

## СЕКЦИЯ 5. ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПРЕСС-ИСПЫТАНИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ПОЗИСТОРНОГО НАГРЕВАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ВАКУУМА

Е.Ю. Котляров, А.Ю. Кочетков, А.Н. Зайцев / kochetkov@laspace.ru  
E. Yu. Kotlyarov, A. Yu. Kochetkov, A. N. Zaitsev

АО «НПО Лавочкина», г. Химки, Московская обл.

*В представленной работе анализируются результаты теплофизических экспресс-испытаний позисторного нагревателя промышленного применения. В качестве объекта испытаний выбран типовой нагреватель, доступный для заказа по каталогу через Интернет. Испытания проведены в вакуумной камере и дополнены коррелирующим вычислительным экспериментом с помощью специально разработанной тепловой конечно-элементной модели. Представлены характеристики испытанного нагревателя, а также результаты анализа совмещенных натурного и вычислительного экспериментов. Сформулированы некоторые рекомендации, которые могут быть полезны для дальнейшего применения и изучения рабочих характеристик позисторных нагревателей в условиях вакуума.*

*This paper analyzes the results of thermophysical rapid tests of a posistor heater for industrial applications. The test object is a typical heater that is available for ordering from the catalog via the Internet. The tests were performed in a vacuum chamber and supplemented with a correlating computational experiment using a specially developed thermal finite element model. The characteristics of the tested heater are presented, as well as the results of analysis of combined field and computational experiments. Some recommendations are formulated that can be useful for further application and study of the performance characteristics of posistor heaters in vacuum conditions.*

Ключевые слова: позисторный нагреватель, испытания в вакууме.

Keywords: posistor heater, tests in vacuum.

### ВВЕДЕНИЕ

Сегнетоэлектрические свойства титаната бария ( $\text{BaTiO}_3$ ) были открыты более 70 лет назад учеными Советского Союза (1944 г) и первые же результаты исследований позволили заявить, что характеристики данного материала обеспечат ему высокую востребованность в технике [1]. Историческим подтверждением этому служит то, что на основе  $\text{BaTiO}_3$ , в настоящее время, во всем мире, производится широкий спектр электронных компонентов, в частности, термисторы, термореле, конденсаторы, пьезоэлектрические компоненты и т.п. Кроме этого, по мере развития технологии производства уникального материала и его модификаций, на его основе сформировалось, в виде отдельного направления, производство промышленных электронагревателей с положительным температурным коэффициентом электрического сопротивления, позисторных нагревателей. В мировой практике эти нагреватели более известны как РТС-нагреватели (здесь, РТС - Positive Temperature Coefficient). Настоящая работа посвящена, исключительно, изучению характеристик РТС-нагревателей, являющихся техническими устройствами, содержащими нагревательные элементы на основе  $\text{BaTiO}_3$ .

Позисторные или РТС-нагреватели при определенном уровне температуры (в т.н. точке Кюри) способны сильно изменять электрическое сопротивление, причём, с ростом температуры резко растет электрическое сопротивление нагревателя, за счет чего устройство обретает эффект саморегулирования. РТС-нагреватели широко используются в бытовой и промышленной технике [2], [3], номенклатура которой растет, однако, в настоящее время подобные нагреватели предлагается приобрести отдельно, «сами по себе» [4], очевидно, в предположении того, что новое применение им могут придумать, в соответствии со своими запросами, обычные потребители, т.е. «непрофильные специалисты». Такой подход стал возможным потому, что РТС-нагреватели, обладая эффектом саморегулирования, не могут выйти из строя в результате перегрева. Однако, если использование где-либо керамических нагревательных элементов из  $BaTiO_3$  потребует проведения квалифицированных работ с целью организации электропитания и теплоотвода к ним, то готовый нагреватель, в котором уже установлены керамические элементы (т.е. решены соответствующие технические проблемы), можно просто подключить к источнику электропитания, не заботясь, особо, об управляющей и защитной автоматике.

## 1. СВЕДЕНИЯ ОБ ОБЪЕКТЕ ИСПЫТАНИЙ

Типовой образец промышленного РТС-нагревателя для проведения испытаний был выбран из каталога [4]. Поставщики готовых РТС-нагревателей сообщают о возможностях конкретных единиц своей продукции, как правило, группируя следующие определяющие характеристики: напряжение питания, мощность, габариты, фото внешнего вида. Информацию о значении температуры стабилизации могут и не указывать, при этом, по умолчанию, она, как правило, составляет  $200^{\circ}C$ . Если обратиться к каталогу [5] можно увидеть, что температуры стабилизации нагревательных керамических РТС-элементов могут лежать в диапазоне от 0 до  $300^{\circ}C$  (с определенной дискретностью). Однако, именно для низких температур, предложение готовых нагревателей (выполненных по аналогии с заказанным для испытаний) практически отсутствует.

Диаграмма рис.1 демонстрирует типовую характеристику РТС-нагревателя [3]. Здесь видно, что его электрическое сопротивление может возрасти на несколько порядков в весьма узком интервале температур, что и позволяет получить эффект саморегулирования и термостатирования. На диаграмме выделены характерные точки:  $T_{Ref}$  и  $T_{Rmin}$ .  $T_{Ref}$  - температура при которой начинается резкий рост электрического сопротивления,  $T_{Rmin}$  также является специфической точкой, поскольку в ней нагреватель достигает максимальной мощности и, строго говоря, слева от этой точки, мы можем наблюдать отрицательный температурный коэффициент электрического сопротивления.

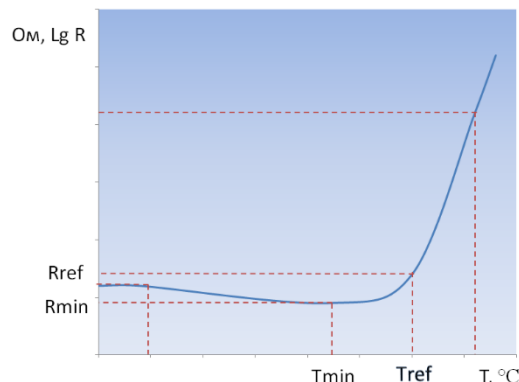
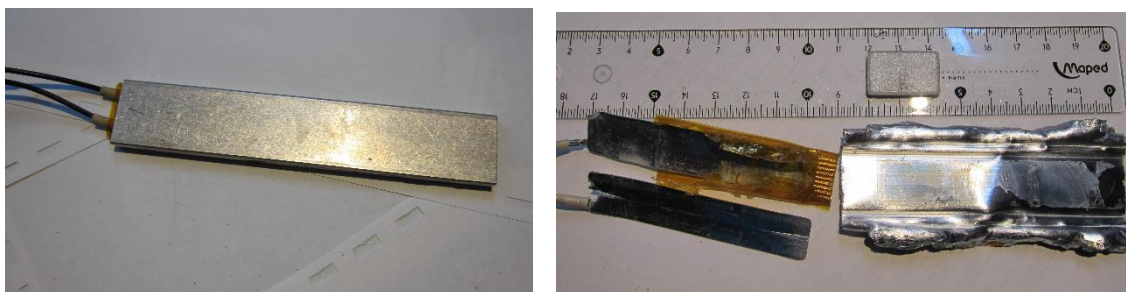


Рис. 1. Типовая характеристики РТС-нагревателя.

Рис. 2 представляет подробную иллюстрацию объекта испытаний. РТС-нагреватель имеет форму плоского (полого) параллелепипеда, с высотой наименьших граней около 2.5 мм, изготовленного из алюминиевого сплава. Две плоских (больших)

контактных грани имеют габариты 110x20мм, толщина стенки корпуса из алюминия составляет около 1мм. Рекомендуемое напряжение питания нагревателя составляет 12 В, ток постоянный. Электрическое сопротивление, измеренное при комнатной температуре, обычным тестером имеет значение порядка 10 Ом. Это соответствует мощности около 14 Вт для комнатной температуры, хотя для устройства, резко изменяющего электросопротивление, параметр мощность, строго говоря, является неоднозначным. Далее, это будет показано в результатах проведенного здесь эксперимента.

Рис. 2 показывает, дополнительно, изображения того же нагревателя, но преднамеренно разрушенного после испытаний. Здесь мы видим, что керамические нагревательные элементы 22x14мм (в количестве 3-х штук) имеют параллельное электрическое соединение, выполненное с помощью тонких продольных металлических пластин, от которых наружу идут электрические выводы. Каптоновая лента обернута вокруг двух пластин с тремя нагревательными элементами позволяет зажать сборку в металлическом алюминиевом корпусе, одновременно обеспечив и тепловой контакт, и электроизоляцию. Снаружи, сам корпус имеет форму удобную для организации теплового контактного соединения с некоторым нагреваемым (в перспективе) объектом.



а) б)  
Рис. 2. Объект испытаний: позисторный нагреватель,  
а) – перед проведением теста, б) – после механического разрушения.

## **2. ПОСТАНОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА**

Целью проведения экспресс-испытаний было независимое определение фактических рабочих характеристик типового промышленного РТС-нагревателя, а кроме того, оценка стабильности работы данного нагревателя в вакууме. Отклонение от стабильной работы РТС-нагревателя в вакууме может проявляться по различным причинам, к основным из которых можно отнести нарушение тепловых контактных соединений, вызванное термодформациями и удалением воздуха из зазоров. Планируемый тест можно отнести к разряду экспресс-испытаний, поскольку длительное влияние вакуума на РТС-элементы подобные испытания выявить не позволяют.

Для определения тепловых характеристик нагревателя были выполнены следующие режимы испытаний:

- режим при котором достигается тепловое равновесие «свободно «подвешенного» работающего нагревателя при подведении напряжения 12 В, в атмосферных условиях;
- режим при котором достигается тепловое равновесие «свободно «подвешенного» работающего нагревателя при подведении напряжения 12 В в вакуумной камере, при температуре фона 20°C;
- режим достижения теплового равновесия для нагревателя, установленного на алюминиевой пластине (400x370x1мм), работающего при подведении напряжения 12 В, в вакуумной камере при температуре фона 20°C.

Все тесты начинались с уровня температуры окружающей среды. Мгновенная мощность, потребляемая РТС-нагревателем, определялась как произведение регистрируемых значений тока и напряжения. Напряжение 12 В обеспечивалось стабилизированным источником питания. Для регистрации температуры один датчик

температуры был установлен в середине плоской грани корпуса нагревателя снаружи. Для всех режимов контролировалась также температура фона, стабильность которой обеспечивали средства кондиционирования испытательной лаборатории. В случае установки нагревателя на пластину (3-й режим), с помощью отдельного датчика, измерялась также температура пластины.

Выполненные режимы испытаний должны были подтвердить способность РТС-нагревателя изменять потребляемую мощность в зависимости от условий его охлаждения, а также позволить оценить эффективность и количественные характеристики тепловых контактных соединений керамических РТС-элементов с корпусом. Эти данные представляют несомненный практический интерес для планирования применения РТС-нагревателей, в дальнейшем, в конкретных системах поддержания контролируемого теплового режима.

Результаты первого теста (в атмосфере) демонстрирует рис. 3. Температура нагревателя «висящего» в воздухе стабилизировалась на уровне 266°C. Мощность, которая удерживает нагреватель на данной температуре составляет 24 Вт. Из переходной характеристики видно, что мощность потребляемая нагревателем «имеет всплеск» до 48 Вт, который, очевидно, объясняется прохождением через  $T_{Rmin}$ .

Аналогичный, тест проведенный в вакууме отражает рис. 4. Температура теплового равновесия здесь стабилизировалась на уровне 287°C, а требуемая для этого мощность стабилизировалась на величине 8Вт. Заброс мощности на переходной характеристике 43 Вт сопоставим с забросом, полученным в первом тесте.

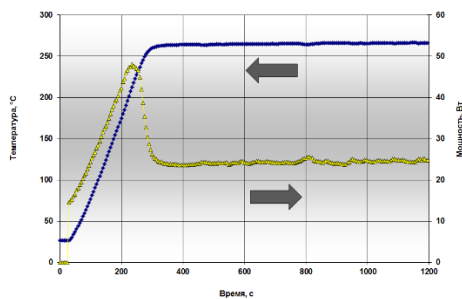


Рис. 3. Стабилизация температуры РТС-нагревателя в атмосфере.

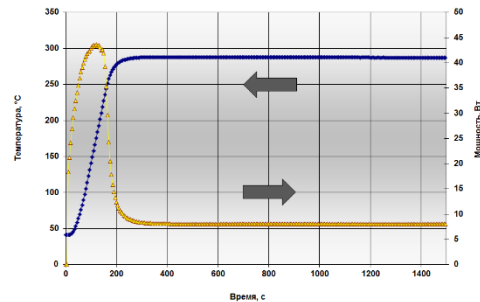


Рис. 4. Стабилизация температуры РТС-нагревателя в вакууме.

Наконец, последний тест в вакууме, с пластиной охлаждающей нагреватель, показан на рис. 5. Теплоемкость пластины делает переходный процесс относительно медленным, поэтому заброс мощности при прохождении  $T_{Rmin}$  гораздо выше. Температура корпуса РТС-нагревателя стабилизируется на значении 244°C, а мощность - на значении 30 Вт.

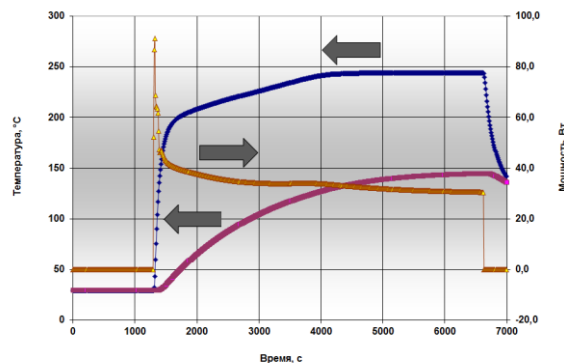


Рис. 5. Стабилизация температуры в вакууме РТС-нагревателя, установленного на пластине 400 x 370 мм.

Качественная оценка полученных результатов позволяет заключить, что нагреватель стабилизирует собственную температуру и затрачивает на это тем больше мощности, чем сильнее его охлаждают. Принципиальной разницы в работе нагревателя в условиях атмосферы и в условиях вакуума не наблюдается.

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Количественная оценка полученных результатов может быть проведена по аналогии с [6].

Т.е. если мы предположим, что между проведением двух различных режимов термостабилизации РТС-нагревателя (в режимах «8Вт» и «30Вт») в вакууме, тепловое контактное соединение керамических РТС-элементов с корпусом и с пластинами не претерпело существенных изменений, то рабочая температура тепловыделяющих керамических элементов может быть найдена в результате пересечения двух прямых:

$$T_j = Q_{РТС2} \cdot R_C + T_{Н2}$$

$$T_j = Q_{РТС3} \cdot R_C + T_{Н3}$$

где  $R_C$ -суммарное термическое сопротивление между керамическими элементами и корпусом (местом установки датчика);  $Q_{РТС2}$ -мощность стабилизации второго режима (8 Вт);  $Q_{РТС3}$ -мощность стабилизации третьего режима (30 Вт);  $T_{Н2}$ -температура стабилизации корпуса на втором режиме (287°С);  $T_{Н3}$ -температура стабилизации корпуса на третьем режиме (244°С);  $T_j$  – рабочая температура керамических РТС-элементов. Здесь же, обязательно следует применить и второе допущение о том, что температура самих РТС-элементов в стабилизированных режимах, практически не отличается для режимов 2 и 3, т.е. (грубо)  $T_{ref2} \approx T_{ref3}$ . Такое допущение может считаться вполне обоснованным, поскольку рассеиваемая мощность имеет близкий порядок, а прочие условия применения нагревателей идентичны.

Результат графоаналитического решения системы линейных уравнений демонстрирует рис. 6. Точка пересечения «А» указывает на то, что расчетная температура стабилизации РТС-элементов достигает 303°С, а термическое сопротивление  $R_C$  равно 2К/Вт.

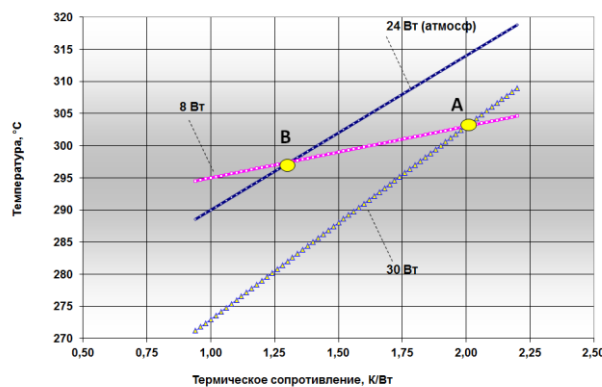


Рис. 6. К оценке тепловой проводимости механического контакта РТС-модулей с корпусом нагревателя ( $R_C$ ).

Прямая, построенная для атмосферного режима 24 Вт (по аналогии с двумя другими) также дает точку пересечения «В», которая вполне могла бы иметь физическое объяснение в случае, если бы  $R_C$  было одинаковым в атмосфере и в вакууме. Но учитывая что 24 Вт и 30 Вт близкие нагрузки, более логично предположить что  $R_C$  в атмосфере имеет значение не 2,0, а 1,5 К/Вт, в то время как рабочая (расчетная) температура РТС-элементов, скорее всего, примерно, та же.

Определенные сомнения в выполненных оценках могут иметь место, если принять во внимание то, что при установке нагревателя на пластину отвод нагрузки 30 Вт от корпуса был односторонним, в то время как 8 Вт излучались корпусом в окружающую среду равномерно.

Количественная оценка этого фактора (в пользу высказанных выше суждений) выполнена ниже.

#### 4. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Внутреннее температурное состояние РТС-нагревателя невозможно увидеть с помощью тепловизора, как, впрочем, не представляется возможным и установить температурные датчики внутри нагревателя (в данном эксперименте, не разрушив нагреватель, либо, не повлияв на его рабочие характеристики). Однако, полученные в тепловакуумных испытаниях результаты – можно рассматривать, по сути, как достоверные граничные условия, которые применимы для более правдоподобного численного компьютерного моделирования [7]. Если угодно, совместно используя результаты эксперимента и конечно-элементную компьютерную модель, можно выполнить что-то похожее на решение обратной задачи теплопроводности. Разрушение нагревателя позволило подробнее изучить внутреннее строение, что способствовало созданию его более адекватной 3D-модели.

Для воспроизведения внутреннего температурного состояния нагревателя была построена его тепловая МКЭ-модель, показанная на рисунке 7. Данный рисунок воспроизводит режим 8 Вт (без пластины). В расчете, результаты которого демонстрирует рис. 7 принималось, что все боковые поверхности нагревателя излучают в окружающую среду с температурой 20°C и имеют  $\epsilon=0,288$ . Эти параметры применяются, собственно, только для того чтобы воспроизвести зарегистрированную в испытаниях температуру корпуса 287°C. Тепловыделение принято объемным 4151836 Вт/м<sup>3</sup>, что соответствует 8 Вт для принятых размеров керамических элементов.

Для контактирующих поверхностей внутри нагревателя принято, что  $\alpha = 490$  Вт/м<sup>2</sup>К. Причем, для упрощения расчетов принято, что удельные тепловые контакты от электропроводящих пластин к корпусу и от керамических элементов к пластинам величины близкого порядка. Надо сказать, что применение нескольких разных параметров  $\alpha$  не внесли бы ничего существенного в модель, для достижения конечного результата, поскольку схема теплоотвода тривиальна. В перспективе, для проектирования специальных РТС-нагревателей, предназначенных для работы в вакууме, более детальное представление величины  $\alpha$  будет, безусловно, необходимо.

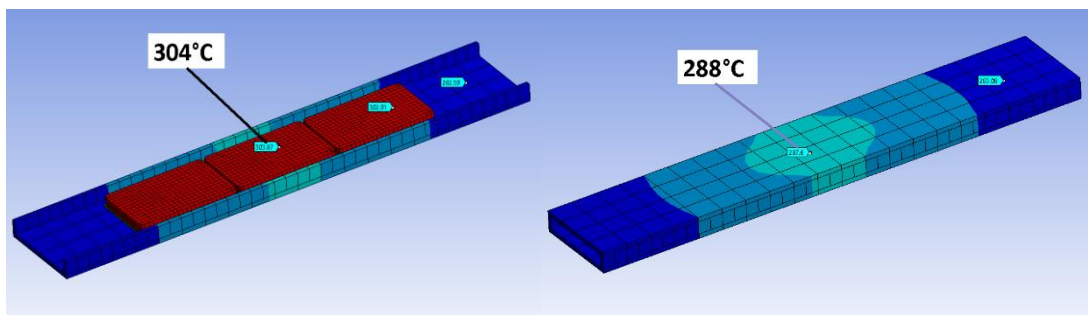


Рис. 7. Вычислительный эксперимент, воспроизводящий режим «8 Вт».

Рис. 8 воспроизводит режим-3 т.е. нагрузку 30 Вт. Здесь, для тех же условий на контактных поверхностях ( $\alpha = 490$  Вт/м<sup>2</sup>К.) моделируется режим с температурой корпуса 244°C и теплоотводом на одну грань, с помощью температуры пластины 145°C и контакта между нагревателем и пластиной, характеризуемого  $\alpha = 158$  Вт/м<sup>2</sup>К. Тепловыделение в керамических элементах составляет 15569250 Вт/м<sup>3</sup>.

Надо сказать, что представленные режимы испытаний выполнялись повторно (неоднократно) и благодаря этому было подтверждено, что параметры стабилизации температуры РТС-нагревателя (в вакуумной камере) не являются случайными, либо неоднозначными.

Неизменный коэффициент  $\alpha = 490 \text{ Вт/м}^2\text{К}$  применяемый для моделирования тепловых контактов в МКЭ-модели при точном воспроизведении граничных условий позволил получить практически одну ту же «точку пересечения» (в пределах точности, около  $303^\circ\text{C}$ ) и в вычислительном эксперименте, и в графоаналитическом анализе результатов тепловакуумных испытаний. Этот факт даёт основание полагать, что физическое толкование результатов проведённых экспресс-испытаний выполнено корректно.

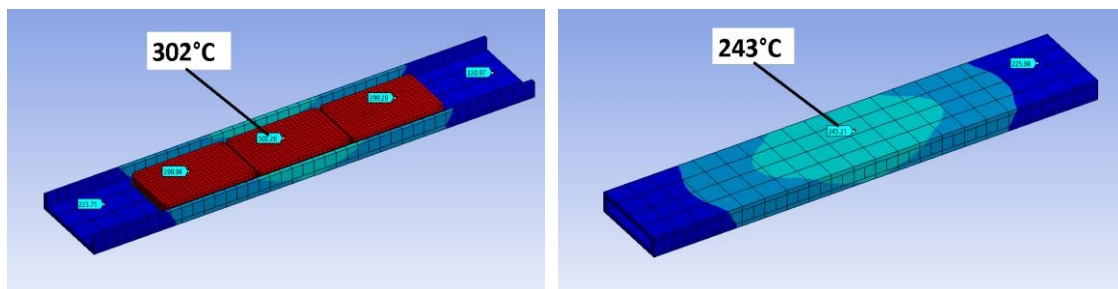


Рис. 8. Вычислительный эксперимент, воспроизводящий режим «30 Вт».

## **5. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.**

Результаты проведенного авторами экспресс-исследования показали, что РТС-нагреватель стабильно функционирует в вакууме. Поставщики испытанных образцов нагревателей (авторы испытали не единственный образец) выбрали наиболее высокую температуру стабилизации  $300^\circ\text{C}$  («по умолчанию»), по-видимому, для экономии количества устанавливаемых керамических тепловыделяющих РТС-элементов и охвата большего диапазона рабочих температур, что расширяет возможности применения данных нагревателей в бытовых и промышленных устройствах.

Значения тепловых проводимостей, полученные в результате анализа результатов тепловакуумного и вычислительного экспериментов, позволят в перспективе прогнозировать температурное состояние нагревателя и термостатируемых с его помощью объектов более корректно. Представленная информация будет полезна для проектирования перспективных конструкций РТС-нагревателей, рассчитанных на применение в вакууме.

Стабильность характеристик РТС-элементов при длительном функционировании в условиях вакуума, очевидно, потребует отдельного изучения, однако, учитывая то, что РТС-нагреватель может быть выполнен и в герметичном исполнении, (возможное) обнаружение деградации РТС-элемента в результате прямого воздействия вакуума не будет являться причиной, ограничивающей применение РТС-нагревателей в вакууме и/или в космосе.

Исследование было выполнено в достаточно широком температурном диапазоне от  $+20$  до  $+300^\circ\text{C}$  и подтверждает относительно предсказуемое и стабильное функционирование РТС-нагревателя. Несомненно, указанный диапазон представляет интерес для решения широкого круга технических задач. Однако, эксплуатация РТС-нагревателя в вакууме может происходить при воздействии пониженных и низких температур, например, в диапазоне от минус  $150$  до плюс  $50^\circ\text{C}$ . Для оценки применимости РТС-элементов в диапазоне пониженных температур потребуются дополнительные экспресс-испытания.

Изучение характеристик РТС-нагревателя как «целостного» технического устройства производилось на основе воспроизведения и анализа рабочих

стабилизированных состояний своеобразного «черного ящика», т.е. физические процессы происходящие в  $\text{BaTiO}_3$  не воспроизводились. Данный подход бывает необходим с утилитарной точки зрения и уже оправдал себя при создании простых СТР. Однако, для систем, отличающихся сложной динамикой «поведения», более углубленное моделирование РТС-нагревателей будет оправдано и даже необходимо.

К определенной технической проблеме можно отнести обнаруженный существенный заброс потребляемой мощности РТС-нагревателем перед выходом на точку Кюри ( $T_{\text{Ref}}$ ). Этот факт должен найти отражение в определении требуемых характеристик системы электроснабжения, которая в перспективе должна обслуживать системы термостатирования с установленными в них РТС-нагревателями.

Наличие участков с отрицательным температурным коэффициентом в характеристике РТС-элемента, также может служить объектом отдельного внимания при разработке схемных решений, обеспечивающих стабилизацию температуры с помощью РТС-нагревателей.

Представленные здесь результаты и факты могут представлять интерес для специалистов, занимающихся проектированием систем обеспечения теплового режима приборов и оборудования различного назначения, функционирующих в условиях вакуума.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Ржанов А.В. Титанат бария – новый сегнетоэлектрик. Успехи физических наук, Т38 №4 Физический институт им.Левбедева РАН, 1949 С.461-489
2. Галлерчик Б.А. Позисторные нагреватели с автостабилизацией температуры // Датчики и системы. 2005. № 4. С. 42–46.
3. Technical specification: PTC thermistors as heating elements, Disk shaped, 12 V, Series/Type: B59060, January 2016, EPCOS AG is a TDK Group Company, 9 p.
4. URL: [https://s.click.aliexpress.com/e/\\_dY64Fke](https://s.click.aliexpress.com/e/_dY64Fke)
5. PTC Thermistors. EPCOS AG 2009, Corporate Center, P.O.Box 80 17 09, 81617 Munich, Germany, 28p.
6. Котляров Е.Ю., Тулин Д.В., Финченко В.С. Анализ применимости нагревателей с положительным температурным коэффициентом сопротивления в локальных системах обеспечения теплового режима блоков оборудования космических аппаратов // Тепловые процессы в технике 2020. Т. 12. №2. С. 88–97
7. МКЭ ANSYS Справочное руководство.