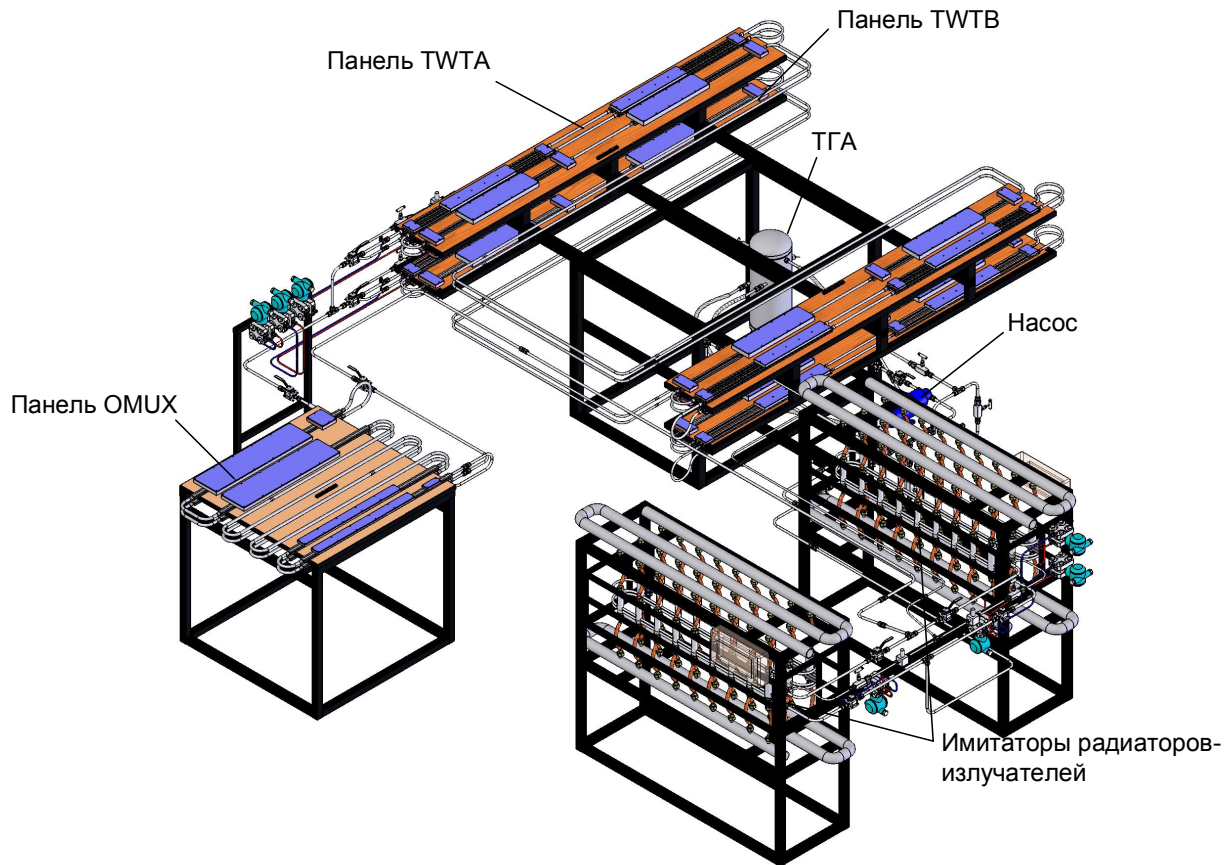


Рис. 4. Принципиальная схема экспериментального стенда

модели ДФ СТР с учетом объема ТГА (16,6 литров) равен ~ 27 литров. Масса заправляемого теплоносителя ~ 10,5 кг. Теплоноситель – аммиак. В стенде используется насос компании RealTechnology [2] (рис. 5). Для минимизации влияния гравитации практически все ключевые элементы размещены в горизонтальной плоскости. Элементы оборудования с высоким приоритетом 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 также полностью подобны (см. рис. 2).

Как и испарители, радиаторы-излучатели в стенде также подобны аналогичным элементам прототипа. Каждый радиатор-излучатель стенда состоит из 27-ми теплоотводящих элементов, соединенных параллельно. Для теплоотводящих элементов стенда выдержано геометрическое подобие аналогичным элементам ДФ СТР. Различие между штатной системой и стендом заключается только в условиях реализации 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. 6). Гидроаккумулятор с тепловым регулированием представляет собой стальной цилиндр объемом 16,6 литров. Вес пустого ТГА ~49,68 кг. В нижней части ТГА расположен патрубок, к которому подсоединяется трубопровод, соединяющий ТГА с контуром. Для подвода теплоты используется ленточный электронагреватель, который расположен на наружной поверхности ТГА. Во внутренней части ТГА уста-

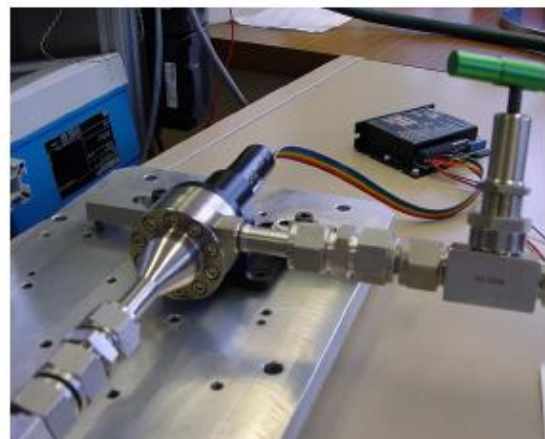


Рис. 5. Насос компании RealTechnology [2]

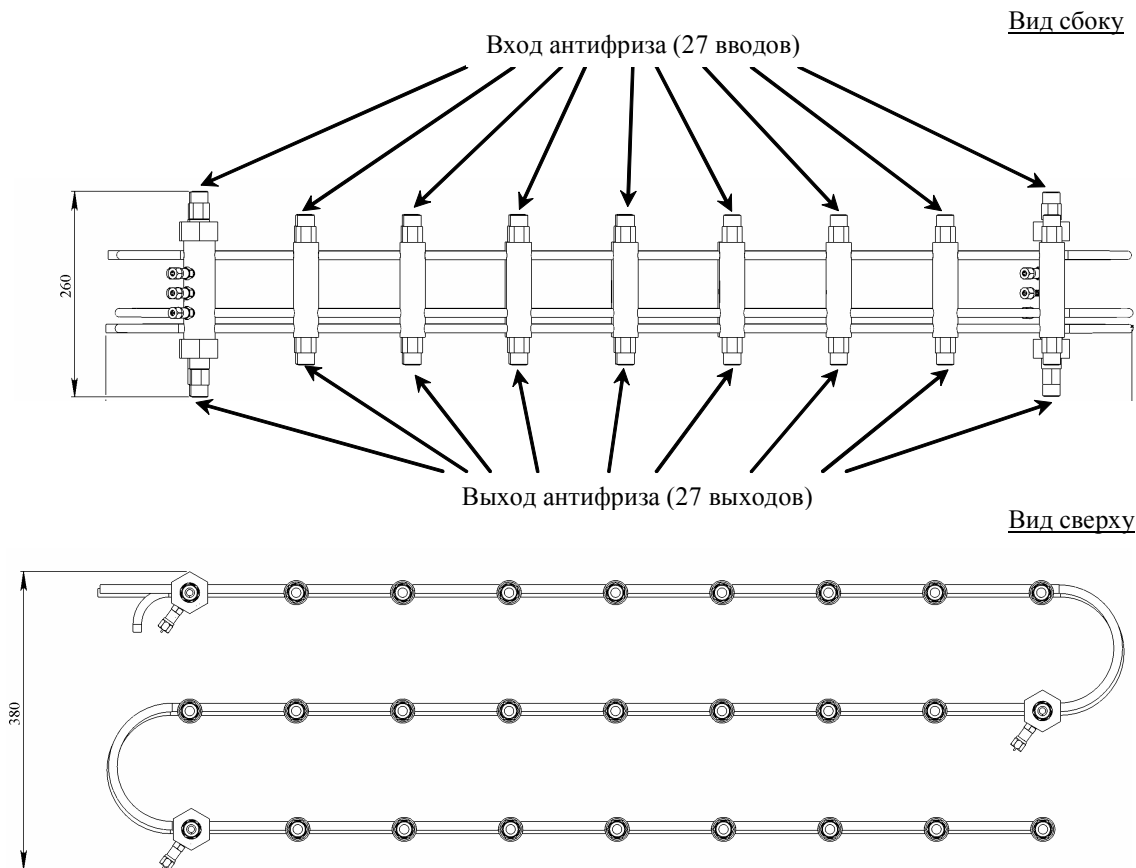


Рис. 6. Принципиальная схема радиатора-излучателя экспериментальной установки

новлен байпас, предназначенный для отвода теплоты от теплоносителя. Электронагреватель осуществляет подвод теплоты к жидкой фазе, байпас ТГА отводит теплоту от паровой фазы.

Наряду с системой теплосброса, в состав стенда входит система заправки и утилизации теплоносителя, система измерения и регулирования. Система измерения и регулирования позволяет фиксировать параметры в характерных точках стенда. Система осуществляет измерение, запись и хранение следующих параметров: температур, давлений, перепадов давления, объемных расходов, напряжений, токов. Система регулирования поддерживает температуры на входе в панели TWTA и TWTB на уровне $+10^{\circ}\text{C}$, на входе в панель OMUXA и OMUXB – на уровне $+40^{\circ}\text{C}$.

Погрешности измерения составили:

- 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 TWTB;
- 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 теплоносителя между контуром и ТГА. Такое перераспределение может вызвать существенное изменение давления в ТГА, и соответственно в контуре. В результате может измениться температура приборов, так как в двухфазной области температура теплоносителя зависит только от давления. Так, например, при уменьшении тепловой нагрузки паросодержание в контуре уменьшается, теплоноситель из ТГА перетекает в контур и давление в ТГА также уменьшается. При увеличении тепловой нагрузки паросодержание возрастает, теплоноситель из контура перетекает в ТГА. В последнем случае на пер-

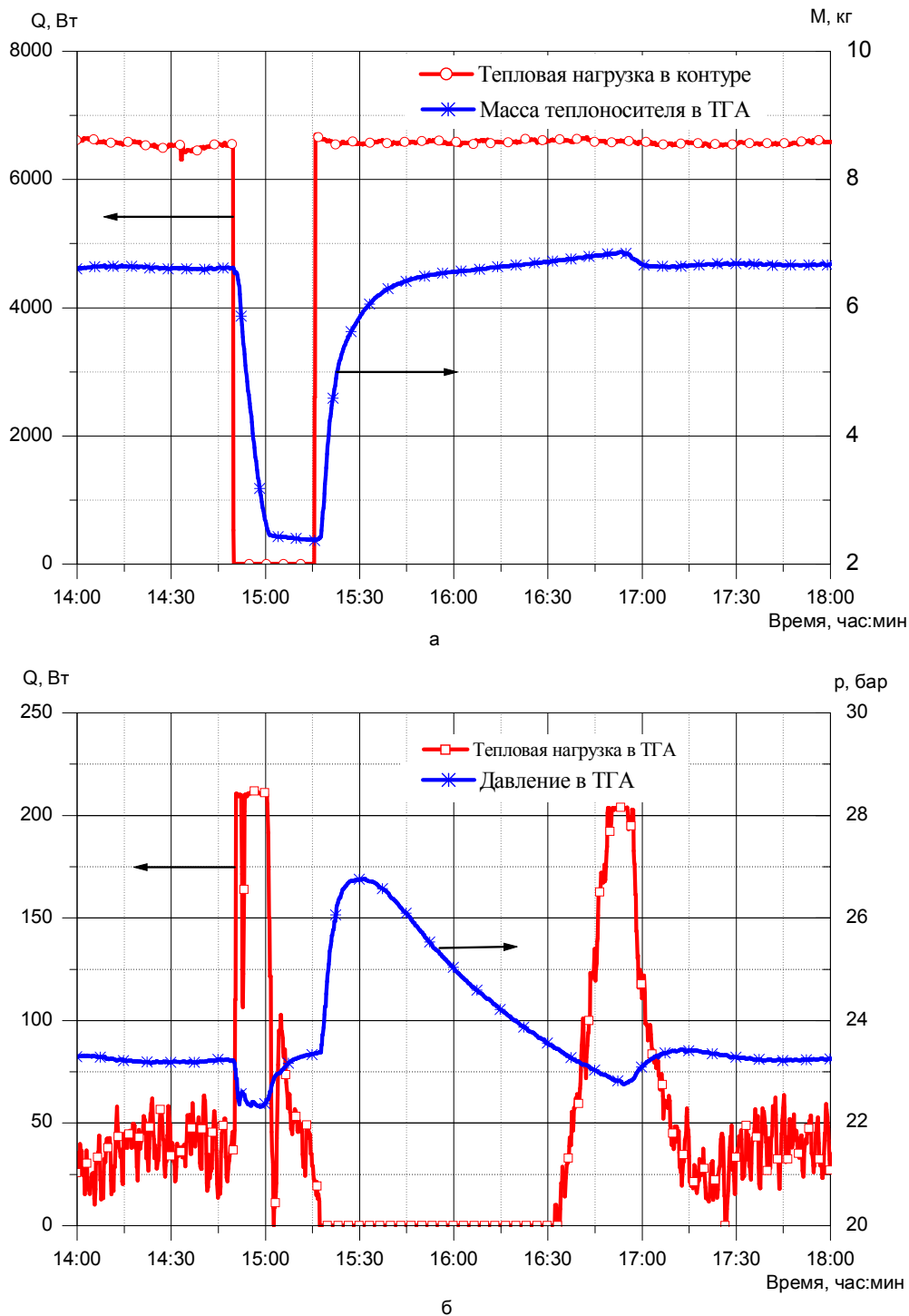


Рис. 7. Изменение параметров системы терморегулирования в переходном режиме: а – тепловыделение приборов; б – давление и теплоподвод в ТГА

вом этапе входящий в ТГА снизу холодный теплоноситель действует как поршень, сжимая находящийся в верхней части ТГА пар. Затем, в результате, теплообмена, пар начинает конденсироваться и давление снижается.

Анализируется переходный режим, связанный со ступенчатым уменьшением тепловой нагрузки до нуля и с последующим увеличением

тепловой нагрузки до начальной величины. В начальном состоянии тепловыделение приборов равно примерно 6,6 кВт, что с учетом тепловых потерь составляет примерно 6 кВт, температура антифриза в системе охлаждения радиаторов-излучателей ~ 52 °С (моделируются условия «горячей» орбиты), давление в ТГА $\sim 23,2$ бар, паросодержание на выходе из ПП $\sim 0,8$.

На рис. 7, а показано как изменяется тепловая нагрузка в контуре и масса теплоносителя в ТГА, на рис. 7, б – как изменяется давление и теплоподвод в ТГА. На рис. 8, а представлено как меняются массовые расходы, на рис. 8, б – температуры и кавитационный запас на входе в насос. Как следует из представленных графиков, после уменьшения теплоподвода до нуля, давление начинает снижаться из-за перетока теплоносителя из ТГА в контур. Для ком-

пенсации снижения давления включается нагреватель ТГА (рис. 7, б).

Давление достаточно быстро перестает снижаться и начинает возрастать, несмотря на продолжающееся уменьшение массы теплоносителя в ТГА, и примерно через 30 мин возвращается к исходной величине. Масса теплоносителя в ТГА при этом равна примерно 2,5 кг и до увеличения тепловой нагрузки в контуре остается примерно постоянной.

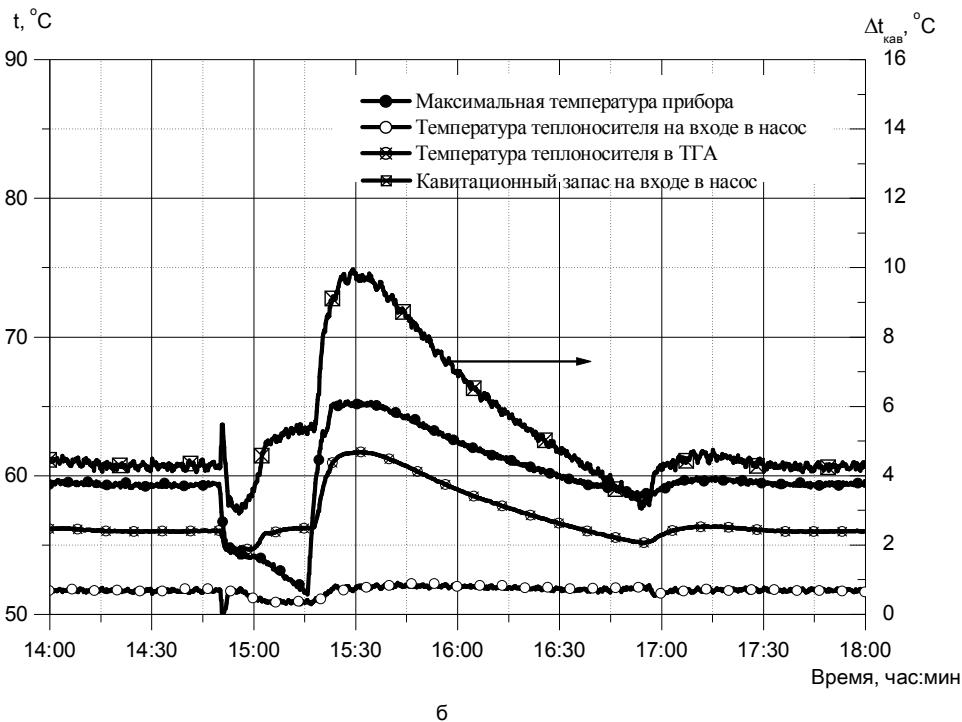
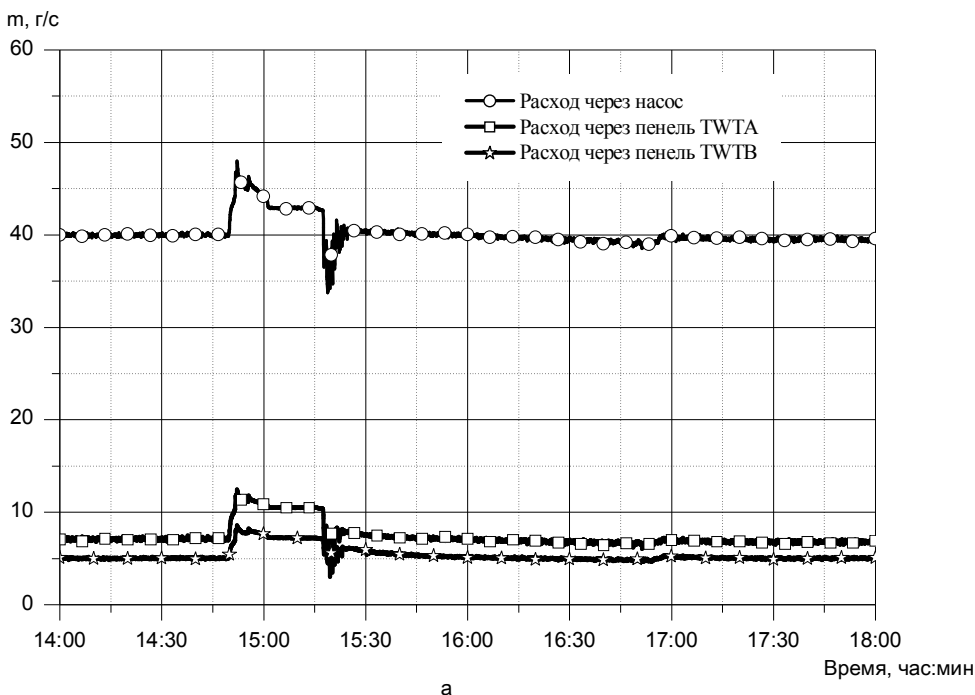


Рис. 8. Изменение параметров системы терморегулирования в переходном режиме: а – массовый расход; б – температура и кавитационный запас на входе в насос

Так как давление в ТГА увеличилось до начальной величины, теплоподвод в ТГА начинает уменьшаться. После включения тепловой нагрузки холодный теплоноситель начинает перетекать из контура обратно в ТГА, что приводит к увеличению массы теплоносителя в ТГА (рис. 7, а). В первый момент времени жидкость, действуя как поршень, сжимает пар и давление возрастает. В результате роста давления, растет и температура двухфазного теплоносителя и, как следствие, температура приборов (см. рис. 8, б). Затем, в результате теплообмена пара с жидкостью в ТГА, давление начинает снижаться. При достижении нижней границы включается нагреватель ТГА и давление возвращается в исходное состояние. При уменьшении тепловой нагрузки сопротивление трения испарителей также уменьшается. В результате расход через испарители возрастает, что иллюстрирует график на рис. 8, а. После увеличения тепловой нагрузки до исходной величины, массовые расходы также возвращаются к своему исходному значению.

Как следует из графика на рис. 8, б, кавитационный запас был на уровне $\Delta t_{\text{кав}} \sim 4^\circ\text{C}$, хотя и наблюдалось кратковременное уменьшение до более низких значений. Однако это уменьшение кавитационного запаса не отразилось на работе насоса. Расход через насос и напор насоса оставались примерно постоянными, хотя и наблюдались колебания расхода теплоносителя через насос (см. рис. 8, а) в моменты снижения и увеличения тепловой нагрузки. Скорее всего, колебания были обусловлены изменением гидравлического сопротивления испарителей (переход от двухфазного режима к однофазному режиму и обратно), а также перетоком теплоносителя из контура в ТГА и обратно. Для исключения колебаний необходимо минимизировать влияние гидравлического сопротивления испарителей на характеристику всей системы. Для этого необходимо увеличить перепад давлений на местных сопротивлениях, установленных на входе в испарители, так чтобы на них срабатывалась большая часть ($\sim 75\ldots 80\%$) напора насоса. В этом случае процессы в испарителе, обусловленные изменением паросодержания будут слабо влиять на работу насоса.

Заброс давления в ТГА является нежелательным, так как может привести к перегреву приборов, что иллюстрирует график на рис. 8, б. Как следует из графика, из-за увеличения давления и связанного с этим увеличением температуры теплоносителя, температура прибора увеличилась на 5°C с 60 до 65°C . Эта температура хотя и ниже максимально допустимой 70°C , но, такое увеличение температуры прибора является нежелательным.

Предотвратить заброс давления можно следующими способами:

- интенсифицировать теплоотвод от паровой фазы ТГА к теплоносителю в байпасе IV путем увеличения расхода теплоносителя через байпас;

- уменьшить перетоки теплоносителя из контура в ТГА и обратно путем поддержания постоянным паросодержания на выходе из ПП, изменяя обороты насоса и, соответственно, расход через насос и испарители.

В следующих экспериментах будет проанализирован каждый из способов, оценены их достоинства и недостатки.

Заключение

В статье приводится описание экспериментального стенда, предназначенного для исследования теплогидравлических процессов в системах терморегулирования телекоммуникационных спутников. Стенд создан с использованием подхода к физическому моделированию, позволяющему решить основную проблему такого моделирования – сложность выдерживания подобия модели и прототипа. Приводится описание стенда, его подсистем, элементов оборудования. Стенд использовался для исследования переходного процесса, связанного с изменением тепловой нагрузки. Показано, что возможен заброс давления в ТГА, что может привести к перегреву приборов. Для предотвращения заброса давления предложено два варианта:

1) интенсифицировать теплоотвод от паровой фазы в ТГА к теплоносителю в байпасной магистрали, путем увеличения расхода теплоносителя через байпас;

2) регулировать расход через испарители приборных панелей с помощью насоса, поддерживая, тем самым, постоянным паросодержание на выходе из приборных панелей и, как следствие, уменьшая переток теплоносителя из контура в ТГА и обратно.

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. Development of a Two-Phase Mechanically Pumped Loop (2ФМПЛ) for the Thermal Control of Telecommunication Satellites [Электронный ресурс] / J. Hugon, A. Larue de Tournemine, G. Gorbenko, P.G. Gakal, V. Ruzaykin, T. Tjiptahardja // International Two-Phase Thermal Control Technology Workshop 2008. ESTEC, 13 – 15 May, 2008. – Режим доступа: http://www.dlr.de/rd/Portalddata/28/Reources/dokument/e/rp6/newsletter/Partnersearch_SPA.2010.2.2.-01-EO-

FUS_ANNEX.pdf – 12. 07. 2011 г.

3. Гакал, П.Г. Физическое моделирование теплогидравлических процессов в системах терморегу-

лирования космических аппаратов [Текст] / П.Г. Гакал // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 5 (72). – С. 29 – 34.

Поступила в редакцию 31.08.2011

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

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛО ГІДРАВЛІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ ТЕРМОРЕГУЛЮВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО СУПУТНИКА

П.Г. Гакал, В.І. Рузайкін, Р.Ю. Турна, Д.В. Чайка, В.М. Тимощенко, Н.І. Іваненко

В статті вирішується задача проектування експериментального стенду, що призначений для дослідження теплогидравлических процесів в системі терморегулювання телекомунікаційного супутника. В системі терморегулювання використовується двофазний контур теплопереносу з вимушеною течією теплоносія. Приводиться опис експериментального стенду, його елементів обладнання, результати експериментальних досліджень. В експерименті досліджувалися теплогидравлическі процеси в системі терморегулювання, що пов'язані різкою зміною тепловиділення приборів. По результатам експериментів сформульовані висновки, направлені на підвищення ефективності системи.

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

EXPERIMENTAL FACILITY FOR THERMAL HYDRAULIC PROCESSES INVESTIGATION IN TELECOMMUNICATION SATELLITES THERMAL CONTROL SYSTEM

P.G. Gakal, V.I. Ruzaykin, R.U. Turna, D.V. Chayka, V.M. Tymoshchenko, N.I. Ivanenko

The task of experimental facility design is solved in the paper. The facility intends for investigation of thermalhydraulic processes in a thermal control system of telecommunication satellite. The pumped two-phase loop is used in the thermal control system. The description of experimental facility, its equipment and the results of experimental investigation are presented. The transient stipulated by abrupt units heat load changing was investigated. The conclusions aimed to the system efficiency increasing are formulated on the base of experimental investigation.

Key words: thermal hydraulic process, experimental facility, thermal control system, telecommunication satellite, pumped two-phase loop.

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

Рузайкин Василий Иванович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ctrph.kharkiv@google.com.

Турна Рустем Юсуфович – младший научный сотрудник кафедры аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ctrph.kharkiv@google.com.

Чайка Дмитрий Владимирович – младший научный сотрудник кафедры аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ctrph.kharkiv@google.com.

Тимощенко Виталий Михайлович – младший научный сотрудник кафедры аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ctrph.kharkiv@google.com.

Іваненко Ніна Іванівна – старший научный сотрудник кафедры аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ctrph.kharkiv@google.com.