

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ЗАХОЛАЖИВАНИЯ АЗОТНО-ГЕЛИЕВОГО КРИОСТАТА

**Н. О. Борщев**

Астрокосмический центр Учреждения Российской академии наук  
Физического института имени П. Н. Лебедева, Москва, Россия  
moriarty93@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассмотрены режимы работы созданной виртуальной двумерной конечно-элементной модели двухступенчатого азотно-гелиевого криостата, в обеспечении теоретической оценки теплового режима изделий, функционирующих в условиях воздействия факторов космического пространства, т.е. в условиях высокого вакуума и температурного уровня жидкого гелия в 4 К. *Материалы и методы.* По разработанной теплофизической модели проведена серия тестовых тепло-вакуумных расчетов для режима охлаждения при задании граничных условий в виде температур на медных тепловых мостах, а также для условий естественного охлаждения при выключенной криогенной машине. *Результаты и выводы.* Произведена валидация разработанной модели с экспериментальными данными в обеспечении оценки адекватности построенной модели.

**Ключевые слова:** тепловакуумная отработка, азотно-гелиевый криостат, орбитальный участок полета

**Для цитирования:** Борщев Н. О. Теоретическая оценка времени захлаживания азотно-гелиевого криостата // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 133–141. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-16

## THEORETICAL ESTIMATION OF THE COOLING TIME OF A NITROGEN-HELIUM CRYOSTAT

**N.O. Borshchev**

Astro Space Center Institutions of the Russian Academy  
of Sciences P.N. Lebedev Institute of Physics, Moscow, Russia  
moriarty93@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The modes of operation of the created virtual two-dimensional finite element model of a two-stage nitrogen-helium cryostat are considered in order to provide a theoretical assessment of the thermal regime of products operating under the influence of space factors, that is, in conditions of high vacuum and a temperature level of liquid helium in 4 K. *Materials and methods.* According to the developed thermophysical model, a series of test heat-vacuum calculations were carried out for the cooling mode when boundary conditions were set in the form of temperatures on copper thermal bridges, as well as for natural cooling conditions with the cryogenic machine turned off. *Results and conclusions.* The validation of the developed model with experimental data was carried out to ensure the assessment of the adequacy of the constructed model.

**Keywords:** thermal vacuum testing, nitrogen-helium cryostat, orbital flight section

**For citation:** Borshchev N.O. Theoretical estimation of the cooling time of a nitrogen-helium cryostat. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(1):133–141. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-16

### Введение

При проектировании теплового режима изделий ракетно-космической техники идет параллельная их теоретическая и экспериментальная отработка. Изделия, функционирующие на орбитальном участке полета, подвергаются низкотемпературному воздействию в районе 4 К. Для экспериментальной тепловой отработки таких конструкций обычно применяются тепловакуумные камеры или криостаты, работающие на адиабатических циклах сжатия-расширения [1–4]. Таким образом, цель данной работы – составление виртуальной конечно-элементной модели двухступенчатого прироста для оценки его времени выхода на стационарный режим.

Модель двухступенчатого криостата состоит из двумерных конечно-элементных прямоугольных примитивов, описывающих его искомый вид. На рис. 1 приведена в сечении построенная конечно-элементная модель двухступенчатого криостата. Тепловая физико-математическая модель НСК состоит из двумерных конечно-элементных примитивов, описывающих искомую геометрию конструкции.

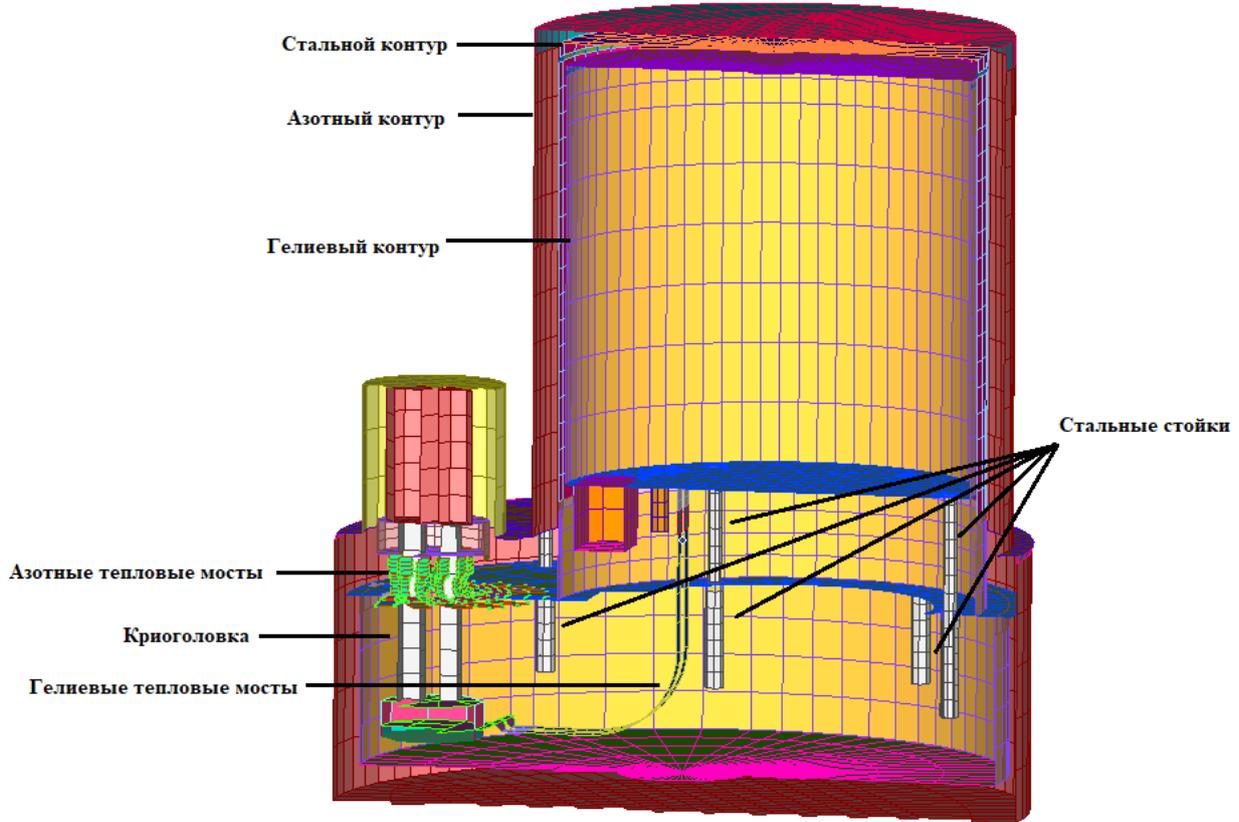


Рис. 1. Тепловая физико-математическая модель НСК

### Нестационарный режим захлаживания двухступенчатого криостата

Постановка задачи по захлаживанию криостата заключается в определении времени выхода на стационарный режим, при задании начальных условий в виде 300 К, граничных условий, взятых из эксперимента и задаваемых в виде температур в тех же местах, что и в стационарном расчете. Математическая постановка задачи для расчета времени выхода на стационарный режим двухступенчатого криостата без учета одномерных конечных элементов имеет вид

$$C_{\text{эф}}(T_i)\rho V_i \frac{\partial T_i(\tau)}{\partial \tau} = -\frac{\lambda \left( \frac{T_i(\tau) + T_{i+1}(\tau)}{2} \right)}{\delta} (T_i(\tau) - T_{i+1}(\tau)) F_i^{\text{cond}} + Q_i^{\text{pec}}(\tau), T_i(0) = 300 \text{ K},$$

где  $C_{\text{эф}}(T_i)$  – эффективная удельная теплоемкость материала, Дж/кгК;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $V_i$  – объем изотерического узла, м<sup>3</sup>;  $T_i(\tau)$  – температура, К;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/мК;  $\delta$  – расстояние между двумя изотерическими узлами, м;  $Q_i^{\text{pec}}$  – результирующий тепловой поток, Вт.

На рис. 2, 3 показаны места задания граничных условий в виде температур на азотных и гелиевых криомостах.

Одновременно с той постановкой задачи произведена оценка влияния неучтенных элементов конструкции в конечно-элементной модели. Решено учитывать эти элементы в виде прироста массы. Для этого идет их учет с помощью задания одномерных конечных элементов, для которых необходимо определить площадь поперечного сечения в обеспечении соответствия инерционности конструкции и модели.



Рис. 2. Азотные криомосты, где задавалась постоянная температура в виде 81 К

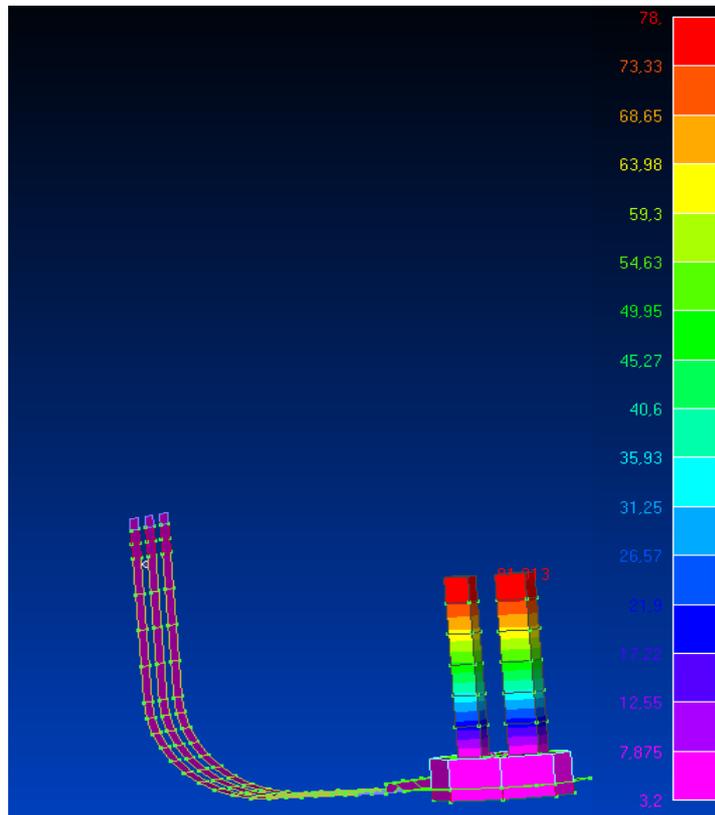


Рис. 3. Гелиевые криомосты, где задавалась постоянная температура захлаживания гелиевого контура в виде 3,2 К

Расчет производился по зависимости:

$$F_{area} = \frac{m_{el}}{\rho_{el} L_{el}},$$

где  $m_{el}$  – масса всех однородных элементов (с одинаковой плотностью), кг;  $\rho_{el}$  – плотность элементов,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;  $L_{el}$  – длина 1-d элемента, задаваемая в конечно-элементной модели, м.

Результаты расчета площадей поперечных сечений для 1-d элементов представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Группа элементов в Femap	Прирост массы, кг	$F_{area}, M^2$
1. He_golovka	0,2	$4,24e^{-4}$
2. He_base_plate	1,03	$5,3e^{-4}$
3. top_shaiba	0,06	$1,15e^{-4}$
4. N2_thermal_bridges	0,73	$1,83e^{-5}$
5. He_thermal_bridges	0,22	$2,5e^{-4}$
6. N2_bottom	1	$8e^{-5}$

Таблица 2

Группа элементов в Femap	Прирост массы, кг	$F_{area}, M^2$
1. He_kolpak	0,22	$1e^{-4}$
2. N2_bottom	0,41	$1,64e^{-4}$

В табл. 3 представлены процентные соотношения двумерных и одномерных конечных элементов в модели.

Таблица 3

Группа конструкции	CAD	Femap model	
	M,кг	structural	non-structural(rod)
He-level	31,00	Plate-92,74 %	Steel-7,25 %
			Cuprum-0,007 %
N2-level	69,19	Plate-99,96 %	Steel-0,025 %
			Cuprum-0,006 %

Математическая постановка задачи для расчета времени выхода на стационарный режим двухступенчатого криостата с учетом одномерных конечных элементов имеет соответственно вид [4–7]:

$$C_{\text{эф}}(T_i)[\rho V_i + m_{el}] \frac{\partial T_i(\tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda \left( \frac{T_i(\tau) + T_{i+1}(\tau)}{2} \right)}{\delta} (T_i(\tau) - T_{i+1}(\tau)) F_i^{cond} + Q_i^{pec}(\tau) - Q_i^{изл}(\tau), T_i(0) = T_0.$$

Эффективная теплоемкость высчитывается из соотношения масс рассматриваемых изотермических узлов:

$$C_{\text{эф}}(T_i) = \frac{C_i(T_i)\rho V_i + C_{el}(T_i)m_{el}}{\rho V_i + m_{el}}.$$

Выражение для излучаемого теплового потока с  $i$ -го элемента имеет вид

$$Q_i^{изл} = \varepsilon_i(T_i(\tau))\sigma T_i(\tau)^4 F_i^{rad}.$$

Выражение для результирующего теплового потока имеет вид

$$Q_i^{pec}(\tau) = \sum_j^N \varphi_{ij} \varepsilon_j(T_j(\tau))\sigma T_j(\tau)^4 F_i^{rad} + \varphi_{ji}(1 - \varepsilon_j(T_j(\tau)))Q_i^{изл},$$

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала,  $\frac{Вт}{мК}$ ;  $\varphi_{ij}$  – угловой коэффициент переотражения между конечно-элементными поверхностями;  $\varepsilon_j$  – степень черноты материала;  $\sigma = 5,68 \cdot 10^{-8}$  – по-

постоянная Стефана – Больцмана;  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}^4}$ ;  $F_i^{rad}$  – площадь радиационного теплообмена конечно-элементной поверхности,  $\text{м}^2$ ;  $F_i^{cond}$  – площадь контакта двух конечно-элементных примитивов,  $\text{м}^2$  [8].

В расчете были использованы среднеинтегральные значения теплофизических характеристик, взятыми из работы [4] по формуле

$$p = \frac{1}{|T_2 - T_1|} \int_{T_1}^{T_2} p(T) dT,$$

$p$  – в данной зависимости это поочередно подставляемые графические зависимости для коэффициента теплопроводности, степени черноты, удельной теплоемкости.

Результаты полученных среднеинтегральных характеристик материалов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Свойства	Материал		
	Сталь марки «12Х18НТ10»	Алюминий марки «АМГ-6»	Медь марки «М-1»
Теплопроводность, $\frac{\text{Вт}}{\text{МК}}$	11	40	800
Степень черноты	0,07	0,015	0,022
Удельная теплоемкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	400	200	200
Плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	7850	2700	8800

На рис. 4, 5 показаны температурные перепады по поверхностям азотной плиты и гелиевого колпака, где установлены датчики температур.

На рис. 6 показаны теоретические температуры в местах установки датчиков температур с одномерными конечными элементами и без них при задании теплофизических свойств, представленных в табл. 1. Шаг интегрирования при решении системы уравнений тепловых балансов равен 10 с.

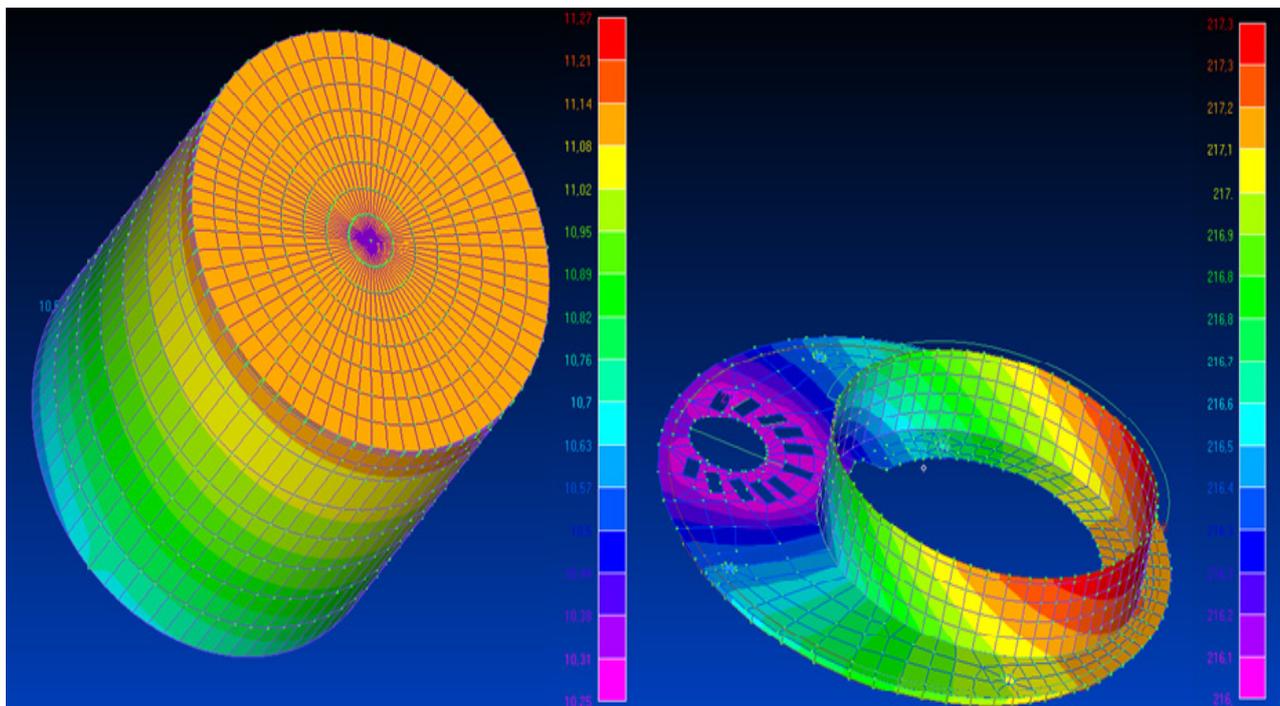


Рис. 4. Температурный перепад по азотной плите и гелиевому колпаку в момент времени 15 ч (места установки датчика температур показаны звездочкой)

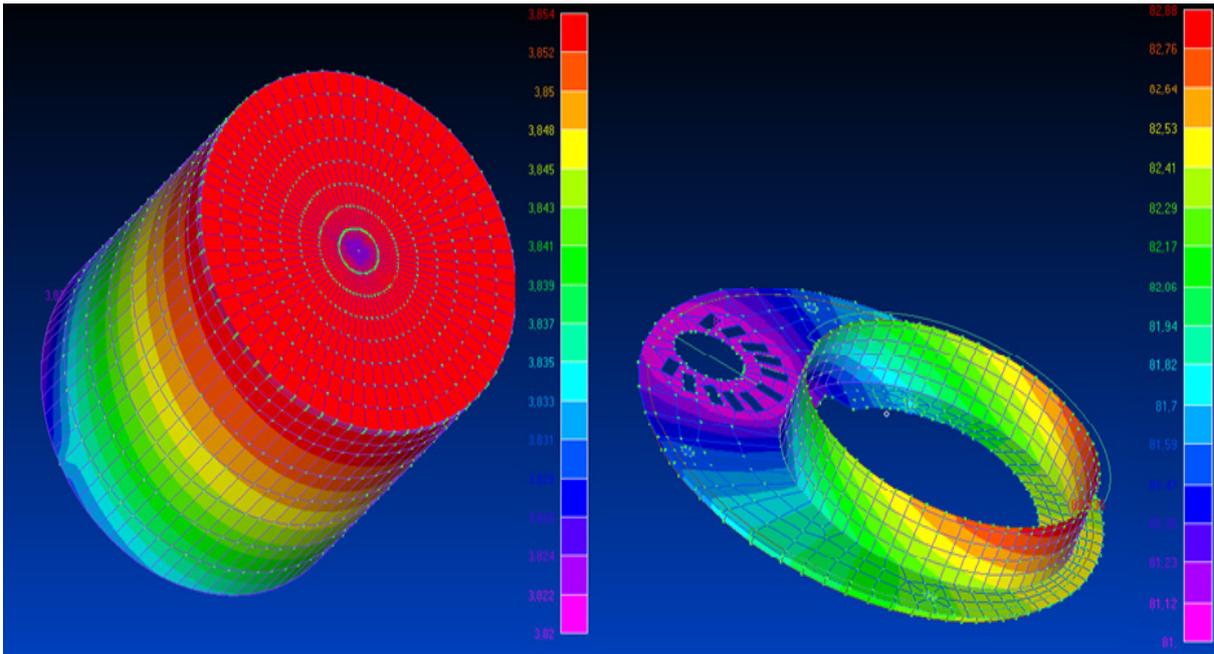


Рис. 5. Температурный перепад по азотной плите и гелиевому колпаку в момент времени 30 ч (места установки датчика температур показаны звездочкой)

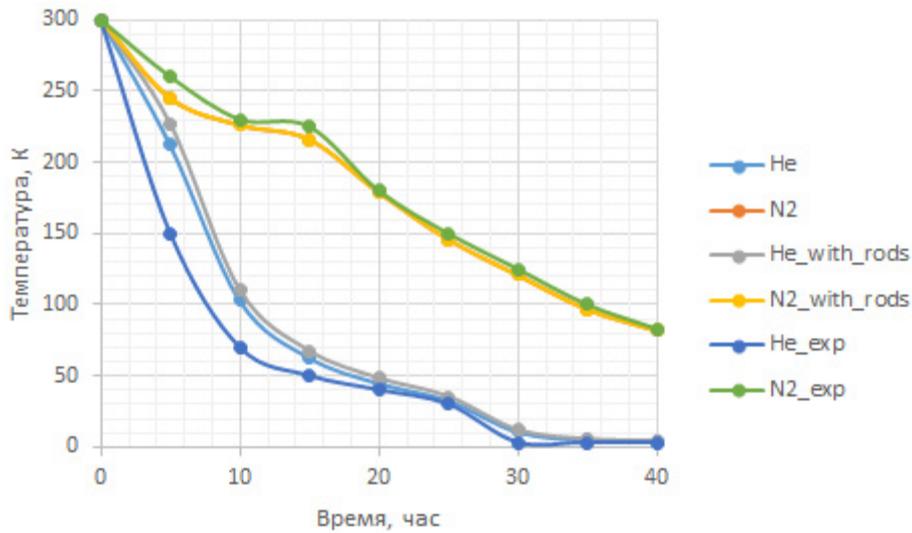


Рис. 6. Теоретические и экспериментальные кривые захлаживания азотно-гелиевого криостата в местах установки датчиков температур

Результаты по оценке выхода на стационарный режим показали, что выход на режим ожидается к 35 ч и совпадает с экспериментальными кривыми в месте установки датчиков температур [9].

### Нестационарный режим нагревания двухступенчатого криостата

В качестве поверочного расчета решено было также оценить динамику естественного нагрева конструкции для последующего сравнения с экспериментом. Постановка задачи по естественному нагреву модели криостата заключается в определении времени выхода температур ступеней криостата на температуру окружающей среды. Математическая постановка задачи теплообмена выглядит следующим образом:

– для первой ступени:

$$\frac{\partial T_{Al}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{[\epsilon_{st}(T_{st})T_{st}^4 - \epsilon_{Al}(T_{Al})T_{Al}^4]}{C(T_{Cu})\rho}; T_{Al}(0) = 84 \text{ K};$$

– для второй ступени:

$$\frac{\partial T_{Cu}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{\left[ \epsilon_{Al}(T_{Al})T_{Al}^4 - \frac{\lambda_{Cu}}{l}(T_{Cu} - T_{load})\frac{F_l}{F_{He}} - \epsilon_{Cu}(T_{Cu})T_{Cu}^4 \right]}{C(T_{Cu})\rho_{Cu}}; T_{Cu}(0) = 3,4 \text{ К.}$$

На рис. 7, 8 представлено распределение температур по поверхностям выбранных элементов конструкции в местах, где расположены датчики температур.

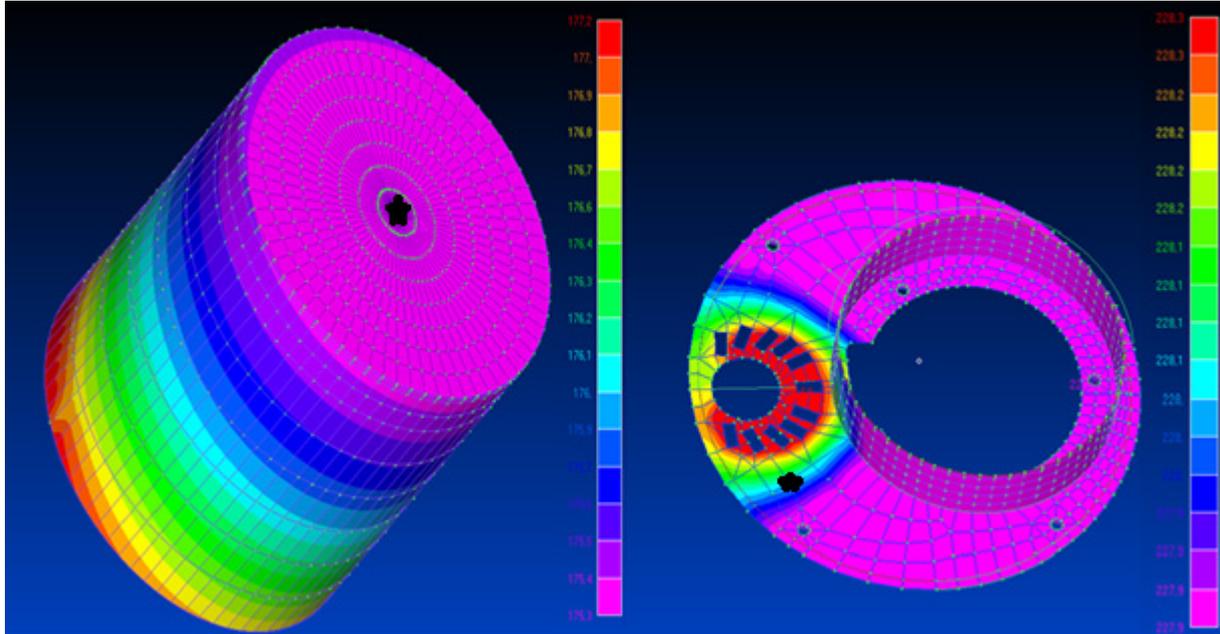


Рис. 7. Температурный перепад по азотной плите и гелиевому колпаку в момент времени 10 ч (места установки датчика температур показаны звездочкой)

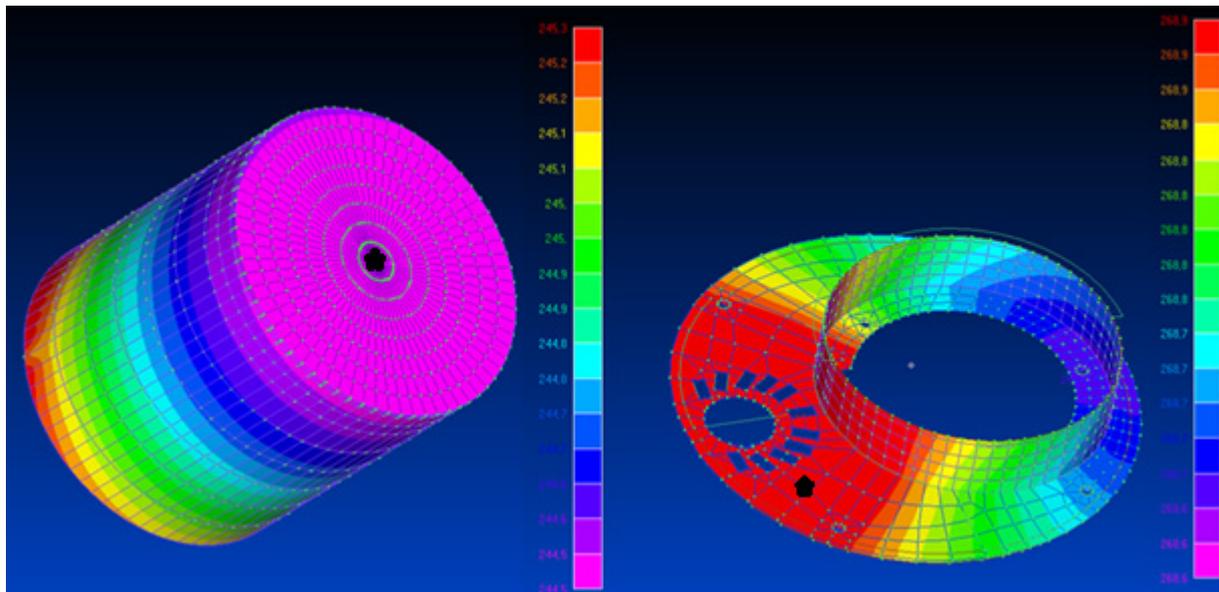


Рис. 8. Температурный перепад по азотной плите и гелиевому колпаку в момент времени 18 ч (места установки датчика температур показаны звездочкой)

Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических кривых захлаживания криостата для 1-й и 2-й ступеней представлен на рис. 9.

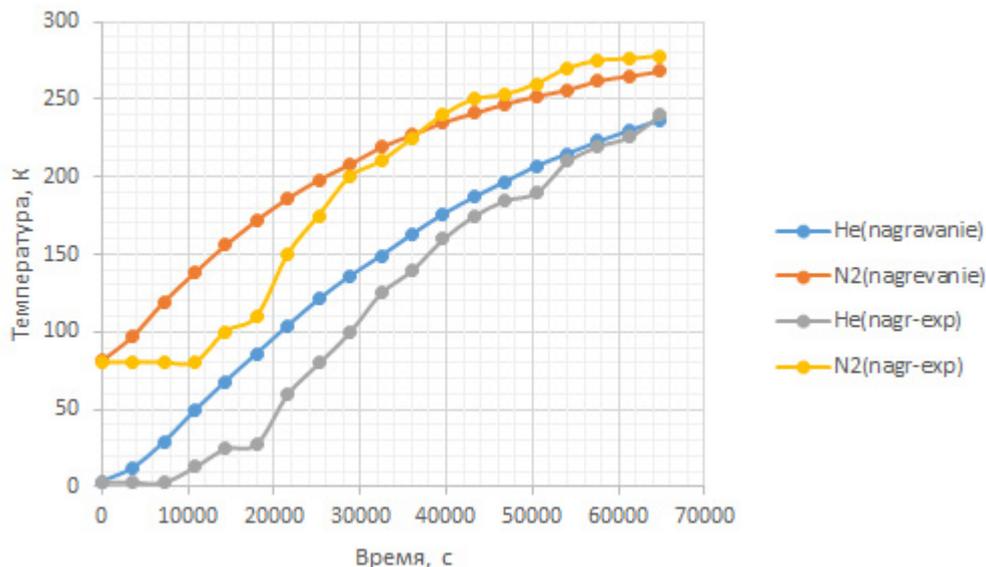


Рис. 9. Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических кривых захлаживания криостата для 1-й и 2-й ступеней

### Заключение

1. Результаты по оценке времени захлаживания двухступенчатого криостата показали, что выход на стационарный режим ожидается к 35 ч.
2. Результаты по оценке времени естественного нагрева двухступенчатого криостата показали, что динамика нагрева сходится с экспериментальными значениями.
3. Данная виртуальная модель двухступенчатого криостата может быть использована для предварительной оценки теплового режима моделей испытуемых изделий при их импорте в программный пакет.

### Список литературы

1. Залетаев В. М., Капинос Ю. В., Сургучев О. В. Расчет теплообмена космического аппарата. М. : Машиностроение, 1979.
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.
5. Фанов В. В., Мартынов М. Б., Карчаев Х. Ж. Летательные аппараты НПО им. 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. М. : Энергоатомиздат, 1991.
7. Тулин Д. В., Финченко В. С. Теоретико-экспериментальные методы проектирования систем обеспечения теплового режима космических аппаратов. М. : МАИ-ПРИНТ, 2014. Т. 3. С. 1320–1437.
8. Борщев Н. О. Параметрическая идентификация падающего теплового потока как функция от времени и координаты методом итерационной регуляризации // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 15–23.
9. Демидов Д. Е., Будылдина Н. В. Повышение времени жизни беспроводных сенсорных сетей с использованием нечеткой логики // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 3. С. 50–58.

### References

1. Zaletaev V.M., Kapinos Yu.V., Surguchev O.V. *Raschet teploobmena kosmicheskogo apparata = Calculation of spacecraft heat transfer*. Moscow: Mashinostroenie, 1979. (In Russ.)
2. Kreyn S.G., Prozorovskaya O.I. Analytical semigroups and ill-posed problems for evolutionary equations. *Doklady Akademii nauk SSSR = Reports of the Academy of Sciences of the USSR*. 1960;133(2):277–280. (In Russ.)

3. Basistov Yu.A., Yanovskiy Yu.G. Incorrect problems in mechanics (rheology) of viscoelastic media and their regularization. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy = Mechanics of composite materials and structures*. 2010;16(1):117–143. (In Russ.)
4. Bakushinskiy A.B., Kokurin M.Yu., Kokurin M.M. Direct and inverse theorems for iterative methods for solving irregular operator equations and difference methods for solving ill-posed Cauchy problems. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki = Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2020;60(6):939–962. (In Russ.)
5. Fanov V.V., Martynov M.B., Karchaev Kh.Zh. Aircraft of S. A. Lavochkin NPO (to the 80th anniversary of the enterprise). *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina = Bulletin of S. A. Lavochkin NGO*. 2017;(2):5–16. (In Russ.)
6. Blokh A.G., Zhuravlev Yu.A., Ryzhkov L.N. *Teploobmen izlucheniem = Heat exchange by radiation*. Moscow: Energoatomizdat, 1991. (In Russ.)
7. Tulin D.V., Finchenko V.S. *Teoretiko-eksperimental'nye metody proektirovaniya sistem obespecheniya teplovogo rezhima kosmicheskikh apparatov = Theoretical and experimental methods of designing systems to ensure the thermal regime of spacecraft*. Moscow: MAI-PRINT, 2014;3:1320–1437. (In Russ.)
8. Borshchev N.O. Parametric identification of incident heat flow as a function of time and coordinates by iterative regularization method. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality complex systems*. 2022;(4):15–23. (In Russ.)
9. Demidov D.E., Budyldina N.V. Increasing the lifetime of wireless sensor networks using fuzzy logic. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(3):50–58. (In Russ.)

#### Информация об авторах / Information about the authors

##### **Никита Олегович Борщев**

кандидат технических наук, ведущий инженер,  
Астрокосмический центр  
Учреждения Российской академии наук  
Физического института имени П. Н. Лебедева  
(Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 53)  
E-mail: moriarty93@mail.ru

##### **Nikita O. Borshchev**

Candidate of technical sciences, leading engineer,  
Astro Space Center Institutions of the Russian Academy  
of Sciences P.N. Lebedev Institute of Physics  
(53 Leninsky avenue, Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 17.12.2022**

**Поступила после рецензирования / Revised 20.01.2023**

**Принята к публикации / Accepted 10.02.2023**