



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-325-337

УДК 629.7: 536.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ГИБКИХ ПРОВОДНИКАХ ГАЛОГЕННЫХ ЛАМП СТЕНДА ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Р.С. Балджиев, А.А. Алексеев, П. В. Просунцов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)
2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, Москва, Россия, 105005

Работа посвящена оценке возможности применения серийно выпускаемых галогенных ламп накаливания в стендах радиационного нагрева большой мощности с активным охлаждением колб. Проведено комплексное моделирование электрических и тепловых процессов, возникающих при различных (стандартном, форсированном и чрезвычайном) режимах работы стенда. Получены значения температуры в отдельных элементах системы питания ламп. Предложен рациональный, с точки зрения безопасности и обеспечения длительной бесперебойной работы, вариант конструкции стенда, предусматривающий охлаждение гибких проводов и шин потоком воздуха.

Ключевые слова: стенд радиационного нагрева, тепловые испытания, галогенные лампы накаливания

В настоящее время в связи с развитием аэрокосмической техники и появлением новых проектов многоразовых космических аппаратов и ракет-носителей возникает необходимость в создании современного поколения стендов тепловых испытаний, сочетающих в себе возможность достижения высоких рабочих температур при относительной простоте конструкции и низкой стоимости эксплуатации.

Наибольшее распространение при проведении тепловых испытаний получили стенды радиационного нагрева на базе галогенных ламп накаливания (ГЛН) [1; 2], которые отличаются сравнительно невысокой стоимостью, простотой регулирования, широким ассортиментом размеров и мощностей источников нагрева.

ГЛН по исполнению и принципу действия аналогичны другим типам ламп накаливания, за тем исключением, что в газе-наполнителе содержатся небольшие добавки галогенов (фтор, бром, хлор, йод) или их соединений, препятствующие осаждению паров вольфрама на стенках колбы, что повышает срок службы ламп и препятствует уменьшению светового потока от вольфрамовой спирали. В процессе работы ГЛН возникает повторяющийся цикл (называемый вольфрам-галогенным), включающий в себя захват паров вольфрама галогенами вдали от спирали и распад их соединения с возвращением вольфрама на спираль. Однако функционирование вольфрам-галогенного цикла возможно только в ограничен-

ном температурном диапазоне колб ламп (от 523 до 1270 К) [1]. Нарушение вольфрам-галогенного цикла приводит к осаждению атомов вольфрама на колбе лампы, потере ее прозрачности и быстрому выходу лампы из строя.

В связи с этим традиционные стенды радиационного нагрева на базе ГЛН ограничены максимальным уровнем рабочих температур объекта испытаний не более 1500 К. В то же время для отработки современных термостойких материалов и элементов конструкций требуются стенды с рабочими температурами более 2000 К [2; 3]. Такой уровень температур может быть достигнут при создании нового поколения стендов на базе ГЛН благодаря рациональному выбору размера, мощности и расположения источников нагрева и организации их эффективного активного охлаждения. Теоретическая возможность создания подобного стенда тепловых испытаний обсуждалась в работе [4]. Конструктивно-компоновочная схема стенда приведена на рисунке 1 (стрелками обозначены направления потоков газа).

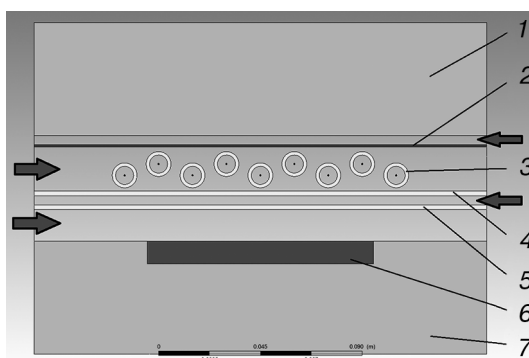


Рис. 1. Конструктивно-компоновочная схема рабочей зоны стенда с активным охлаждением ГЛН: 1, 7 — верхний и нижний блоки теплоизоляции; 2 — стальной экран; 3 — ГЛН; 4, 5 — верхнее и нижнее разделительные стекла; 6 — объект испытания

[Fig. 1. Design scheme of the working area of the facility with active cooling of halogen lamps: 1, 7 — upper and bottom heat insulations; 2 — steel screen; 3 — halogen lamps; 4, 5 — upper and bottom separating glass panels; 6 — test specimen]

Разработка стенда требует решения целого ряда сложных научных и инженерных задач, одна из которых связана с оценкой возможности безопасного применения представленных на рынке серийно выпускаемых ГЛН.

Для использования в стенде была выбрана лампа КГ 220-2000-5 (рис. 2), состоящая из следующих конструктивных элементов: клемм (1), медных проводников с трубками из кремнийорганической резины (2), вольфрамовой проволоки (3), переходящей в вольфрамовую спираль (4), соединительных пластин (5), керамических цоколей (6), стеклянной колбы (7). Основные параметры лампы указаны в таблице 1 [5].

Питание ГЛН осуществляется путем подачи напряжения на медные шины (рис. 3). Гибкие провода данной лампы изолированы трубками из кремнийорганической резины с диапазоном рабочих температур от -60 до 180 °С [5]. Для под-

тверждения работоспособности стенда необходимо получить оценку возможных рабочих температур элементов системы питания ГЛН. Для этого следует провести совместное моделирование комплекса электрических и тепловых процессов, возникающих при работе стенда, а именно процесса прохождения электрического тока, сопровождающегося выделением Джоулева тепла и его распространением по твердым телам посредством теплопроводности, а также процессов конвективного и радиационного отвода тепла [6]. Задача усложняется тем, что все эти процессы взаимосвязаны и протекают одновременно.

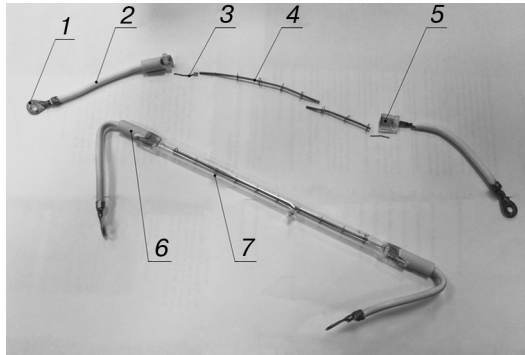


Рис. 2. Галогенная лампа КГ-220-2000-5: 1 — клемма; 2 — медный провод с изоляцией; 3 — вольфрамовая проволока; 4 — тело накала (вольфрамовая спираль); 5 — соединительная пластина; 6 — керамический цоколь; 7 — стеклянная колба

[Fig. 2. Halogen lamp KG-220-2000-5: 1 — clamp; 2 — copper wire with isolation; 3 — tungsten wire; 4 — heating coil (tungsten spiral); 5 — coupling plate; 6 — ceramic lamp base; 7 — glass bulb]

Таблица 1

Основные характеристики галогенной лампы

Обозначение лампы	Напряжение, В	Мощность, Вт	Размеры, мм		Тип цоколя
			Длина, включая цоколи, мм	Диаметр колбы, мм	
КГ 220-2000-5	220	2000	262	11	K10s/25

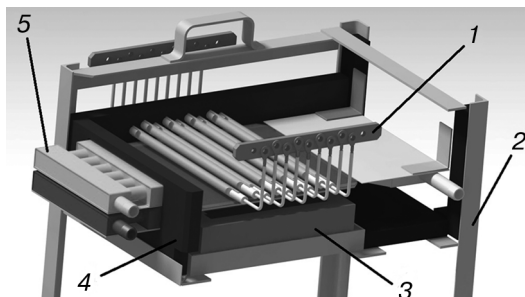


Рис. 3. Система питания ГЛН стенда: 1 — медная шина питания ГЛН; 2 — металлическая рама; 3 — объект испытаний; 4 — тепловая изоляция рабочей зоны; 5 — система подачи газа

[Fig. 3. Facility feed system: 1 — power supply copper bus line for halogen lamps; 2 — metal frame; 3 — test specimen; 4 — heat isolation of working area; 5 — gas feed system]

Геометрическая модель (рис. 4) электрической цепи системы ГЛН состоит из следующих элементов: медных шин (1), гибких многожильных медных проводов (2), соединительных пластин (3), вольфрамовой проволоки (4), модели вольфрамовой спирали (5), медных клемм (6), мест соединения проволок со спиралью (7). При этом модель вольфрамовой спирали представляет собой полый цилиндр с внешним диаметром 1,6 мм и толщиной стенок 0,3 мм, что соответствует внешнему диаметру и размеру поперечного сечения реальной спирали ГЛН [5]. Лампы включены в цепь параллельно друг другу с помощью медных шин, к которым подводится напряжение. Гибкие провода крепятся к шине с помощью клемм.

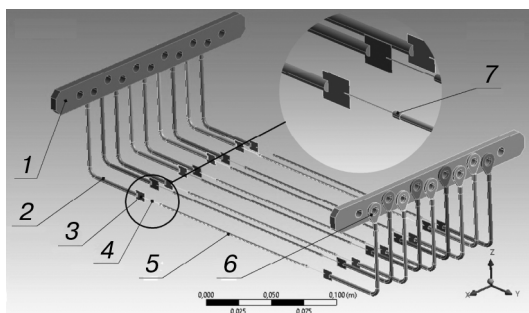


Рис. 4. Геометрическая модель электрической цепи системы ГЛН:
1 — медные шины; 2 — гибкие многожильные проводники из меди;
3 — соединительные пластины; 4 — вольфрамовая проволока; 5 — модель
вольфрамовой спирали; 6 — медные клеммы; 7 — место
соединения проволоки со спиралью

[Fig. 4. Geometric model of electric circuit of halogen lamps:
1 — copper bus lines; 2 — flexible twisted copper conductors;
3 — coupling plates; 4 — tungsten wire; 5 — tungsten
coil model; 6 — copper clamps; 7 — wire-to-spiral connection]

Моделирование проводилось в конечно-элементном пакете программ ANSYS Workbench (лицензия 339001). На основе геометрической модели системы питания ГЛН была создана ее конечно-элементная модель (КЭМ) (рис. 5). Размеры элементов составили от 0,3 до 3 мм в зависимости от геометрических особенностей составных элементов цепи. Общее количество элементов сетки составило более 220 000 шт. Шаг по времени составлял 0,5 с при общей длительности процесса в 300 с. При этом продолжительность одного расчета варьировалась от 3 до 5 ч на вычислительных системах современного уровня (процессор Intel Core i7-4790).

Целью первого этапа моделирования было определение количества и пространственного распределения тепла, возникающего при прохождении электрического тока по проводникам системы ГЛН. Рассматривались следующие два режима работы системы питания ГЛН:

- стандартный режим — напряжение питания 220 В;
- форсированный режим, пригодный для достаточно длительных испытаний, — напряжение питания 250 В;
- чрезвычайный режим, пригодный для кратковременных испытаний, — напряжение питания 280 В [2].

Схема подключения системы питания ГЛН представлена на рисунке 6 (стрелками указано направление прохождения тока).

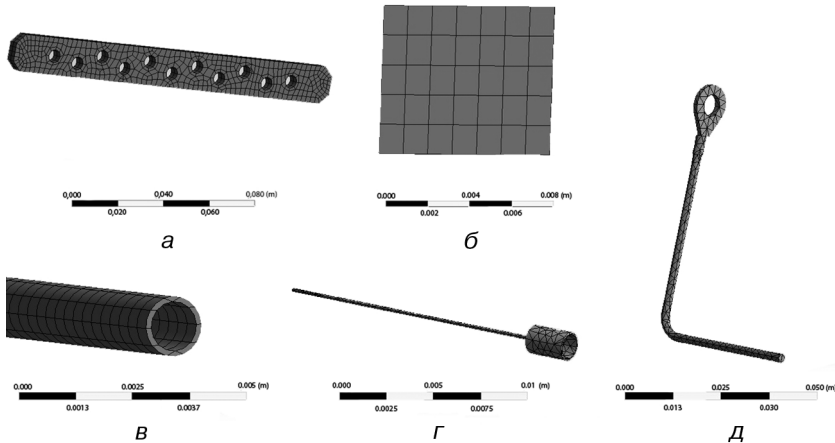


Рис. 5. Составные части КЭМ электрической цепи: *a* — медная шина; *б* — соединительная пластина; *в* — модель вольфрамовой спирали; *г* — вольфрамовая проволока и место ее соединения со спиралью; *д* — многожильный медный проводник с клеммой
[**Fig. 5.** Component parts of electrical circuit FEM: *a* — copper bus line; *b* — coupling plate; *c* — tungsten coil model; *d* — tungsten wire connected with the coil; *e* — twisted copper conductor with a clamp]

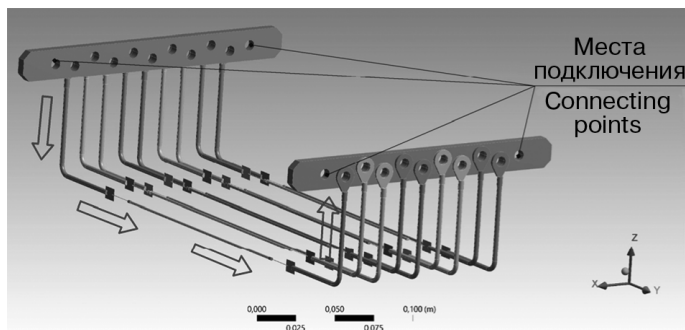


Рис. 6. Схема подключения системы питания ГЛН
[**Fig. 6.** Scheme of halogen lamps set connection]

На рис. 7–9 показаны результаты моделирования электрических процессов в системе питания ГЛН и ее дополненная геометрическая модель (рис. 10).

Результаты моделирования показывают, что наиболее теплонагруженными местами системы являются гибкие провода ламп и медные шины в окрестности токоподводов.

Полученное распределение объемного тепловыделения в системе питания, использовалось для моделирования нестационарного теплообмена, протекающего при работе стенда. При этом геометрическая модель системы питания для проведения теплового расчета была дополнена рядом элементов (рис. 10): изоляцией проводов, колбами и цоколями ламп. Температура колб ламп и спиралей ГЛН заимствовалась из ранее проведенного авторами расчета комбинированно-

го теплообмена в рабочей зоне стенда, в котором в полной мере учитывались все радиационные эффекты и конвективный отвод тепла от колб ламп потоком сжатого газа [4].

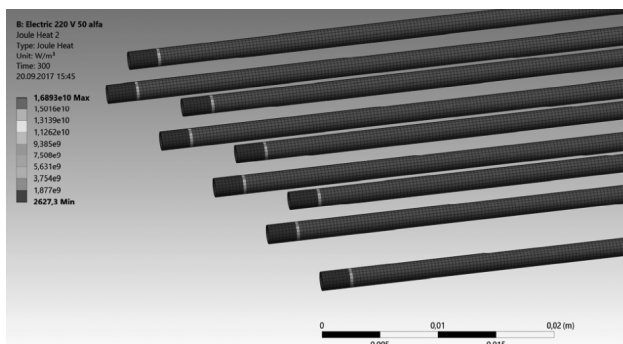


Рис. 7. Объемное тепловыделение в спирали при прохождении электрического тока (напряжение питания 220 В), Вт/м³
[Fig. 7. Volumetric heat generation in a coil generated by current flow (supply voltage 220 V), W/m³]

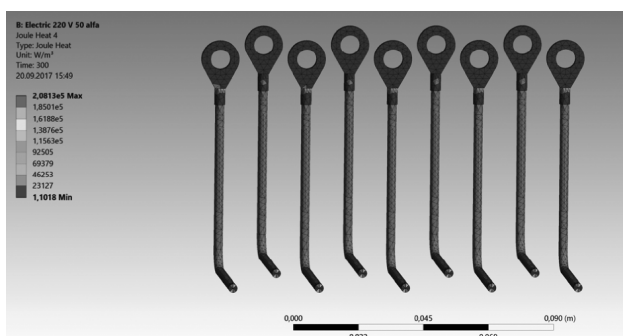


Рис. 8. Объемное тепловыделение в гибком проводе при прохождении электрического тока (напряжение питания 220 В), Вт/м³
[Fig. 8. Volumetric heat generation in a flexible conductor generated by current flow (supply voltage 220 V), W/m³]

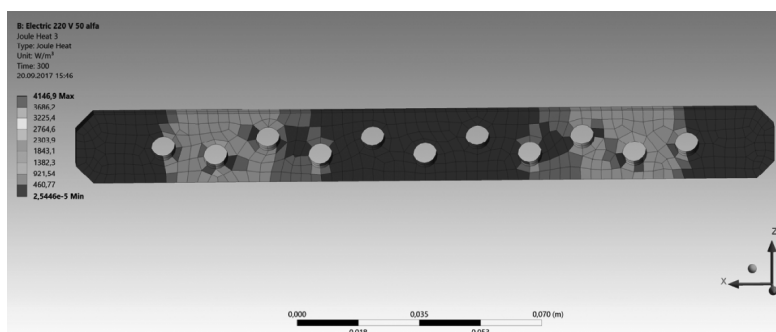


Рис. 9. Объемное тепловыделение в шинах при прохождении электрического тока (напряжение питания 220 В), Вт/м³
[Fig. 9. Volumetric heat generation in bus lines generated by current flow (supply voltage 220 V), W/m³]

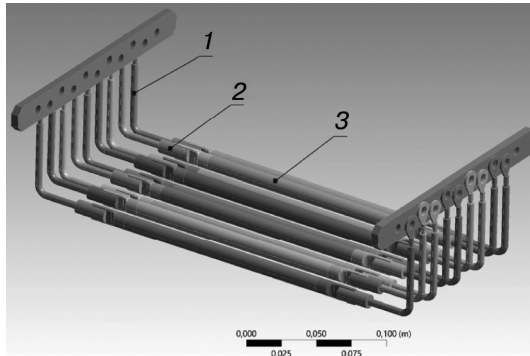


Рис. 10. Дополненная геометрическая модель системы ГЛН:

1 — изоляция многожильных медных проводов;

2 — цоколь лампы; 3 — колба лампы

[Fig. 10. Complemented geometry model of halogen lamps set:

1 — isolation of twisted copper wires; 2 — lamp base; 3 — lamp bulb]

Рассматривались три различных варианта отвода тепла от элементов системы питания ГЛН:

1) шины и гибкие провода лампы выведены за пределы рабочей зоны стенда и в целях безопасности изолированы внешним кожухом, что ограничивает возможности их охлаждения. Поэтому считалось, что конвективный отвод тепла будет пренебрежимо мал, и коэффициент теплоотдачи принимался равным нулю;

2) шины и гибкие провода лампы выведены за пределы рабочей зоны стенда. Считалось, что они охлаждаются за счет естественной конвекции с коэффициентом теплоотдачи равным $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и за счет радиационного сброса энергии в окружающее пространство с температурой $22 \text{ }^\circ\text{C}$;

3) шины и гибкие провода лампы выведены за пределы рабочей зоны стенда, изолированы кожухом, в котором предусмотрена система принудительного охлаждения данных элементов потоком воздуха. При этом коэффициент теплоотдачи принимался равным $50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Результаты моделирования этих вариантов при различных напряжениях питания представлены на рисунках 11–19.

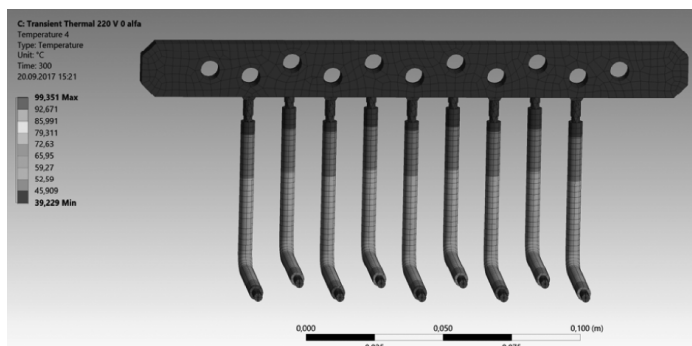


Рис. 11. Температура медной шины, гибких проводников и их изоляции при использовании кожуха без системы охлаждения (напряжение питания 220 В), К

[Fig. 11. Temperature of copper bus line, flexible conductors and isolation with cover without cooling (supply voltage 220 V), K]

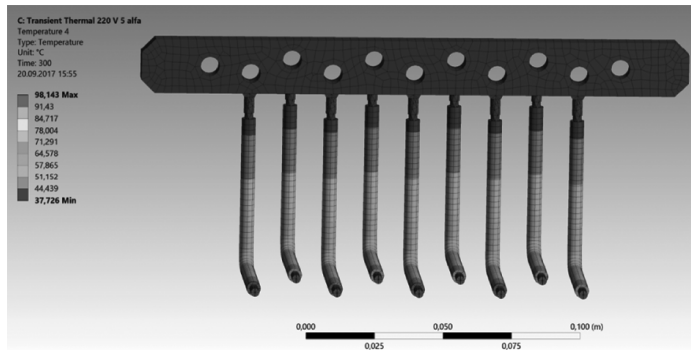


Рис. 12. Температура медной шины, гибких проводников и их изоляции при отсутствии кожуха (напряжение питания 220 В), К
[**Fig. 12.** Temperature of copper bus line, flexible conductors and isolation without cover (supply voltage 220 V), K]

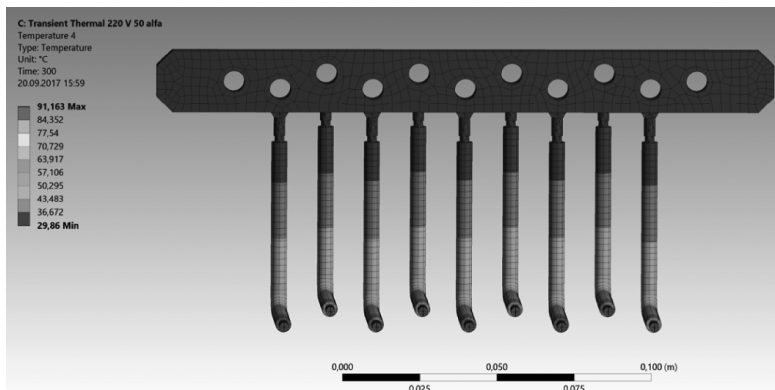


Рис. 13. Температура медной шины, гибких проводников и их изоляции при использовании кожуха с системой охлаждения (напряжение питания 220 В), К
[**Fig. 13.** Temperature of copper bus line, flexible conductors and isolation with cover with cooling (supply voltage 220 V), K]

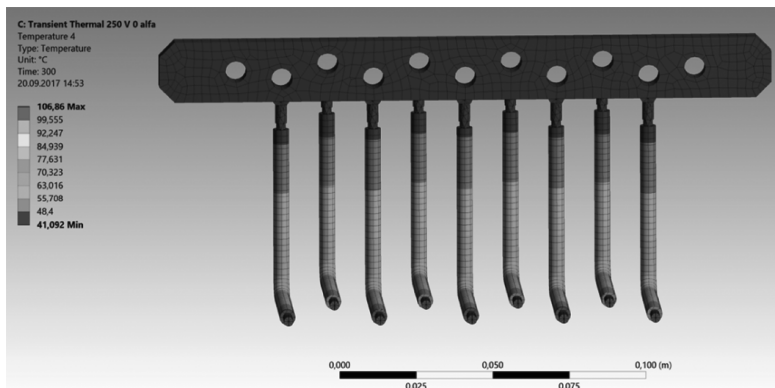


Рис. 14. Температура медной шины, гибких проводников и их изоляции при использовании кожуха без системы охлаждения (напряжение питания 250 В), К
[**Fig. 14.** Temperature of copper bus line, flexible conductors and isolation with cover without cooling (supply voltage 250 V), K]

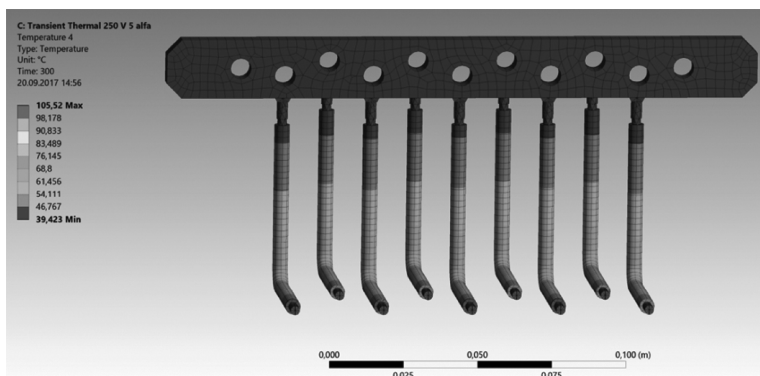


Рис. 15. Температура медной шины, гибких проводников и их изоляции при отсутствии кожуха (напряжение питания 250 В), К
[**Fig. 15.** Temperature of copper bus line, flexible conductors and isolation without cover (supply voltage 250 V), K]

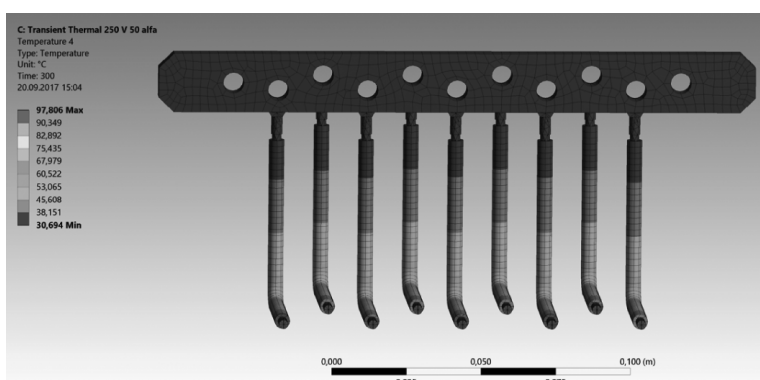


Рис. 16. Температура медной шины, гибких проводников и их изоляции при использовании кожуха с системой охлаждения (напряжение питания 250 В), К
[**Fig. 16.** Temperature of copper bus line, flexible conductors and isolation with cover with cooling (supply voltage 250 V), K]

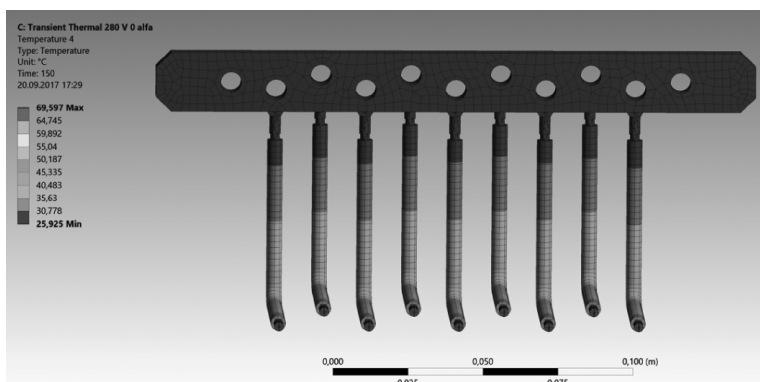


Рис. 17. Температура медной шины, гибких проводников и их изоляции при использовании кожуха без системы охлаждения (напряжение питания 280 В), К
[**Fig. 17.** Temperature of copper bus line, flexible conductors and isolation with cover without cooling (supply voltage 280 V), K]

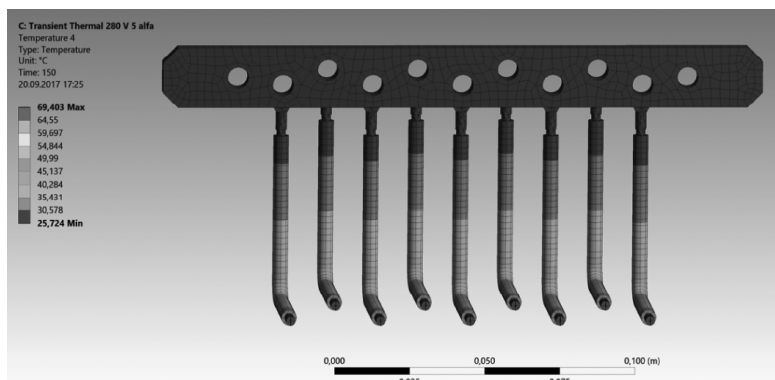


Рис. 18. Температура медной шины, гибких проводников и их изоляции при отсутствии кожуха (напряжение питания 280 В), К
[**Fig. 18.** Temperature of copper bus line, flexible conductors and isolation without cover (supply voltage 280 V), K]

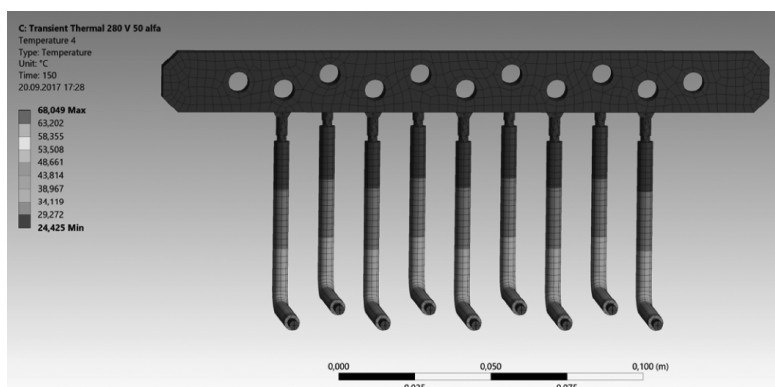


Рис. 19. Температура медной шины, гибких проводников и их изоляции при использовании кожуха с системой охлаждения (напряжение питания 280 В), К
[**Fig. 19.** Temperature of copper bus line, flexible conductors and isolation with cover with cooling (supply voltage 280 V), K]

Результаты моделирования температурного состояния изоляции гибких проводов ГЛН для различных режимов работы стенда и условий отвода тепла сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Результаты моделирования

Напряжение питания ГЛН, В	Время, с	Максимальная температура изоляции, °С		
		Кожух без системы охлаждения	Без кожуха	Кожух с системой охлаждения
220	300	94	93	86
250	300	101	100	92
280	150	65	64	63

Можно сделать вывод, что температура гибких проводников во всех случаях не превышает предельно допустимых для кремнийорганической резины значений.

Однако с точки зрения безопасности, обеспечения возможности длительной работы стенда и форсирования ГЛН предпочтителен вариант с кожухом, в котором предусмотрено охлаждение гибких проводов и шины потоком воздуха комнатной температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Зворыкин Д.Б., Александрова А.Т., Байкальцев Б.П.* Отражательные печи инфракрасного нагрева. М.: Машиностроение, 1985. 176 с.
- [2] *Елисеев В.Н., Товстоног В.А.* Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 396 с.
- [3] *Гофин М.Я.* Жаростойкие и теплозащитные конструкции многоразовых аэрокосмических аппаратов. М.: Мир, 2003. 637 с.
- [4] *Baldzhiev R., Prosuntsov P.* Modeling Combined Heat Transfer in the Operating Area of the High Power Heating Test Facility // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2017. Т. 110. С. 01009. DOI: 10.1051/mateconf/201711001009.
- [5] Каталог продукции ЛИСМА [Электронный ресурс] / LISMA, 2017. URL: http://lisma.su/katalog-produktsii/galogennyye/kg-220-2000-5/?sphrase_id=14481 (дата обращения: 28.08.2017).
- [6] *Virag M., Murin J.* Thermal Field Simulation of a Tungsten Filament Lamp Referring to Its Lifetime // Journal of ELECTRICAL ENGINEERING. 2005. V. 56. No. 9-10. P. 252–257.

© Балджиев Р.С., Алексеев А.А., Просунцов П.В., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: август 2017

Дата принятия к печати: сентябрь 2017

Для цитирования:

Балджиев Р.С., Алексеев А.А., Просунцов П.В. Моделирование теплообмена в гибких проводниках галогенных ламп стенда тепловых испытаний // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: «Инженерные исследования»*. 2017. Т. 18. № 3. С. 325–337. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-325-337

Сведения об авторах:

Балджиев Риза Серверович, магистр в области техники и технологии, аспирант кафедры СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. *Сфера научных интересов*: численное моделирование тепловых процессов в объектах аэрокосмической техники, проектирование и создание стендов для тепловых испытаний, разработка и испытание изделий из композиционных материалов. *Контактная информация*: e-mail: r.baldji@yandex.ru

Алексеев Артемий Андреевич, магистр в области техники и технологии, аспирант кафедры СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. *Сфера научных интересов*: численное моделирование напряженно-деформированного состояния объектов аэрокосмической техники, моделирование тепловых процессов, топологическая оптимизация композитных конструкций. *Контактная информация*: e-mail: alexart93@bk.ru

Просунцов Павел Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции», Московский государственный техни-

ческий университет им. Н.Э. Баумана. *Сфера научных интересов:* моделирование и идентификация процессов комбинированного теплообмена. *Контактная информация:* e-mail: pavel.prosuntsov@mail.ru

MODELLING OF HEAT EXCHANGE IN FLEXIBLE CONDUCTORS OF HALOGEN LAMPS OF THERMAL TEST FACILITY

R.S. Baldzhiev, A.A. Alekseyev, P.V. Prosuntsov

Bauman Moscow State Technical University (National Research University)
2-nd Baumanskaya str., 5/1, Moscow, Russia, 105005

Current work is dedicated to the evaluation of the possibility of safety use of serial halogen lamps for high power radiating heating test facilities with active cooling of the bulbs. Complex modeling of electrical and thermal processes occurring at various (standard, forced and extreme) facility operation modes has been carried out. The temperature values in the individual elements of the lamp supply system are obtained. A variant of the booth design, which provides the cooling of flexible wires and bus lines by the air flow, is rational from the point of safety and ensuring long-term uninterrupted operation view.

Key words: radiating heating facility, thermal tests, halogen lamps

REFERENCES

- [1] Zvorikin D.B., Alexandrova A.T., Baikaltsev B.P. Reflective infrared heat ovens. M.: Mashinostroenie, 1985. 176 p.
- [2] Eliseev V.N., Tovstonog V.A. Heat exchange and thermal testing of materials and structures of aerospace engineering under radiation heating. M.: Bauman Moscow State Technical University Publisher, 2014. 396 p.
- [3] Gofin M.Y. Heat resistant and thermal protective structures of reusable aerospace vehicles. M.: Mir, 2003. 637 p.
- [4] Baldzhiev R., Prosuntsov P. Modeling Combined Heat Transfer in the Operating Area of the High Power Heating Test Facility. MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2017. Т. 110. S. 01009. DOI: 10.1051/mateconf/201711001009.
- [5] Product catalogue LISMA [digital resource]. LISMA, 2017. Access mode: http://lisma.su/katalog-produktsii/galogennye/kg-220-2000-5/?sphrase_id=14481 (accessed date: 28.08.2017).
- [6] Virag M., Murin J. Thermal Field Simulation of a Tungsten Filament Lamp Referring to Its Lifetime. *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*. 2005. V. 56. No. 9-10. P. 252—257.

Article history:

Received: August 2017

Accepted: September 2017

For citation:

Baldzhiev R.S., Alekseyev A.A., Prosuntsov P.V. (2017) Modelling of heat exchange in flexible conductors of halogen lamps of thermal test facility. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(3), 325—337. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-325-337

Bio Note:

Riza S. Baldzhiev, Master of Science, postgraduate student of department SM-13 “Rocket and Space Composite Structures”, Bauman Moscow State Technical University. *Research interests*: computer simulation of thermal processes in the objects of aerospace engineering, design and construction of facilities for thermal testing, development and testing of products from composite materials. *Contact information*: e-mail: r.baldji@yandex.ru

Artemij A. Alekseev, Master of Science, postgraduate student of department SM-13 “Rocket and Space Composite Structures”, Bauman Moscow State Technical University. *Research interests*: computer modeling of the stress-strain state of objects of aerospace engineering, modeling of thermal processes, topological optimization of composite structures. *Contact information*: e-mail: alexart93@bk.ru

Pavel V. Prosuntsov, Doctor of Engineering Science, professor of department SM-13 “Rocket and Space Composite Structures», Bauman Moscow State Technical University. *Research interests*: computer modeling and identification of combined heat transfer processes. *Contact information*: e-mail: pavel.prosuntsov@mail.ru