

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО РАЗОГРЕВА КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГАММА-УСТАНОВКИ

**К. А. Щербакова, К. В. Шарифетдинова, К. Г. Плужян, С. А. Картанов,
Валекжанина Е. И., Демьянов С. А.**

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, г. Саров Нижегородской обл., пр. Мира, д. 37

Статья поступила в редакцию 08.07.2022, после доработки – 15.07.2022, принята к публикации – 20.09.2022

Гамма-установка (далее – ГУ) является составной частью облучательного комплекса для обеспечения и проведения испытаний электронной компонентной базы (далее – ЭКБ) на стойкость к воздействию ионизирующих излучений.

Испытания ЭКБ и приборов на стойкость к накопленной дозе учитывают воздействие электронов и протонов и генерируемое ими тормозное излучение, а также космическое излучение, вносящее незначительный вклад в интегральные показатели. Для испытаний на стойкость к накопленной дозе, в том числе, используют ГУ на основе различных радионуклидов с эффективной энергией в спектре не менее 0,6 МэВ. Под эффективной энергией в спектре будем понимать среднее значение энергии квантов. Такая энергия гамма-квантов обеспечивает физическую близость моделируемым базовым радиационным процессам:

- нарушению структуры полупроводников и диэлектриков;
- генерации неравновесных свободных носителей заряда в объеме узлов ЭКБ и приборов;
- накоплению объемного заряда на ловушечных центрах.

В данной работе представлены результаты расчетного определения температуры узлов конструкции гамма-установки в условиях радиационного разогрева. На основе расчетных данных о величине энерговыделения в составных узлах ГУ определена температура основных элементов в процессе эксплуатации установки. Результаты проведенных исследований позволили обосновать конструктивные решения, принятые в процессе разработки ГУ.

Ключевые слова: активность источника, гамма-излучение, закрытый радионуклидный источник, ионизирующее излучение, радиационный разогрев, максимальная рабочая температура, мощность экспозиционной дозы, облучательный комплекс, электронная компонентная база, энерговыделение.

Numerical simulation of radiation heating of gamma-plant structural members. K. A. Shcherbakova, K. V. Sharafetdinova, K. G. Pluzyan, S. A. Kartanov, Valekzhanina Ye. I., Dem'yanov S. A. (FSUE «RFNC-VNIIEF», 607188, Sarov, Nizhny Novgorod region, Mira ave., 37). Gamma-plant (hereinafter – GP) is a component of a irradiating complex intended to provide and perform testing of electronic components (hereinafter – ECs) as to their resistance against the cosmic space ionizing radiation effect.

Testing of ECs and instruments in their resistance against the accumulated dose takes into account the effect of electrons and protons in Earth radiation belts and bremsstrahlung generated by them as well as space radiation contributing insignificantly to integral indexes. To test in resistance against accumulated dose, GP based on different radionuclides with the effective energy in spectrum not less than 0.6 MeV is used among others. In a range we will understand average value of energy of quantum as effective energy. Such gamma-quantum energy ensures physical closeness to simulated basic radiation processes:

- structure failure of semiconductors and dielectrics;
- generation of non-equilibrium free charge carriers in ECs and instrument assemblies;
- accumulation of space charge on trap centers.

The given paper presents the results of calculated determination of GP structure assemblies' temperature under radiation heating. Basing on calculated data on the value of energy release in component as-

semblies of GP there was determined the temperature of basic elements in the course of the plant operation. The results of the undertaken researches made it possible to substantiate structural decisions accepted in the course of GP development.

Key words: source activity, gamma-radiation, closed radioactive source, ionizing radiation, radiation heating, irradiating measurement complex, maximal operating temperature, exposure dose rate, electronic components, energy release.

DOI 10.53403/02054671_2022_3_101

Введение

Для обеспечения проведения испытаний ЭКБ на стойкость к воздействию ионизирующего излучения в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ведутся работы по созданию облучательного комплекса. Одной из установок облучательного комплекса является ГУ на основе закрытого радионуклидного источника (далее – ЗРИ) ^{60}Co , свойства которого приведены в [1]. Разрабатываемая ГУ является уникальной, с точки зрения обеспечения высокой мощности экспозиционной дозы ионизирующего излучения, и позволяет проводить испытания нескольких образцов ЭКБ одновременно, тем самым снижая себестоимость проведения испытаний. Установка позволяет:

- определять уровень стойкости ЭКБ к радиационному воздействию на всех этапах разработки;
- подтверждать (давать оценку) соответствие ЭКБ и материалов заданным требованиям стойкости к воздействию радиации;
- контролировать стойкость ЭКБ на этапах жизненного цикла (производства, поставки и эксплуатации).

Данная установка разрабатывается в двух конструктивных исполнениях:

- средняя интенсивность гамма-излучения с мощностью дозы (10–300) Р/с;
- низкая интенсивность гамма-излучения с мощностью дозы (0,01–10) Р/с.

Для обеспечения необходимых уровней доз на объекте воздействия в качестве ионизационного источника излучения (ИИИ) выбран закрытый радионуклидный источник (ЗРИ) на основе изотопа ^{60}Co типа ГИК-9-4, так как он имеет достаточно высокую активность и малые габариты.

Подробную информацию по радиационно-физическим параметрам и габаритам вышеуказанного источника можно получить в каталоге, размещенном на официальном сайте ФГУП «ПО "Маяк"». Общий вид ИИИ, состоящего из металлического кобальта, облицованного двумя герметичными оболочками, представлен на рис. 1.

ИИИ размещены определенным образом внутри кассеты, модель которой представлена на рис. 2.

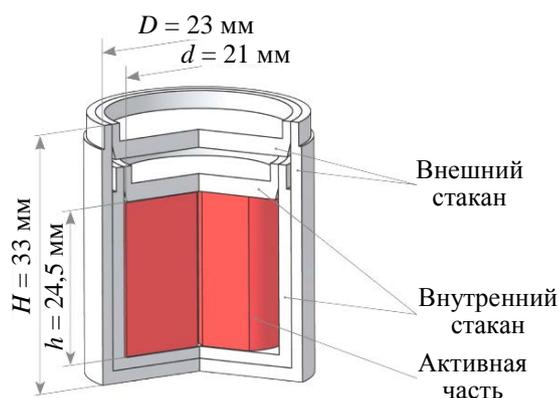


Рис. 1. Общий вид источника типа ГИК

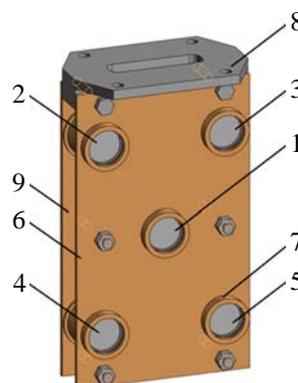


Рис. 2. Обозначения элементов кассеты: 1–5 –ЗРИ № 1–5, 6 – пластина ближняя, 7 – стакан для ЗРИ, 8 – кронштейн, 9 – пластина дальняя

1. Постановка задачи

Поскольку источники ионизирующего излучения, размещенные в ГУ средней интенсивности, имеют активность ≈ 10 кКи, ее составные узлы подвергаются воздействию высоких температур, связанных с поглощением γ -излучения в элементах конструкции. В связи с этим при разработке конструкции кассеты ГУ необходимо определить максимально достижимую температуру элементов.

Входными данными для расчета являются значения энерговыделения в элементах конструкции ГУ для «исходного» и «рабочего» положений, полученные с помощью расчетов в программе СМК

(табл. 1) [2]. Все значения, полученные в результате расчета, приводятся на один гамма-квант источника излучения.

Под «исходным» понимаем положение, в котором кассета с ИИИ находится в защитном контейнере. «Рабочим» является положение, при котором кассета перемещается из «исходного» положения вертикально вверх для облучения изделий ЭКБ.

С использованием значений максимальных энерговыделений в элементах ГУ выполнен теплофизический расчет с помощью математического моделирования процесса стационарного нагрева ГУ в трехмерной постановке. Рассматривались следующие начальные и граничные условия:

Таблица 1

*Исходные параметры, используемые для проведения расчета
(энерговыделение в элементах кассеты)*

Элемент		Объем элемента, м ³	Энерговыделение в «рабочем» положении, эВ/фотон	Энерговыделение в «исходном» положении, эВ/фотон
ЗРИ №1	Стакан № 1	2,78E-06	5,23E+03	5,26E+03
	Стакан № 2	2,01E-06	5,90E+03	5,93E+03
	Источник ИИ	7,76E-06	4,95E+04	4,96E+04
ЗРИ №2	Стакан № 1	2,78E-06	5,03E+03	5,07E+03
	Стакан № 2	2,01E-06	5,73E+03	5,76E+03
	Источник ИИ	7,76E-06	4,88E+04	4,89E+04
ЗРИ №3	Стакан № 1	2,78E-06	5,03E+03	5,07E+03
	Стакан № 2	2,01E-06	5,73E+03	5,76E+03
	Источник ИИ	7,76E-06	4,88E+04	4,89E+04
ЗРИ №4	Стакан № 1	2,78E-06	5,02E+03	5,06E+03
	Стакан № 2	2,01E-06	5,72E+03	5,76E+03
	Источник ИИ	7,76E-06	4,87E+04	4,88E+04
ЗРИ №5	Стакан № 1	2,78E-06	5,03E+03	5,06E+03
	Стакан № 2	2,01E-06	5,73E+03	5,75E+03
	Источник ИИ	7,76E-06	4,87E+04	4,89E+04
Стакан для ЗРИ № 1		1,12E-05	1,71E+04	1,73E+04
Стакан для ЗРИ № 2		1,12E-05	1,62E+04	1,64E+04
Стакан для ЗРИ № 3		1,12E-05	1,62E+04	1,64E+04
Стакан для ЗРИ № 4		1,12E-05	1,61E+04	1,63E+04
Стакан для ЗРИ № 5		1,12E-05	1,61E+04	1,63E+04
Пластина № 1		5,28E-05	2,69E+04	2,79E+04
Пластина № 2		5,28E-05	3,04E+04	3,16E+04
Кронштейн		6,80E-05	1,01E+04	1,05E+04

– температура окружающей среды – 22 °С;

– коэффициент теплоотдачи для воздуха – 5,6 Вт/м²·К [5];

– температура поверхности источников не должна превышать 350 °С.

Теплофизические свойства материалов, используемые в расчете, были заданы в соответствии со справочной литературой [3, 4]. Энергия, выделившаяся в элементах конструкции ГУ (в кассете) в «исходном» положении, рассчитанная в программе СМК, приводится в эВ (табл. 1). Для осуществления тепловых расчетов необходимо вычислить тепловую мощность, определяемую по формуле [5]:

$$Q = EqAnk,$$

где Q – тепловая мощность, Вт; E – энерговыделение элементов в «исходном» положении, эВ; $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ – коэффициент перевода из эВ в Дж; $A = 4,63 \cdot 10^4$ – суммарная активность ИИИ, Ки; $n = 2$ – коэффициент, обозначающий число γ -квантов на 1 акт распада; $k = 3,7 \cdot 10^{10}$ – коэффициент перевода из Ки в Бк.

Значения энерговыделения в элементах конструкции кассеты ГУ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Энерговыделение элементов конструкции кассеты ГУ

Наименование элемента, материал	Максимальное энерговыделение, эВ	Мощность, Вт	Удельная мощность, Вт/м ³
ГИК внешний стакан, сталь 12Х18Н10Т	5,26E+03	2,9	1,04E+06
ГИК внутренний стакан, сталь 12Х18Н10Т	5,93E+03	3,3	1,62E+06
ГИК кобальт, ⁶⁰ Со	4,96E+04	27,3	3,51E+06
ГИК внешний стакан, сталь 12Х18Н10Т	5,07E+03	2,8	1,00E+06
ГИК внутренний стакан, сталь 12Х18Н10Т	5,76E+03	3,2	1,57E+06
ГИК кобальт, ⁶⁰ Со	4,89E+04	26,8	3,46E+06
ГИК внешний стакан, сталь 12Х18Н10Т	5,07E+03	2,8	1,00E+06
ГИК внутренний стакан, сталь 12Х18Н10Т	5,76E+03	3,2	1,57E+06
ГИК кобальт, ⁶⁰ Со	4,89E+04	26,8	3,46E+06
ГИК внешний стакан, сталь 12Х18Н10Т	5,06E+03	2,8	9,99E+05
ГИК внутренний стакан, сталь 12Х18Н10Т	5,76E+03	3,2	1,57E+06
ГИК кобальт, ⁶⁰ Со	4,88E+04	26,8	3,46E+06
ГИК внешний стакан, сталь 12Х18Н10Т	5,06E+03	2,8	9,98E+05
ГИК внутренний стакан, сталь 12Х18Н10Т	5,75E+03	3,2	1,57E+06
ГИК кобальт, ⁶⁰ Со	4,89E+04	26,8	3,46E+06
Стакан латунь, Л63	1,73E+04	9,5	8,44E+05
Стакан латунь, Л63	1,64E+04	9,0	8,02E+05
Стакан латунь, Л63	1,64E+04	9,0	8,02E+05
Стакан латунь, Л63	1,63E+04	8,9	7,99E+05
Стакан латунь, Л63	1,63E+04	8,9	7,99E+05
Пластина ближняя, Л63	2,79E+04	15,3	2,91E+05
Пластина дальняя, Л63	3,16E+04	17,4	3,29E+05
Кронштейн, титановый сплав ПТ-3В	1,05E+04	5,8	8,47E+04

2. Экспериментальное исследование

Для верификации полученных расчетных данных создан тепловой макет ГУ и проведен эксперимент. Макет представляет собой латунную кассету, закрепленную на кронштейне из титанового сплава. В тепловом макете ИИИ заменены втулками из нержавеющей стали с расположенными внутри них нагревательными элементами фирмы «ФЕС» Hotset 200W230V для имитации эквивалентного энерговыделения от источников гамма-излучения. Общий вид макета показан на рис. 3.

На рис. 4 представлены контрольные точки измерения температур макета. Точки T1–T8 расположены на поверхности пластины, а точки T9–T13 – внутри нагревательных элементов.

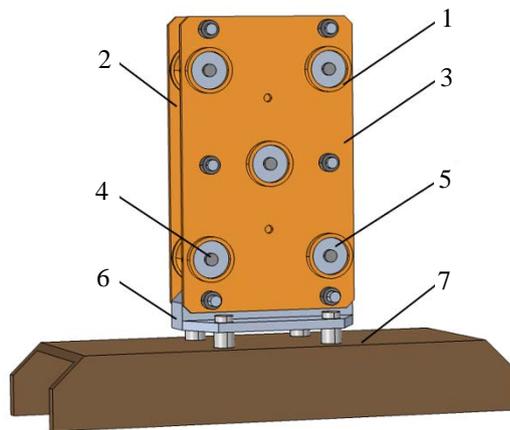


Рис. 3. Принципиальная конструкция макета: 1 – стакан, 2 – пластина дальняя, 3 – пластина ближняя, 4 – нагревательный элемент, 5 – втулка, 6 – кронштейн, 7 – основание

В табл. 3 представлены значения температур в контрольных точках измерения макета теплового.

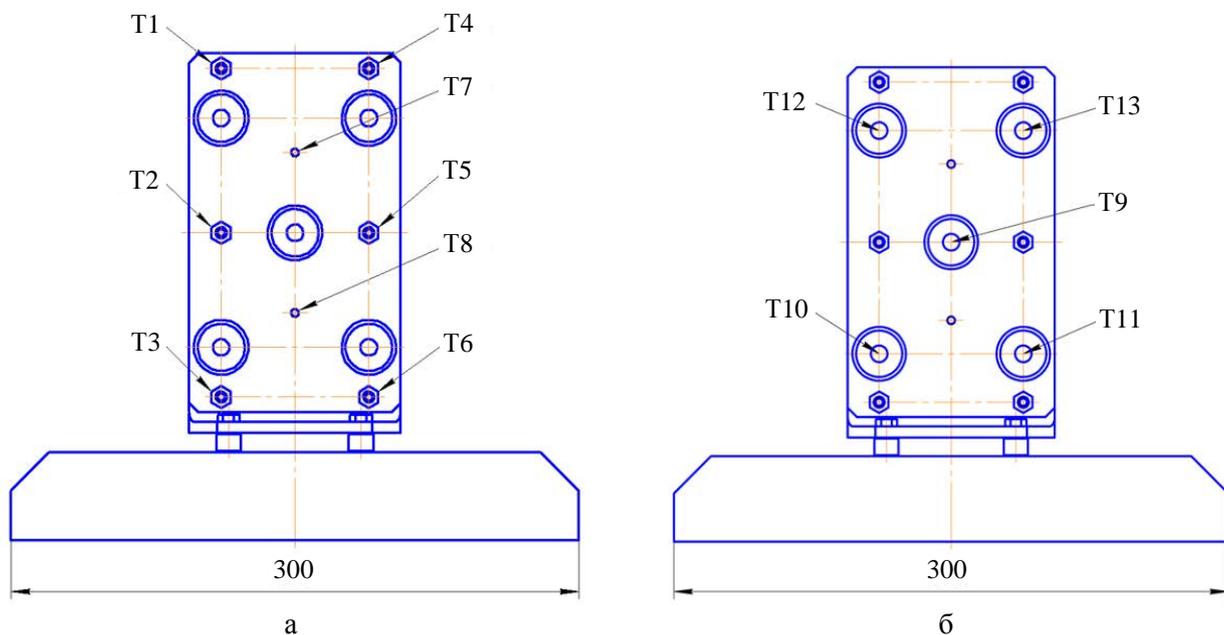


Рис. 4. Контрольные точки измерения температуры макета: а – на поверхности пластины; б – на нагревательных элементах

Таблица 3

Температуры в контрольных точках измерения

Контрольные точки	Расчетные значения, °С	Экспериментальные значения, °С	Отклонение, %
T1	69,3	81,2	14,7
T2	67,3	76,3	11,8
T3	65,1	71,9	9,5
T4	69,3	80,9	14,3
T5	67,3	77,0	12,6
T6	65,1	70,8	8,1
T7	69,8	78,1	10,6
T8	69,8	74,7	6,6
T9	105,2	99,4	5,8
T10	102,9	98,9	4,0
T11	102,8	97,0	6,0
T12	105,7	105,4	0,3
T13	105,7	104,2	1,4

Анализ полученных расчетных и экспериментальных данных показал, что максимальное отклонение между ними составляет не более 15%, что можно считать приемлемым. Это позволяет провести тепловой расчет реальной конструкции кассеты гамма-установки.

Расходимость расчетных и экспериментальных данных обусловлена такими факторами, как отличие используемых в расчете теплофизических коэффициентов от их реальных значений в условиях проведения эксперимента, а также термическое расширение материалов (влияющее на изменение воздушного зазора), шероховатость пластины и отклонение реальных размеров конструкции от номинальных размеров по КД.

3. Результаты численного моделирования

С целью выявления максимально достижимых температур элементов ГУ проведен расчет стационарного режима нагрева в условиях размещения кассеты с ИИИ в «исходном» положении. На рис. 5 представлена принципиальная модель, которая использовалась для проведения данного расчета. Расчет выполнен в программе

трехмерного моделирования, реализующей численные решения систем дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов.

Стоит отметить, что установка ИИИ в кассету – весьма затруднительная операция, осуществляющаяся удаленно в условиях «горячей» камеры. Все операции в «горячей» камере проводятся манипуляторными устройствами, поэтому способ фиксации источников в кассете должен быть простым, надежным и осуществимым для манипулятора. Вместе с тем конструктивные зазоры между стаканом кассеты и ИИИ должны быть минимальными (с учетом линейного расширения ИИИ при их нагреве) для сокращения перемещения источников внутри кассеты во время транспортировки и эксплуатации.

Исходя из этого получены распределения температур в объеме составных узлов кассеты ГУ в зависимости от толщин воздушных зазоров, которые могут возникнуть при сборке конструкции и размещении ИИИ типа ГИК-9-4 в кассете. Тепловые расчеты проведены при 10 разных толщинах воздушного зазора в интервале от 50 до 500 мкм с шагом 50 мкм. В качестве примера на рис. 6 и 7 представлено распределение температуры в элементах

исследуемого узла ГУ при двух вариантах толщины воздушного зазора: 0,05 и 0,50 мм.

С увеличением толщины воздушного зазора температура источников увеличивается, так как воздушный зазор создает дополнительное термическое сопротивление и препятствует теплообмену с источниками [6]. При толщине воздушного зазора 0,50 мм

максимальная температура источника не превышает 330 °С (рис. 8). На основании этого можно сделать вывод, что толщина воздушного зазора между стаканом кассеты и расположенным внутри ИИИ должна быть не более 0,50 мм. На рис. 8 представлены графики зависимости температуры ЗРИ от толщины воздушного зазора.

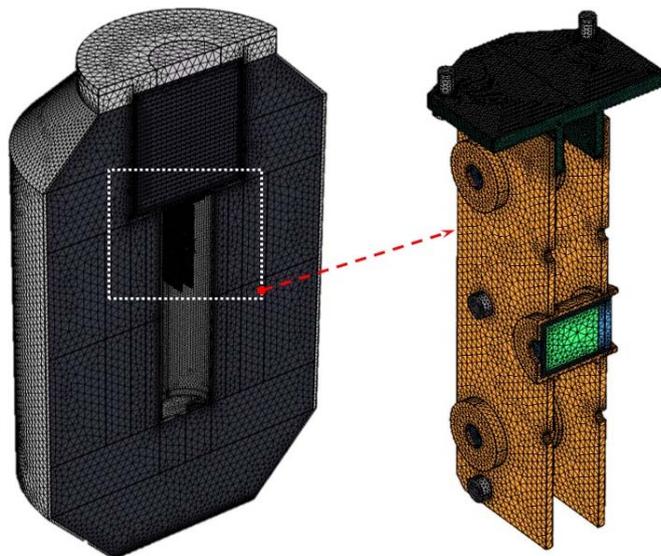


Рис. 5. Конечно-элементная модель

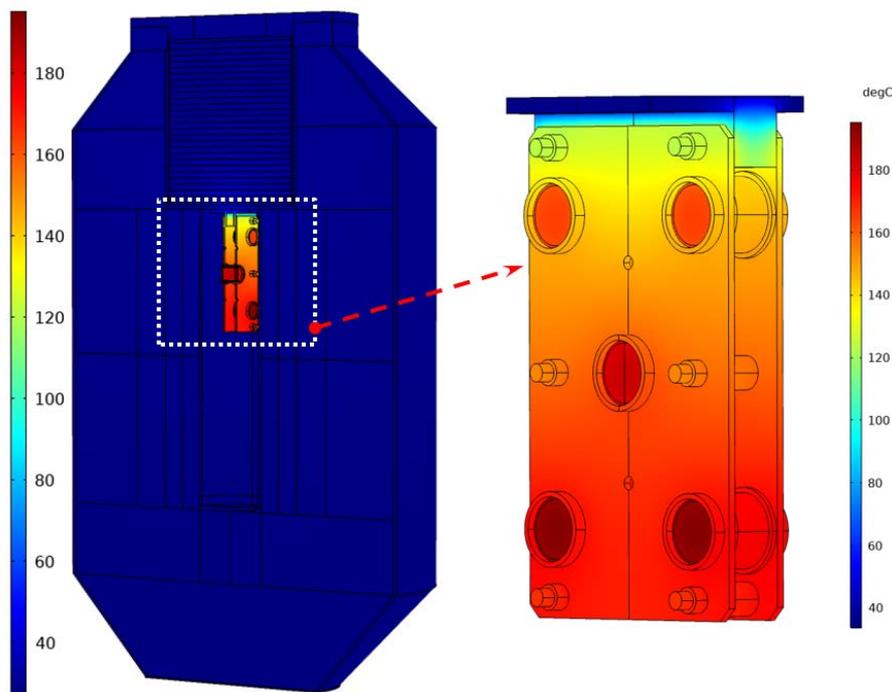


Рис. 6. Распределение температуры при толщине воздушного зазора 0,05 мм

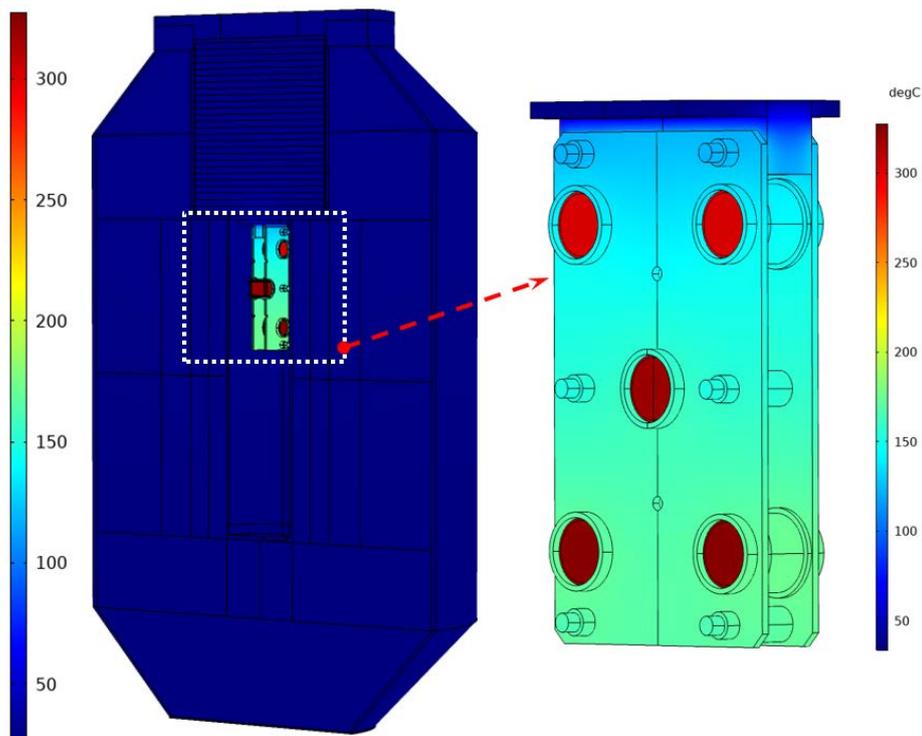


Рис. 7. Распределение температуры при толщине воздушного зазора 0,50 мм

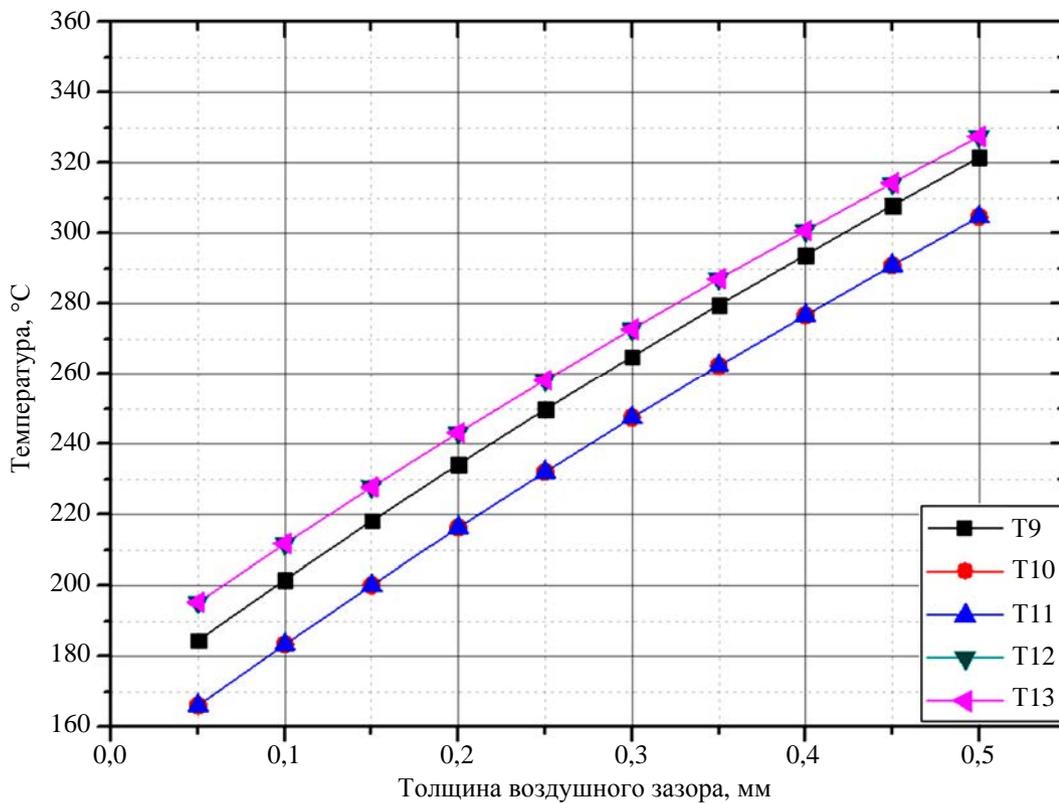


Рис. 8. Графики зависимости температуры ЗРИ от толщины воздушного зазора в контрольных точках измерения температур Т9–Т13 (рис. 4)

Заключение

В данной работе представлены результаты расчетного определения температуры в объеме составных узлов кассеты гамма-установки в зависимости от толщин воздушных зазоров, которые могут возникнуть при сборке конструкции и размещении ИИИ в кассете в условиях радиационного разогрева.

Вычислена тепловая мощность, выделяющаяся в каждом элементе конструкции. Получены значения минимальных и максимальных температур.

Проведенные теплофизические расчеты, а также испытание созданных макетов позволили обосновать работоспособность конструкции ГУ в части ее безопасной эксплуатации. Прделанная работа позволяет сделать следующие выводы:

– для разработанной конструкции кассеты получено подтверждение недопущения перегрева источников гамма-излучения;

– разработанная конструкция, а также подобранные материалы кассеты позволили исключить необходимость дополнительного охлаждения ИИИ, тем самым повысить надежность гамма-установки в целом;

– толщина воздушного зазора между стаканом кассеты и расположенным внутри ИИИ должна быть не более 0,50 мм.

Список литературы

1. Firestone R. B. Table of Radioactive Isotopes. – University of California. Lawrence Berkeley National Laboratory, 1998.

2. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П. и др. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов // ВАНТ. Серия: Математическое моделирование физических процессов, 2011, № 1, с. 17–25.

3. Иванов Г. Н. Тепловые свойства веществ: Справочная таблица. – М.: ЦНИИ-атоминформ, 1979. 173 с.

4. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др. Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

5. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. 520 с.

6. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1967. 345 с.

Контактная информация

Щербакова Кристина Александровна,
младший научный сотрудник,
РФЯЦ-ВНИИЭФ
e-mail: otd4@expd.vniief.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2022, вып. 4, с. 101–109.