

# Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 36.2.083

## Параметрическая идентификация холодопроизводительности азотной и гелиевой ступеней двухступенчатого криостата

Н.О. Борщев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Объединенный институт высоких температур РАН

## Cooling capacity parametric identification of the two-stage cryostat nitrogen and helium stages

N.O. Borshchev

Federal State Budgetary Scientific Institution  
Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences

Предложен метод оценки холодопроизводительности азотно-гелиевого криостата замкнутого типа. Метод основан на поиске экстремума расчетных значений холодопроизводительности каждой ступени в каждом временном блоке при минимизации среднеквадратичного функционала невязки между ожидаемой и расчетной динамикой захлаживания ступеней. Сначала решена прямая задача теплообмена конструкции, затем найдена минимальная среднеквадратичная ошибка исходя из выбранного метода регуляризации с итерационным уточнением исследуемых параметров. Для оптимизации выбран метод сопряженных направлений как наиболее точный метод первого порядка сходимости, для преодоления некорректности исходных данных — метод итерационной регуляризации, где соответствующим параметром являлся номер итерации.

**EDN:** ХТРСХК, <https://elibrary/xtpcxk>

**Ключевые слова:** задача теплообмена, метод итерационной регуляризации, холодопроизводительность ступени, двухступенчатый криостат, метод сопряженных направлений

The paper proposes a method to assess cooling capacity of the closed-type nitrogen-helium cryostat. The method is based on searching for extremum of the calculated values of the each stage cooling capacity in each time block while minimizing the root-mean-square functional of the discrepancy between the expected and calculated dynamics in cooling the stages. First, direct problem of the structure heat transfer is solved, and then the minimum root-mean-square error is found based on the selected regularization method with iterative refinement of the parameters under study. The conjugate directions method is chosen for optimization, as it is the most accurate method of the first order of convergence. The iterative regularization method is selected to overcome incorrectness in the initial data, as iteration number is the regularizing parameter.

EDN: XTPCXX, <https://elibrary/xtpcck>

**Keywords:** heat transfer problem, iterative regularization method, stage cooling capacity, two-stage cryostat, conjugate directions method

При проектировании двухступенчатых криостатов замкнутого типа, основанных на принципе откачки атмосферы и циркуляции хладагента внутри контуров, необходимо выбрать криомашину, позволяющую за заданный промежуток времени заохладить первую — азотную (АС) и вторую — гелиевую (ГС) ступени криостата до их необходимых стационарных температур.

Цель работы — теоретическое определение отводимой теплоты от каждой из ступеней криостата.

Для достижения поставленной цели сначала необходимо задаться кривыми заохлаживания обеих ступеней, а затем на их основе решить задачу идентификации необходимого количества теплоотвода от каждой из них.

Тепловая модель состоит из трех изотермических узлов: экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ), АС и ГС. Для минимизации лучистого теплопритока от стальной оболочки АС теплоизолирована ЭВТИ. Процесс передачи теплоты осуществляется от стальной оболочки к ЭВТИ. Далее теплота за счет теплопроводности

переходит на алюминиевую оболочку АС и обменивается лучистой энергией с ГС. Упрощенная схема теплообмена приведена на рис. 1.

Математическая модель теплообмена двухступенчатого криостата имеет следующий вид [1–6]:

• для ЭВТИ

$$C_{ЭВТИ} \rho_{ЭВТИ} \frac{\partial T_{ЭВТИ}(\tau)}{\partial \tau} V_{ЭВТИ} = \varepsilon_{прЭВТИ} [T_{st}(\tau) - T_{ЭВТИ}(\tau)] F_{He} - \frac{\lambda_{ЭВТИ}}{\delta_{ЭВТИ}} [T_{ЭВТИ}(\tau) - T_{N_2}(\tau)] F_{ЭВТИ};$$

$$T_{ЭВТИ}(0) = 300 \text{ К};$$

• для АС

$$C_{al}(T_{N_2}) \rho_{al} \frac{\partial T_{N_2}(\tau)}{\partial \tau} V_{N_2} = \varepsilon_{прN_2} [T_{N_2}(\tau) - T_{He}(\tau)] F_{N_2} + \frac{\lambda_{ЭВТИ}}{\delta_{ЭВТИ}} [T_{ЭВТИ}(\tau) - T_{N_2}(\tau)] F_{ЭВТИ} - Q_{N_2}(\tau);$$

$$T_{N_2}(0) = 300 \text{ К};$$

• для ГС

$$C_{Cu}(T_{He}) \rho_{Cu} \frac{\partial T_{He}(\tau)}{\partial \tau} V_{He} = \varepsilon_{прHe} [T_{N_2}(\tau) - T_{He}(\tau)] F_{He} - Q_{He}(\tau);$$

$$T_{He}(0) = 300 \text{ К},$$

где  $C_{ЭВТИ}$ ,  $C_{al}$  и  $C_{Cu}$  — удельная теплоемкость материала ЭВТИ, АС и ГС соответственно, Дж/(кг·К);  $\rho_{ЭВТИ}$ ,  $\rho_{al}$  и  $\rho_{Cu}$  — плотность материала ЭВТИ, АС и ГС соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $T_{ЭВТИ}$ ,  $T_{N_2}$  и  $T_{He}$  — температура ЭВТИ, АС и ГС соответственно, К;  $\tau$  — время, с;  $V_{ЭВТИ}$ ,  $V_{N_2}$  и  $V_{He}$  — объем ЭВТИ, АС и ГС соответственно, м<sup>3</sup>;  $\varepsilon_{прЭВТИ}$ ,  $\varepsilon_{прN_2}$  и  $\varepsilon_{прHe}$  — приведенная степень черноты поверхности ЭВТИ, АС и ГС соответственно;  $T_{st}$  — температура стальной оболочки, К;  $F_{He}$ ,  $F_{ЭВТИ}$  и  $F_{N_2}$  — площадь ГС, ЭВТИ и АС соответственно, м<sup>2</sup>;  $\lambda_{ЭВТИ}$  — коэффициент теплопроводности ЭВТИ, Вт/(м·К);  $\delta_{ЭВТИ}$  — толщина слоя ЭВТИ, м;  $Q_{N_2}$  и  $Q_{He}$  — теплота, отводимая от АС и ГС, Вт.

Приведенные степени черноты поверхности ЭВТИ и АС определяются как

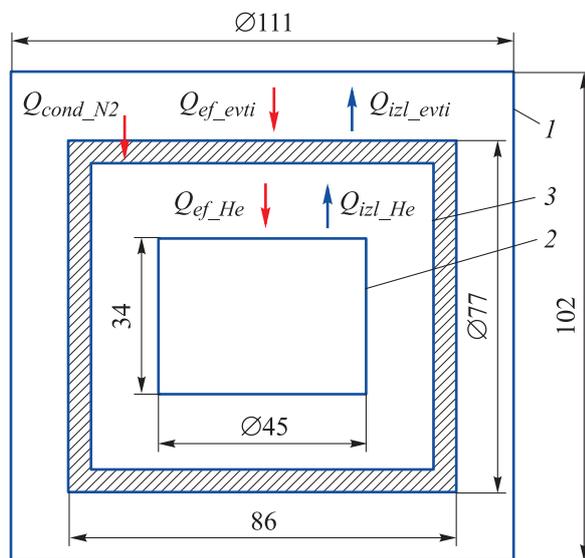


Рис. 1. Тепловая схема теплообмена криостата: 1 — стальная оболочка; 2 — алюминиевая оболочка АС; 3 — медная оболочка ГС;

$Q_{cond\_N_2}$  — тепловой поток, передаваемый за счет теплопроводности от ЭВТИ к АС;  
 $Q_{ef\_evti}$  и  $Q_{ef\_He}$  — эффективный полный тепловой поток на ЭВТИ и ГС;  
 $Q_{izl\_evti}$  и  $Q_{izl\_He}$  — полный тепловой поток, излучаемый с ЭВТИ и ГС

$$\varepsilon_{\text{прЭВТИ}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{st}} + \varphi_{st-\text{ЭВТИ}} \left( \frac{1}{\varepsilon_{\text{ЭВТИ}}} - 1 \right)};$$

$$\varepsilon_{\text{прN}_2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{He}} + \varphi_{He-N_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_{N_2}} - 1 \right)},$$

где  $\varepsilon_{st}$ ,  $\varepsilon_{\text{ЭВТИ}}$ ,  $\varepsilon_{He}$  и  $\varepsilon_{N_2}$  — степень черноты поверхности стальной оболочки, ЭВТИ, ГС и АС соответственно;  $\varphi_{st-\text{ЭВТИ}}$  — угловой коэффициент переизлучения от стальной оболочки к ЭВТИ;  $\varphi_{He-N_2}$  — угловой коэффициент переизлучения от ГС к АС.

Задача сведена к отысканию количества тепловой энергии, которую надо отвести от двух ступеней. Таким образом, чтобы выход на стационарный режим работы криостата составлял не более четырех дней необходимо решить задачу минимизации для поиска глобального экстремума функционала невязки между теоретическим и экспериментальным полями температур [7–13]:

$$S(Q_{He}, Q_{N_2}) = \frac{1}{2} \int_0^{\tau_{\max}} [T_{N_2}(\tau) - \tilde{T}_{N_2}(\tau)]^2 d\tau + \frac{1}{2} \int_0^{\tau_{\max}} [T_{He}(\tau) - \tilde{T}_{He}(\tau)]^2 d\tau,$$

где  $\tau_{\max}$  — максимальное время, с; здесь и далее знак « $\sim$ » над параметрами соответствует экспериментальным значениям.

В качестве метода безусловной минимизации использован градиентный метод сопряженных направлений как наиболее точный метод первого порядка сходимости. Алгоритм метода сопряженных направлений запишем как

$$Q^{n+1} = Q^n + \Delta Q^{n+1}.$$

Здесь  $n$  — номер итерации;

$$\Delta Q^{n+1} = -\beta_n p^{(n)},$$

где  $\beta_n$  — коэффициент Флетчера — Ривса;  $p^{(n)}$  — направление спуска

Направление спуска определяют из следующих выражений:

$$p^n = \text{grad}S(Q^n) + \beta_n p^{n-1};$$

$$\beta_0 = 0; \quad p^{(0)} = \text{grad}S(Q^0); \quad \beta_n = \frac{|\text{grad}S(Q^n)|^2}{|\text{grad}S(Q^{n-1})|^2}.$$

Критерием останова итерационного процесса является выражение, где суммарная погреш-

ность экспериментальных данных  $\delta_{sum}$  не превышает 0,12:

$$|\text{grad}S(\lambda_p^{(0)})| = \sqrt{\sum_{p=1}^3 \left[ \frac{\partial S(\lambda_p^{(n)})}{\partial \lambda_p} \right]^2} \leq \delta_{sum}.$$

Здесь  $\lambda_p^{(n)}$  — параметрическое значение коэффициента теплопроводности образца, Вт/(м·К);

Градиент целевого функционала принимает вид

$$\begin{aligned} \text{grad}[S(Q_{He}, Q_{N_2})] &= \\ &= \int_0^{\tau_{\max}} [T_{N_2}(\tau) - \tilde{T}_{N_2}(\tau)]^2 \frac{\partial T_{N_2}(\tau)}{\partial Q_{N_2}} d\tau + \\ &+ \int_0^{\tau_{\max}} [T_{He}(\tau) - \tilde{T}_{He}(\tau)] \frac{\partial T_{He}(\tau)}{\partial Q_{He}} d\tau. \end{aligned}$$

Чтобы определить компоненты градиента функционала сначала необходимо найти коэффициенты чувствительности функции, для чего выражения, полученные в прямой задаче теплообмена, следует продифференцировать по исследуемым параметрам [14–17].

Дифференцируя по теплоте, отводимой от АС  $Q_{N_2}$ , получаем следующую сопряженную систему уравнений:

• для ЭВТИ

$$\begin{aligned} C_{\text{ЭВТИ}} \rho_{\text{ЭВТИ}} \frac{\partial^2 T_{\text{ЭВТИ}}(\tau)}{\partial \tau \partial Q_{N_2}} V_{\text{ЭВТИ}} &= \\ &= -\varepsilon_{\text{прЭВТИ}} \frac{\partial T_{\text{ЭВТИ}}(\tau)}{\partial Q_{N_2}} F_{He} - \\ &- \frac{\lambda_{\text{ЭВТИ}}}{\delta_{\text{ЭВТИ}}} \left[ \frac{\partial T_{\text{ЭВТИ}}(\tau)}{\partial Q_{N_2}} - \frac{\partial T_{N_2}(\tau)}{\partial Q_{N_2}} \right] F_{\text{ЭВТИ}}; \\ \frac{\partial T_{\text{ЭВТИ}}(0)}{\partial Q_{N_2}} &= 0; \end{aligned}$$

• для АС

$$\begin{aligned} C_{al}(T_{N_2}) \rho_{al} \frac{\partial^2 T_{N_2}(\tau)}{\partial \tau \partial Q_{N_2}} V_{N_2} &= \\ &= \varepsilon_{\text{прN}_2} \left[ \frac{\partial T_{N_2}(\tau)}{\partial Q_{N_2}} - \frac{\partial T_{He}(\tau)}{\partial Q_{N_2}} \right] F_{N_2} + \\ &+ \frac{\lambda_{\text{ЭВТИ}}}{\delta_{\text{ЭВТИ}}} \left[ \frac{\partial T_{\text{ЭВТИ}}(\tau)}{\partial Q_{N_2}} - \frac{\partial T_{N_2}(\tau)}{\partial Q_{N_2}} \right] F_{\text{ЭВТИ}} - 1; \\ \frac{\partial T_{N_2}(0)}{\partial Q_{N_2}} &= 0; \end{aligned}$$

• для ГС

$$C_{Cu}(T_{He}) \rho_{Cu} \frac{\partial^2 T_{He}(\tau)}{\partial \tau \partial Q_{He}} V_{N_2} =$$

$$= \varepsilon_{\text{пр He}} \left[ \frac{\partial T_{N_2}(\tau)}{\partial Q_{N_2}} - \frac{\partial T_{He}(\tau)}{\partial Q_{N_2}} \right] F_{He};$$

$$\frac{\partial T_{He}(0)}{\partial Q_{He}} = 0.$$

Дифференцируя по теплоте, отводимой от ГС  $Q_{He}$ , получаем следующую сопряженную систему уравнений:

• для ЭВТИ

$$C_{\text{ЭВТИ}} \rho_{\text{ЭВТИ}} \frac{\partial^2 T_{\text{ЭВТИ}}(\tau)}{\partial \tau \partial Q_{He}} V_{\text{ЭВТИ}} =$$

$$= -\varepsilon_{\text{пр ЭВТИ}} \frac{\partial T_{\text{ЭВТИ}}(\tau)}{\partial Q_{He}} F_{He} -$$

$$- \frac{\lambda_{\text{ЭВТИ}}}{\delta_{\text{ЭВТИ}}} \left[ \frac{\partial T_{\text{ЭВТИ}}(\tau)}{\partial Q_{He}} - \frac{\partial T_{N_2}(\tau)}{\partial Q_{He}} \right] F_{\text{ЭВТИ}};$$

$$\frac{\partial T_{\text{ЭВТИ}}(0)}{\partial Q_{He}} = 0;$$

• для АС

$$C_{al}(T_{N_2}) \rho_{al} \frac{\partial^2 T_{N_2}(\tau)}{\partial \tau \partial Q_{He}} V_{N_2} =$$

$$= \varepsilon_{\text{пр } N_2} \left[ \frac{\partial T_{N_2}(\tau)}{\partial Q_{He}} - \frac{\partial T_{He}(\tau)}{\partial Q_{He}} \right] F_{He} +$$

$$+ \frac{\lambda_{\text{ЭВТИ}}}{\delta_{\text{ЭВТИ}}} \left[ \frac{\partial T_{\text{ЭВТИ}}(\tau)}{\partial Q_{He}} - \frac{\partial T_{N_2}(\tau)}{\partial Q_{He}} \right] F_{\text{ЭВТИ}};$$

$$\frac{\partial T_{N_2}(0)}{\partial Q_{He}} = 0;$$

• для ГС

$$C_{Cu}(T_{He}) \rho_{Cu} \frac{\partial^2 T_{He}(\tau)}{\partial \tau \partial Q_{He}} V_{He} =$$

$$= \varepsilon_{\text{пр He}} \left[ \frac{\partial T_{N_2}(\tau)}{\partial Q_{He}} - \frac{\partial T_{He}(\tau)}{\partial Q_{He}} \right] F_{He};$$

$$\frac{\partial T_{He}(0)}{\partial Q_{He}} = 0.$$

Чтобы найти шаг спуска  $\alpha_{\text{сп}}$ , на основе метода итерационной регуляризации [9] запишем выражение целевого функционала на следующей итерации

$$S(q_p + \Delta q_p) = S(q_p) - \alpha_{\text{сп}} \left[ \frac{\partial S(q_p)}{\partial \lambda_p} \right]^2 =$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \int_0^{\tau_{\text{max}}} T \left[ (q_p, \tau) - \alpha_{\text{сп}} \frac{\partial T(q_p, \tau)}{\partial q_p} \right]^2 - \tilde{T}(\tilde{\tau})^2 d\tau,$$

где  $q_p$  — холодопроизводительность изотермического узла.

Отсюда согласно принципу глобального минимума необходимо и достаточно приравнять полученное выражение к нулю и выразить шаг спуска. После преобразований имеем

$$\alpha_{\text{сп}} = \sum_{m=1}^M \int_0^{\tau_{\text{max}}} \frac{T(q_p, \tau) - \tilde{T}(\tilde{\tau})}{\frac{\partial T(q_p)}{\partial q_p}} d\tau.$$

Так как количество варьируемых параметров в ходе итерационной минимизации более одного, вместо искомым величин, отводимой тепловой энергии, получим их эффективные параметры.

В качестве подходящей динамики захлаживания двух ступеней выбраны результаты захлаживания криостата высотой 2 м и диаметром 1 м в течение четырех дней (рис. 2).

Результаты расчета температуры изотермических узлов, получаемой в ходе минимизации функционала, приведены на рис. 3. Темпера-

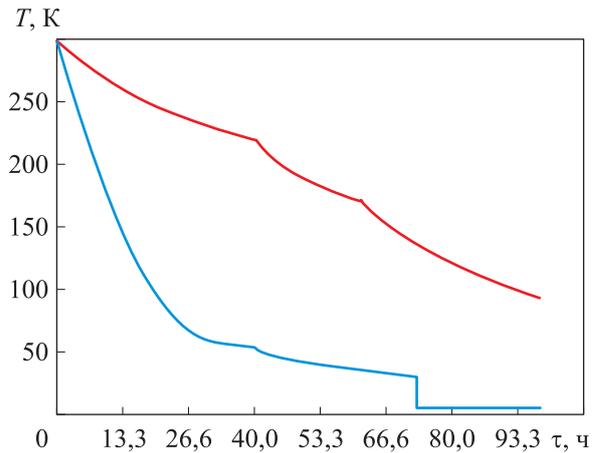


Рис. 2. Экспериментальные зависимости температуры  $T$  АС (—) и ГС (—) двухступенчатого криостата от времени  $\tau$

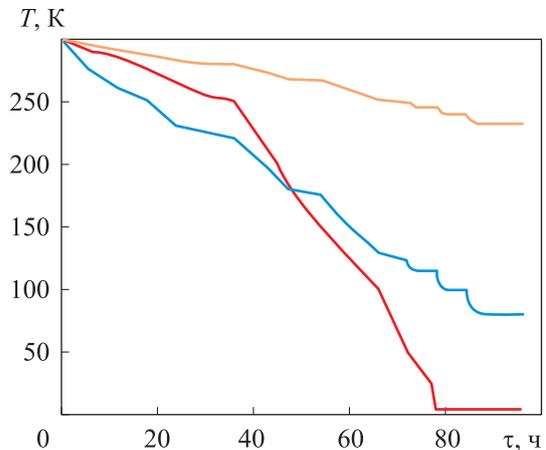


Рис. 3. Расчетные зависимости температуры  $T$  ЭВТИ (—), АС (—) и ГС (—) от времени  $\tau$

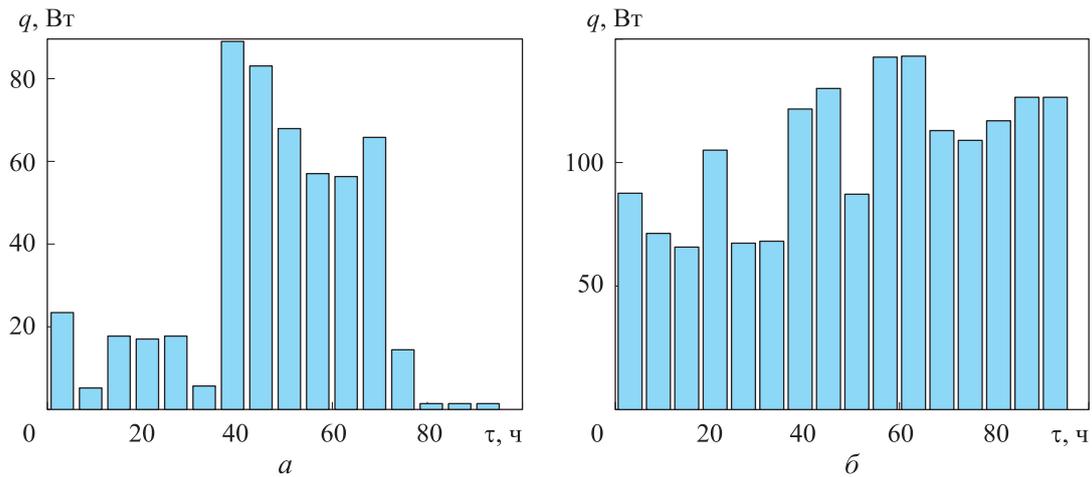


Рис. 4. Зависимости холодопроизводительности  $q$  ГС (а) и АС (б) от времени  $\tau$

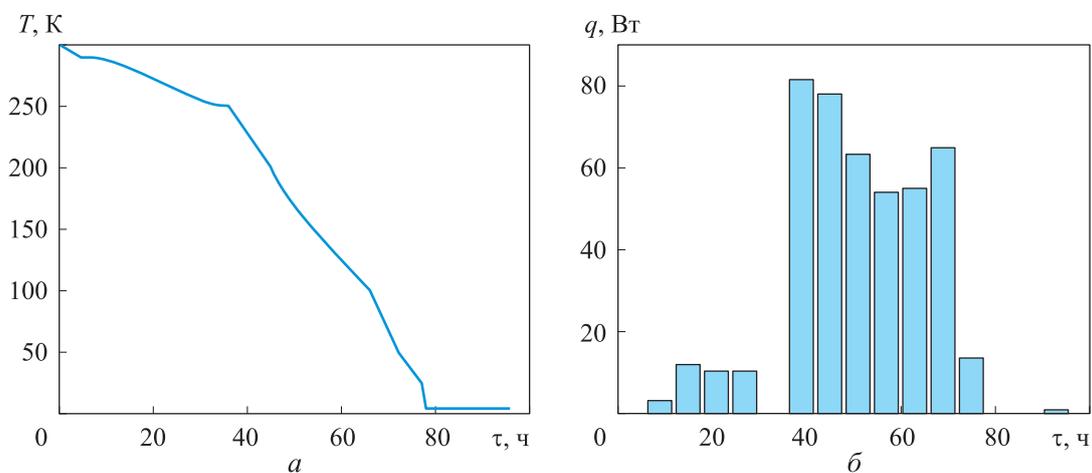


Рис. 5. Расчетные зависимости температуры  $T$  (а) и холодопроизводительности  $q$  (б) ГС от времени  $\tau$

турные «полки» обусловлены приравнением температур на концах каждого временного блока. Количество временных блоков — 16.

Полученные при расчете зависимости холодопроизводительности  $q$  АС и ГС от времени  $\tau$  приведены на рис. 4, а и б.

На основании результатов исследования можно оценить требуемую холодопроизводительность закупаемого оборудования при выходе на стационарный рабочий режим за заданный временной промежуток. Однако для решения задачи такого типа необходимо знать динамику захлаживания ступеней, а для более точного определения холодопроизводительности одной из ступеней надо точно знать холодопроизводительность другой.

Предполагаем, что холодопроизводительность АС известна и требуется найти производительность ГС. Тогда постановка прямой задачи лучисто-кондуктивного теплообмена сводится к одному дифференциальному урав-

нению для ГС, а варьируемым является всего один параметр. Полученные результаты решения задачи оптимизации в виде расчетных зависимостей температуры  $T$  и холодопроизводительности  $q$  ГС от времени  $\tau$  приведены на рис. 5, а и б.

Далее решали аналогичную задачу, где варьируемым параметром сначала была холодопроизводительность ГС, а затем — АС.

## Выводы

1. Разработан метод оценки холодопроизводительности многоступенчатого криостата на основе решения обратной параметрической задачи идентификации методом итерационной регуляризации.

2. Определена теоретическая холодопроизводительность АС и ГС криостата при расчетном времени захлаживания, равном четырем суткам.

## Литература

- [1] Залетаев В.М., Капинос Ю.В., Сургучев О.В. *Расчет теплообмена космического аппарата*. Москва, Машиностроение, 1979. 208 с.
- [2] Крейн С.Г., Прозоровская О.И. Аналитические полугруппы и некорректные задачи для эволюционных уравнений. *Доклады Академии наук СССР*, 1960, т. 133, № 2, с. 277–280.
- [3] Басистов Ю.А., Яновский Ю.Г. Некорректные задачи в механике (реологии) вязкоупругих сред и их регуляризация. *Механика композиционных материалов и конструкций*, 2010, т. 16, № 1, с. 117–143.
- [4] Бакушинский А.Б., Кокурин М.Ю., Кокурин М.М. Прямые и обратные теоремы для итерационных методов решения нерегулярных операторных уравнений и разностных методов решения некорректных задач Коши. *Журнал вычислительной математики и математической физики*, 2020, т. 60, № 6, с. 939–962, doi: <https://doi.org/10.31857/S0044466920060022>
- [5] Фанов В.В., Мартынов М.Б., Карчаев Х.Ж. Летательные аппараты НПО имени С.А. Лавочкина (к 80-летию предприятия). *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2017, № 2, с. 5–16.
- [6] Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. *Теплообмен излучением*. Москва, Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
- [7] Тулин Д.В., Финченко В.С. Теоретико-экспериментальные методы проектирования систем обеспечения теплового режима космических аппаратов. В: *Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований*. Т. 3. Москва, МАИ-Принт, 2014, с. 1320–1437.
- [8] Цаплин С.В., Большев С.А., Романов А.Е. *Теплообмен в космосе*. Самара, Самарский университет, 2013. 90 с.
- [9] Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. *Экстремальные методы решения некорректных задач*. Москва, Наука, 1988. 285 с.
- [10] Алифанов О.М. *Обратные задачи теплообмена*. Москва, Машиностроение, 1988. 280 с.
- [11] Формалев В.Ф. *Теплоперенос в анизотропных твердых телах*. Москва, Физматлит, 2015. 274 с.
- [12] Васин В.В. Модифицированный метод наискорейшего спуска для нелинейных регулярных операторных уравнений. *Доклады Академии наук*, 2015, т. 462, № 3, с. 264–267, doi: <https://doi.org/10.7868/S0869565215150086>
- [13] Голичев И.И. Модифицированный градиентный метод наискорейшего спуска решения нелениаризованной задачи для нестационарных уравнений Навье-Стокса. *Уфимский математический журнал*, 2013, т. 5, № 4, с. 60–76, doi: <http://dx.doi.org/10.13108/2013-5-4-58>
- [14] Формалев В.Ф., Ревизников Д.Л. *Численные методы*. Москва, Физматлит, 2004. 400 с.
- [15] Формалев В.Ф. Анализ двумерных температурных полей в анизотропных телах с учетом подвижных границ и большой степени анизотропии. *Теплофизика высоких температур*, 1990, т. 28, № 4, с. 715–721.
- [16] Формалев В.Ф. Идентификация двумерных тепловых потоков в анизотропных телах сложной формы. *Инженерно-физический журнал*, 1989, т. 56, № 3, с. 382–386.
- [17] Формалев В.Ф., Колесник С.А. Аналитическое решение второй начально-краевой задачи анизотропной теплопроводности. *Математическое моделирование*, 2001, т. 13, № 7, с. 21–25.

## References

- [1] Zaletaev V.M., Kapinos Yu.V., Surguchev O.V. *Raschet teploobmena kosmicheskogo apparata* [Spacecraft heat transfer calculation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 208 p. (In Russ.).
- [2] Kreyn S.G., Prozorovskaya O.I. Analytic semigroups and incorrect problems for evolutionary equations. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1960 vol. 133, no. 2, pp. 277–280. (In Russ.).

- [3] Basistov Yu.A., Yanovskiy Yu.G. Ill-posed problems of mechanics (rheology) of viscoelastic media and their regularization. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy* [Mechanics of Composite Materials and Structures], 2010 vol. 16, no. 1, pp. 117–143. (In Russ.).
- [4] Bakushinskiy A.B., Kokurin M.Yu., Kokurin M.M. Direct and converse theorems for iterative methods of solving irregular operator equations and finite difference methods for solving ill-posed cauchy problems. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki*, 2020 vol. 60, no. 6, pp. 939–962, doi: <https://doi.org/10.31857/S0044466920060022> (in Russ.). (Eng. version: *Comput. Math. and Math. Phys.*, 2020, vol. 60, no. 6, pp. 915–937, doi: <https://doi.org/10.1134/S0965542520060020>)
- [5] Fanov V.V., Martynov M.B., Karchaev Kh.Zh. Flightborne vehicles by Lavochkin association (to the eightieth anniversary of Lavochkin association). *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2017, no. 2, pp. 5–16. (In Russ.).
- [6] Blokh A.G., Zhuravlev Yu.A., Ryzhkov L.N. *Teploobmen izlucheniem* [Heat exchange by radiation]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 432 p. (In Russ.).
- [7] Tulin D.V., Finchenko V.S. Teoretiko-eksperimentalnye metody proektirovaniya sistem obespecheniya teplovogo rezhima kosmicheskikh apparatov [Theoretical and experimental methods of design of systems for providing thermal mode of spacecrafts]. V: *Proektirovanie avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov dlya fundamentalnykh nauchnykh issledovaniy*. T. 3 [In: Designing of automatic spacecraft for fundamental scientific research. Vol. 3]. Moscow, MAI-Print, 2014, pp. 1320–1437. (In Russ.).
- [8] Tsaplin S.V., Bolychev S.A., Romanov A.E. *Teploobmen v kosmose* [Heat transfer in space]. Samara, Samarskiy universitet Publ., 2013. 90 p. (In Russ.).
- [9] Alifanov O.M., Artyukhin E.A., Rumyantsev S.V. *Ekstremalnye metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Extreme methods for solving incorrect problems]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 285 p. (In Russ.).
- [10] Alifanov O.M. *Obratnye zadachi teploobmena* [Inverse problems of heat transfer]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 280 p. (In Russ.).
- [11] Formalev V.F. *Teploperenos v anizotropnykh tverdykh telakh* [Heat transfer in anisotropic solids]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2015. 274 p. (In Russ.).
- [12] Vasin V.V. Modified steepest descent method for nonlinear irregular operator equations. *Doklady Akademii nauk*, 2015 vol. 462, no. 3, pp. 264–267, doi: <https://doi.org/10.7868/S0869565215150086> (in Russ.). (Eng. version: *Dokl. Math.*, 2015, vol. 91, no. 3, pp. 300–303, doi: <https://doi.org/10.1134/S1064562415030187>)
- [13] Golichev I.I. Modified gradient fastest descent method for solving linearized non-stationary Navier-Stokes equations. *Ufimskiy matematicheskiy zhurnal* [Ufa Mathematical Journal], 2013 vol. 5, no. 4, pp. 60–76, doi: <http://dx.doi.org/10.13108/2013-5-4-58> (in Russ.).
- [14] Formalev V.F., Reviznikov D.L. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 400 p. (In Russ.).
- [15] Formalev V.F. Analysis of two-dimensional temperature fields in anisotropic bodies with allowance for moving boundaries and a high degree of anisotropy. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 1990 vol. 28, no. 4, pp. 715–721. (In Russ.). (Eng. version: *High Temp.*, 1990, vol. 28, no. 4, pp. 535–541.)
- [16] Formalev V.F. Identification of two-dimensional heat fluxes in anisotropic complex shape bodies. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 1989 vol. 56, no. 3, pp. 382–386. (In Russ.).
- [17] Formalev V.F., Kolesnik S.A. Analiticheskoe reshenie vtoroy nachalno-kraevoy zadachi anizotropnoy teploprovodnosti. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2001 vol. 13, no. 7, pp. 21–25. (In Russ.).

## Информация об авторе

**БОРЩЕВ Никита Олегович** — кандидат технических наук, ведущий инженер. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Москва, Российская Федерация, ул. Ижорская, д. 13, e-mail: [www.moriarty93@mail.ru](mailto:www.moriarty93@mail.ru)).

## Information about the author

**BORSHCHEV Nikita Olegovich** — Candidate of Science (Eng.), Leading Engineer. Federal State Budgetary Scientific Institution Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (125412, Moscow, Russian Federation, Izhorskaya St., Bldg. 13, e-mail: [www.moriarty93@mail.ru](mailto:www.moriarty93@mail.ru)).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Борщев Н.О. Параметрическая идентификация холодопроизводительности азотной и гелиевой ступеней двухступенчатого криостата. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 5, с. 100–107.

### Please cite this article in English as:

Borshchev N.O. Cooling capacity parametric identification of the two-stage cryostat nitrogen and helium stages. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 5, pp. 100–107.



## Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие «Навигационные акселерометры»

Автор **С.Ф. Коновалов**

Изложена теория навигационных акселерометров. Представлены конструктивные схемы акселерометров прямого преобразования и компенсационного типа, включая микромеханические приборы. Исследованы погрешности акселерометров, связанные с несовершенством их электромеханических узлов и электронных блоков.

Рассмотрены стенды и методики, используемые при испытаниях навигационных акселерометров. В приложении подробно описаны конструкция компенсационного акселерометра с кремниевым маятником (типа Si-flex), конструкция и особенности применения технологической оснастки для сборки прибора. В дополнительных материалах, размещенных на сайте кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана, приведены: патент на акселерометр Si-flex (КА-400М, КА-800); комплект чертежей акселерометра; комплект чертежей технологической сборочной оснастки.

Для студентов специальностей, связанных с системами навигации и управления движением, также может представлять интерес для инженеров и научных работников, занимающихся проектированием и исследованием прецизионных электромеханических приборов.

### По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
[press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru); <https://press.bmstu.ru>