

УДК 621.56, 536.2, 621.383.4  
EDN: KSMVRI

PACS: 07.20.Mc, 44.10.+I, 85.60.Gz

## Развитие модели расчета теплопритоков для применения в разработке конструкции вакуумного криостатируемого корпуса фотоприемных устройств

© Д. Д. Бабенко\*, М. В. Банников, Г. И. Некрасов

АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

\* E-mail: rainbowdm1802@gmail.com

Статья поступила в редакцию 5.06.2025; после доработки 24.06.2025; принята к публикации 11.08.2025

Шифр научной специальности: 2.4.8; 2.2.6

*Рассматривается обобщенная и дополненная модель для расчета теплопритоков при разработке вакуумного криостатируемого корпуса фотоприемных устройств. Выделены основные источники теплопритоков, а также отмечены моменты, которыми можно пренебречь. Определены точки дальнейшего развития расчетной модели. Проведено сравнение расчетных результатов с экспериментальными данными.*

*Ключевые слова:* газовая криогенная машина; цикл Стирлинга; микрокриогенная система; температура криостатирования.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-4-101-106

### 1. Введение

При проектировании охлаждаемых матричных фотоприемных устройств, важную роль играет вакуумный криостатируемый корпус, т. к. его конструкция и материалы, из которых он изготовлен, влияет на тепловую нагрузку, на микрокриогенную систему (далее МКС) охлаждения. Как следствие от правильной конструкции корпуса зависит энергопотребление системы в целом, а в некоторых случаях даже выбор самой системы охлаждения, что влияет также и на габариты системы. При проектировании вакуумного криостатируемого корпуса опираются на входные параметры, такие как требования по габаритам, системы и размеров сборки матричного фоточувствительного элемента (далее МФЧЭ) с мультиплексором и металлокерамического узла. Дальнейшая проектировка сводится к оптимизации термодинамических и механических параметров корпуса и конечного устройства в целом.

Основным источником теплопритоков является теплопроводность вдоль держателя (холодного пальца). Уменьшить эту часть можно только за счет геометрии и материала держателя. В геометрию держателя (в большинстве случаев) входит его длина и площадь поперечного сечения. Выбор правильной геометрии является тяжелой задачей, т. к. она включает в себя много зависящих друг от друга факторов. В первую очередь увеличение длины держателя способствует уменьшению теплового потока вдоль него, а также позволяет использовать регенератор большего размера, что положительно скажется и на производительности МКС. Но длина регенератора ограничена, во-первых, габаритными размерами конечного изделия, а во-вторых, механическими свойствами конструкции. Механические свойства также накладывают ограничения на диаметр держателя, а как следствие на площадь поверхности, через которую осуществляется теплоперенос. Альтернативной возможностью уменьшить теплоперенос за счет

геометрии является уменьшение толщины стенок, но ранее специалистами RICOR [1] были выявлены, оптимальные значения толщины для нескольких материалов держателя.

Следующим по величине тепловой нагрузки является теплоприток за счет радиационного теплообмена. В вакуумном зазоре между внешней стенкой корпуса и держателем происходит теплообмен излучением от более нагретой поверхности корпуса к держателю, который имеет разную температуру по своей площади от температуры криостатирования (в зависимости от криогенной системы температура может быть в диапазоне 4,2÷150 К) до температуры корпуса, близкой к температуре окружающей среды (до 75 °С). Температуры вносят наиболее существенный вклад в значение теплопроводности, что очевидно из закона Стефана-Больцмана, но при этом единственная возможность уменьшить теплопритоки температурой, это увеличить температуру криостатирования или уменьшить температуру эксплуатации конечного изделия. Зачастую эти параметры заданы устройством до проектирования корпуса и не корректируются. Поэтому на этапе проектирования можно уменьшить теплопритоки излучением только изменением геометрии, а именно взаимодействующих площадей и материалом корпуса и держателя.

Также учитывается теплоприток от мультиплексора и МФЧЭ. Если охлаждаемое устройство уже изготовлено и может быть смонтировано в уже изготовленный вакуумный криостатируемый корпус, то можно получить нагрузку экспериментально измерив разницу теплопритоков с выключенным и включенным устройством.

Меньший вклад вносят теплопритоки из внешней среды по выводам на контактные площадки и теплопритоки за счет остаточных газов. Расчет теплопритоков за счет остаточных газов показал, что их значения на несколько порядков ниже (порядка ~300 мкВт), чем вклад от других источников теплопритоков, описанных выше.

## 2. Теплопроводность держателя

Как следует из п. 1 теплопритоки за счет теплопроводности вносят наибольший вклад в

суммарную величину теплопритоков ВКК, а значит следует начать уточнение расчетной модели с них. Обычно теплопритоки за счет теплопроводности рассчитываются по зависимости:

$$Q_{\text{тпр}} = \lambda_{\text{держ}} \times (T_{\text{г}} - T_{\text{х}}) \times \frac{S_{\text{сд}}}{h_{\text{д}}}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{\text{держ}}$  – теплопроводность материала держателя,  $T_{\text{г}}$  и  $T_{\text{х}}$  – температура горячего и холодного концов держателя соответственно,  $S_{\text{сд}}$  – площадь сечения держателя,  $h_{\text{д}}$  – длина держателя. Как правило в качестве теплопроводности берутся значения при НКУ, но в реальной ситуации температура держателя по длине изменяется значительно, как и значение теплопроводности от температуры.

В предлагаемой модели в качестве теплопроводности берется интегральное значение функции теплопроводности от температуры материала в пределе от  $T_{\text{х}}$  до  $T_{\text{г}}$ . Сложность еще добавляет отсутствие значений теплопроводности при криогенных температурах для многих материалов. Но для некоторых часто используемых в криогенных технологиях материалов существует библиотека [2] функций теплопроводности, теплоемкости, модуля Юнга и коэффициента линейного расширения. Также для материалов с известными табличными значениями в области криогенных температур можно провести аппроксимацию и использовать полученную функцию в качестве исходной. Для материалов неисследованных в области криогенных температур, в первом приближении можно провести аппроксимацию имеющихся значений, но стоит внимательно отнестись к возможному аномальному поведению функции, особенно при приближении к температурам жидкого гелия.

Еще одно значение, требующее корректировки — это температура горячего конца держателя. Обычно оно принимается равной температуре окружающей среды. В рамках работы был проведен эксперимент по измерению температуры корпуса при наработке. Микрокриогенная система Крио 1000, производства АО «НПО «Орион», ставилась на наработку в течение 48 часов при температуре 22 °С, по прошествии времени измерялась температура держателя в месте соединения с корпусом. Температура измерялась пиромет-

ром и термопарой, в результате было получены значение 32,5 °С, поэтому была введена поправка и температура горячего конца приналось равной

$$T_r = E_{o.c.} + \tau; \tau = 10,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

где  $T_{o.c.}$  – температура окружающей среды,  $\tau$  – значение поправки. МКС может работать в широком диапазоне температур от -50 °С до +65 °С, поэтому на основе полученных результатов, было произведено моделирование корпуса при крайних значениях температуры эксплуатации. Моделирование при одинаковом режиме работы показало, что поправка отличается на 0,1 °С в крайних точках, что несущественно. Фактически при зафиксированном режиме работы, фиксируется тепловой поток от области сжатия, материал и геометрия корпуса не меняется и изменение температуры зависит только от конвективного теплообмена стенок с внешней средой. В дальнейшем планируется дополнить модель зависимостью тепловой нагрузки, создаваемой в объеме сжатия в зависимости от температуры окружающей среды, т. к. при её росте увеличивается частота вращения электродвигателя и тем самым тепловой поток, передаваемый от области сжатия на корпус МКС и МФПУ в целом.

### 3. Излучение

Вакуумный криостатируемый корпус представляет собой сосуд Дьюара конечных размеров, поэтому принято рассчитывать теплоприток за счет радиационного теплообмена по модели теплообмена излучением между телом и оболочкой (в некоторых источниках для системы, состоящей из двух тел, из которых одно тело невогнутое, а другое облучает само себя (вогнутое)) [3]. Для упрощения дальнейшего рассмотрения обозначим все величины, относящиеся к внешней стенке корпуса индекса «внш», а внутренней, которой является внешняя стенка держателя индексом «внт». Очевидно, что в нашей системе тепловой поток направлен от внешней стенки к внутренней и вычисляется по формуле:

$$Q_{изл} = \sigma \times (T_{внш}^4 - T_{внт}^4) \times \varepsilon_{пр} \times F_{внт}, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана  $5,7 \times 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ,  $T_{внш}$  – температура внешней стенки,  $T_{внт}$  – температура внутренней стенки,  $\varepsilon_{пр}$  – приведенный коэффициент излучательной способности,  $F_{внт}$  – площадь внутренней стенки. Приведенный коэффициент излучательной способности в этой модели вычисляется:

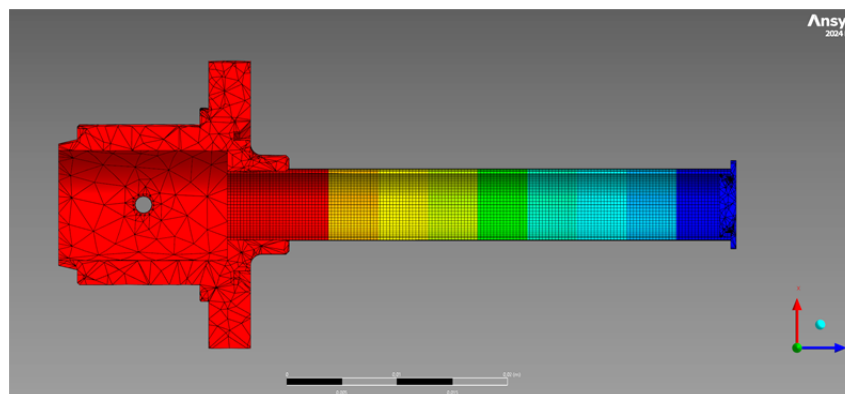
$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{внт}} + \left( \frac{1}{\varepsilon_{внш}} - 1 \right) \times \frac{F_{внт}}{F_{внш}}} \quad (4)$$

где  $F_{внш}$  – площадь внешней стенки,  $\varepsilon_{внт}$  – коэффициент излучательной способности внутренней стенки,  $\varepsilon_{внш}$  – коэффициент излучательной способности внешней стенки. Очевидно, что в приведенной модели, как и в радиационном теплообмене в целом, наибольший вклад в значение теплового потока вносит значение температуры. При этом температура держателя по его длине изменяется от температуры криостатирования (в зависимости от криогенной системы 4,2÷150 К), до температуры окружающей среды. Поэтому для получения верных значений теплопритоков необходимо знать распределение температур по длине держателя, что является тяжелой задачей для эксперимента, т. к. держатель одновременно выполняет роль стенки вакуумного корпуса и стенки полости расширения МКС. Но т. к. температура на холодном конце соответствует температуре криостатирования, а на горячем конце значения получены в пункте 2, то в качестве приближения распределение температур по держателю можно получить решением задачи стационарной теплопроводности. С помощью пакета Ansys, импортируя 3D-модель держателя, задаем граничные условия: температура холодного конца, температура горячего конца, функция теплопроводности от температуры для материала держателя, и получаем решение задачи методом конечных элементов (МКЭ), по которому определяем интегральную температуру держателя, т. е. внутренней поверхности  $T_{внт}$  (рисунок а). Температуру внешнего корпуса принимаем как температуру окружающей среды с учетом поправки, описанной в п. 2.

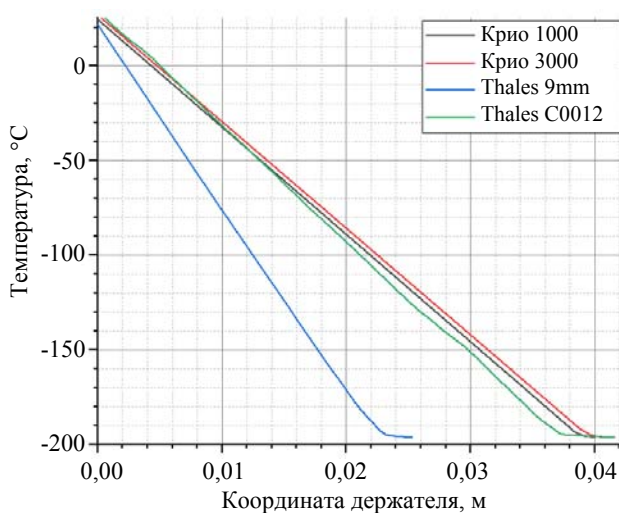
Для сравнения были взяты несколько конструкций держателя (две производства

АО «НПО «Орион» и две производства Thales, Франция) и проведено моделирование зависимости температуры вдоль держателя для различных материалов (AISI 316, 321, L605). По полученным результатам выявлено основное различие в распределениях температуры, связанное с особенностями технологиями производства, а именно методом крепления диска к трубке. В случае с держателями Thales используются гибридные кольца для пайки, из-за которых происходит утолщение трубки и как следствие профиль температур отлича-

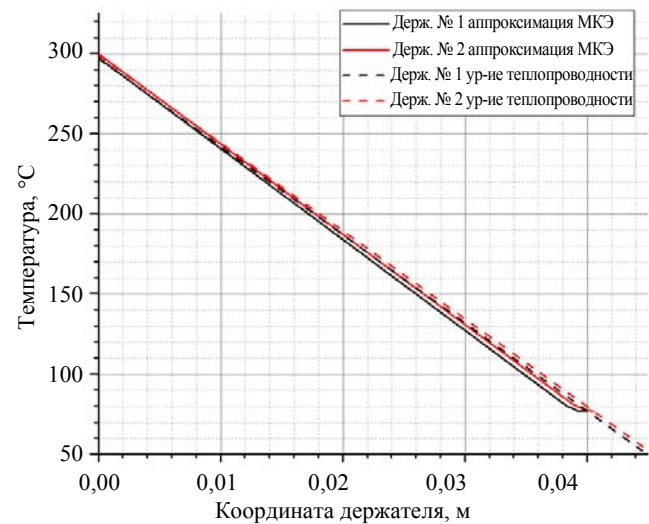
ется, а именно появляется плато в месте утолщения (рисунок б). Соответственно такие держатели нельзя рассматривать в рамках уравнения теплопроводности трубки из-за более сложной формы и неоднородности материалов. Если же гибридные кольца не используются, то допустимо использовать решение уравнения теплопроводности для трубки. В этом случае распределения температур отличаются незначительно (рисунок в), на 0,6 % (170 мкВт при НКУ), при этом значительно упрощается реализация расчетной модели.



а)



б)



в)

**Рисунок. Распределения температур вдоль держателя:** а) – распределение температур полученной МКЭ в среде Ansys; б) – зависимость температуры от координаты для разных держателей; в) – сравнение распределений, полученных уравнением теплопроводности и МКЭ на держателях без гибридных колец

#### 4. БИС и вывода

БИС через металлические вывода соединен с окружающей средой, поэтому часть тепла приходит на БИС извне через металлические

вывода, за счет разницы температур на их концах. Вычисления проводятся по формуле (1). Целесообразность вычисления с поправками, описанными в п. 2, касаемые использования интегральных величин необхо-

димо рассматривать относительно полученной величины теплопритоков без этой поправки в зависимости от конструкции корпуса. В современных фотоприемных устройствах разница между теплопритоками от держателя и выводов составляет минимум порядок, поэтому вклад учета поправок на теплопроводность может не иметь решающего значения. В рамках работы была проведена оценка влияния поправки на зависимость теплопроводности от температуры для распространенных при пайке выводов материалов (золото, платина). В качестве начальных условий выбраны:

- Диаметр – 30 мкм;
- Суммарная длина выводов – 15 см;
- Количество выводов – 50;
- Температура холодного края – 77 К;
- Температура горячего края – 300 К.

В результате для этих начальных условий с использованием золота получена разница в 400 мкВт, т. е. 2,45 % от величины теплопритоков за счет выводов и 0,13÷0,26 % от суммарной величины теплопритоков на ФЧЭ. А для платины 4 мкВт, т. е. 1,08 % от величины теплопритоков за счет выводов и менее 0,003 % от суммарной величины теплопритоков на ФЧЭ. Соответственно для таких начальных условий использование поправки необязательно, особенно при использовании

платины, т. к. исходя из имеющихся данных [4–6] теплопроводности от температуры в диапазоне 200÷400 К меняется медленно, а аппроксимация данных позволяет судить о таком же характере изменения теплопроводности и до 77 К. Но при рассмотрении больших диаметров, длин и количества выводов, стоит отметить что вклад поправки будет расти пропорционально количеству выводов и квадрату диаметра, при этом зависимость от длины выводов обратно пропорциональная. Соответственно для большинства современных МФПУ поправку на теплопроводность материала выводов можно не рассматривать, а при расчете иных конструкций проводить оценивать относительно исходных данных.

### 5. Апробация модели

По результатам расчетов по классической модели и модифицированной вакуумного криостатируемого корпуса серийного изделия ФЭМ16-03, было получено снижение теплопритоков за счет теплопроводности в модифицированной модели на 17,6 % и на 5,6 % за счет излучения. Расчетное значение составило 243,5 мВт, что приблизило его к значениям измеренных на серийных изделиях.

	Классическая модель	Модифицированная
Теплоприток от МФЧЭ и БИС	40 мВт	40 мВт (не менялся)
Теплоприток от выводов	14,1 мВт	13,8 мВт
Теплоприток от теплопроводности	176 мВт	145 мВт
Теплоприток от излучения	47,4 мВт	44,7 мВт
Общий теплоприток	277,5 мВт	243,5 мВт

### 6. Выводы

Проведена работа по адаптации классической модели расчета теплопритоков для вакуумных криостатируемых корпусов МФПУ. В результате корректировок полученные значения стали ближе к тем, что измеряются на серийных изделиях, что достаточно для оценки при разработке конструкции и выбора материалов. Выявлено, что при использовании гибридных колец при сварке держателя, для прогнозирования теплопритоков стоит прово-

дить расчет методом конечных элементов из-за неоднородности холодного конца держателя. Также выбор сложности модели учета теплопритоков от выводов зависит от устройства (количества выводов, их длины и сечения). Для более точной оценки и прогнозирования теплопритоков требуются определенные доработки, а именно учет работы обратного цикла Стирлинга в регенераторе и изменение температуры стенок держателя, а также более точный учет вклада теплопритоков от компрессора и статора на держатель.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Katz A., Segal V., Filis A., Haim Z., Nachman I., Krimmuz E., Gover D. / Proc. of SPIE. Infrared Technology and Applications XL. 2014. Vol. 9070. P. 90702N. doi: 10.1117/12.2050317
2. <https://trc.nist.gov/cryogenics/materials/material-properties.htm>
3. Солодов А. П. / Открытое образование. 2013. № 1(96). С. 8–16. [https://doi.org/10.21686/1818-4243-2013-1\(96\)-8-16](https://doi.org/10.21686/1818-4243-2013-1(96)-8-16)

4. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справочник. – М.: Metallurgiya, 1989.
5. Васильева Е. В., Волкова Р. М., Захарова М. И. и др. Платина, ее сплавы и композиционные материалы / Под ред. Васильевой Е. В. – М.: Metallurgiya, 1980.
6. Новицкий Л. А., Кожевников И. Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах: справочник. – М.: Машиностроение, 1975.

PACS: 07.20.Mc, 44.10.+I, 85.60.Gz

## Development of a model for calculating heat flows for use in the design of a vacuum cryostatic housing for photodetectors

D. D. Babenko\*, M. V. Bannikov and G. I. Nekrasov

RD&amp;P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

\*E-mail: [rainbowdm1802@gmail.com](mailto:rainbowdm1802@gmail.com)

Received 5.06.2025; revised 24.06.2025; accepted 11.08.2025

*The article considers a generalized and supplemented model for calculating heat inflows when developing a Dewar assembly for photodetectors. The calculated results are compared with experimental data. The main sources of heat inflows are identified, and points that can be neglected are noted. Points for further development of the calculated model are determined.*

*Keywords:* gas cryogenic machine; cryocooler; Stirling's cycle; microcryogenic machine; cold tip temperature.

## REFERENCES

1. Katz A., Segal V., Filis A., Haim Z., Nachman I., Krimmuz E. and Gover D., Proc. of SPIE. Infrared Technology and Applications XL **9070**, 90702N (2014). doi: 10.1117/12.2050317
2. <https://trc.nist.gov/cryogenics/materials/materialproperties.htm>
3. Solodov A. P., Otkrytoe obrazovanie, № 1(96), 8–16 (2013). [https://doi.org/10.21686/1818-4243-2013-1\(96\)-8-16](https://doi.org/10.21686/1818-4243-2013-1(96)-8-16)
4. Zinov'ev V. E. Teplofizicheskie svoistva metallov pri vysokikh temperaturakh: spravochnik. Moscow, Metallurgiya, 1989.
5. Vasil'eva E. V., Volkova R. M., Zakharova M. I. i dr. Platina, ee splavy i kompozitsionnye materialy / Pod red. Vasil'evoi E. V. Moscow, Metallurgiya, 1980.
6. Novitskii L. A. and Kozhevnikov I. G. Teplofizicheskie svoistva materialov pri nizkikh temperaturakh: spravochnik. Moscow, Mashinostroenie, 1975.

## Об авторах

**Бабенко Дмитрий Дмитриевич**, к.т.н., старший научный сотрудник отдела вакуумных конструкций и криосистем, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: [rainbowdm1802@gmail.com](mailto:rainbowdm1802@gmail.com) SPIN-код РИНЦ 9634-1880, Author ID 1172254

**Банников Максим Викторович**, и.о. начальника отдела вакуумных конструкций и криосистем, заместитель начальника НТЦ МФЭ, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: [maxnutnet@yandex.ru](mailto:maxnutnet@yandex.ru)

**Некрасов Глеб Игоревич**, к.т.н., старший научный сотрудник отдела вакуумных конструкций и криосистем, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: [gleb.nekrasov.18@mail.ru](mailto:gleb.nekrasov.18@mail.ru) SPIN-код РИНЦ 6957-1320, Author ID 976504