

УДК 621.039.84:620.169.2

PACS: 62.20.mq, 62.20.F-, 87.53.Bn

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-121-128

EDN: XGFGZB



Конечно-элементный количественный анализ устойчивости портативной аппаратуры радиографического контроля к факторам транспортной аварии

А. С. Декопов, А. А. Лукьянов, С. П. Масленников, С. В. Михайлов

Предложен к рассмотрению метод количественной конечно-элементной верификации устойчивости портативной аппаратуры радиографического контроля к факторам транспортной аварии на этапе автоматизированного проектирования математической твердотельной модели радиационной головки затворного типа с использованием программных комплексов: «ЗЕНИТ-95» и «LS-DYNA».

Ключевые слова: устойчивость, аварийное транспортирование, программный комплекс, моделирование ударных и термических воздействий, конечно-элементные расчеты.

Строительство, ремонт и эксплуатация АЭС сопряжена с риском выхода из строя оборудования и возникновения аварийных ситуаций. Требования предъявляемые к повышенной надежности элементов, узлов, агрегатов и сборок оборудования АЭС обусловлены эксплуатационными факторами и санитарными нормами биологической защиты персонала и окружающей среды.

Надежность и безопасность оборудования АЭС наряду с введением современных конструктивно-технологических решений обеспечивается путем контроля качества эле-

ментов оборудования. Одним из методов контроля в сфере атомной, а также других отраслей промышленности является радиографический. При неразрушающем контроле радиографическим методом основным рабочими инструментом является гамма-дефектоскоп [1–6].

Устойчивость конструктивно-технологических решений портативной радиографической аппаратуры нового поколения затворного типа [5–11] к факторам аварийного транспортирования [12–14] является одной из ключевых задач создания изделий данного класса. Настоящая работа рассматривает результаты использования математического метода конечных элементов (МКЭ), используемого при решении задач механики деформируемого твердого тела и теплопередачи посредством компьютерного моделирования физических процессов поведения изделия в экстремальных условиях.

Потребность виртуальной количественной оценки устойчивости вновь разрабатываемых составных частей гамма-дефектоскопа переносного класса к условиям аварийного транспортирования (свободное падение с высоты на мишень, тепловое воздействие огня) на проектной стадии в значительной мере обусловлена необходимостью сокращения расходов на полномасштабное макетирование технических решений и тестовые аварийные испытания.

Декопов Андрей Семенович¹, консультант, к.т.н.
E-mail: 16deko29@mail.ru

Лукьянов Александр Андреевич^{1,2}, аспирант.
E-mail: sasha-lyk@bk.ru

Масленников Сергей Павлович², доцент, д.т.н.
E-mail: spmaslennikov@mephi.ru

Михайлов Сергей Владимирович¹, директор СКБ.
E-mail: svm@jscemi.ru

¹ Акционерное общество «Энергомонтаж Интернэшнл». Россия, 107078, Москва, Красноворотский проезд, 2, стр. 1.

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31.

Статья поступила в редакцию 3.04.2023

После доработки 20.04.2023

Принята к публикации 26.04.2023

© Декопов А. С., Лукьянов А. А., Масленников С. П., Михайлов С. В., 2023

Натурные испытания вновь разрабатываемых средств радиографического контроля (СРК) со свободным падением с высоты на мишень и тепловым воздействием огня согласно [12] на стадии проектирования представляются проблематичными в связи с:

- трудоемкостью изготовления множества полномасштабных тестовых образцов аппаратуры для получения достаточной информации о состоянии объекта контроля при его ударном контакте с мишенью различными точками соприкосновения;
- дефицитом поверенного стендового оборудования и аттестованного персонала для квалифицированной оценки результатов испытаний;
- повторными испытаниями после конструктивных изменений;
- ограниченным массивом статистики о максимально достигнутых повреждениях в условиях лимитированного количества натуральных тестовых образцов;
- необходимостью захоронения испытанных образцов с блоками защиты из обедненного урана в качестве радиоактивных отходов;
- существенными временными и финансовыми затратами.

Вместе с этим, производство опытных образцов, оснащаемых радионуклидными излучателями, без обосновывающего подтверждения состоятельности проектных решений к экстремальным условиям транспортирования безусловно является рискованным.

Необходимые обоснования с неограниченным количеством возможных вариантов испытаний могут быть получены виртуально на проектной стадии с использованием современных программных комплексов, реализующих при конечно-элементных расчетах графически визуализированную количественную информационную базу поведения элементов твердотельной модели в различном конструктивном исполнении.

В частности, оценка радиационной головки (РГ) гамма-дефектоскопа на соответствие условиям аварийного транспортирования получена с использованием многофункциональных программных комплексов (ПК) конечно-элементных расчетов «LS-DYNA» и «ЗЕНИТ-95».

Объектом количественного анализа устойчивости основного функционального узла гамма-дефектоскопа переносного класса к воздействию факторов транспортной аварии методом конечно-элементных расчетов в настоящей работе является условно содержащая радионуклидный излучатель математическая твердотельная модель РГ переносного класса серии «Стапель 5» (рис. 1), виртуально подвергаемая воздействию факторов транспортной аварии:

- падение с высоты на мишень;
- тепловое воздействие огня.

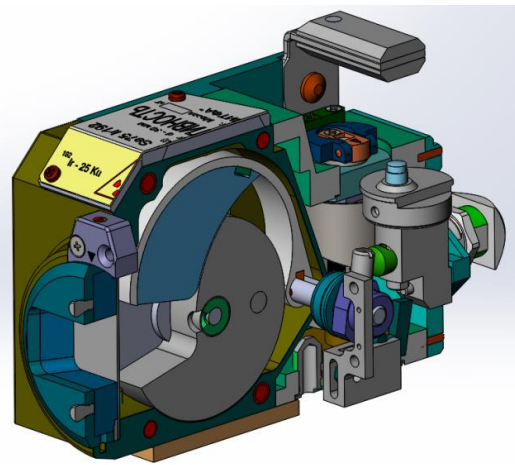


Рис. 1. 3D-модель радиационной головки в разрезе

3D-модель РГ в качестве основной функциональной части гамма-дефектоскопа представляет логически связанную систему элементов, состояние которых может быть описано множеством дифференциальных уравнений, при решении которых с использованием цифровых технологий определяются напряжения, деформации и зоны термического воздействия, позволяющие количественно оценить механическую прочность и термоустойчивость конструктивных решений изделия.

Анализ представленной модели (рис. 1), выполняемый методом конечно-элементных расчетов в указанных программных комплексах, реализуется с учетом следующих положений:

- конечно-элементная модель РГ представляет собой систему элементов типа «объёмный элемент»;
- контактное взаимодействие учитывается для всех элементов конструкции;

– исследования составных компонентов РГ на устойчивость к воздействию эффектов аварийного транспортирования производится в условии функционирования всех блокирующих систем;

– моделирование падения сборной РГ учитывает нормы регламента затяжки резьбовых соединений корпусных элементов, равной половине предела текучести (320 МПа), при допустимом напряжении, соответствующем пределу прочности (880 МПа);

– модуль упрочнения использованных материалов при отсутствии справочных данных определяется выражением $E_y = (\sigma_b - \sigma_{0,2}) \delta^{-1}$, где σ_b – предел прочности, МПа; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести, МПа; δ – относительное удлинение, %;

– напряженно-деформированное состояние конструкций РГ исследуется применительно к случаям свободных падений в различных положениях, а их устойчивость к динамическим нагрузкам осуществляется сравнением полученных напряжений с соответствующими допускаемыми значениями;

– моделирование внешнего теплового воздействия в течение 30 мин при температуре 1073 К (800 °С) производится применительно к модели РГ с начальной температурой 22 °С

до момента выравнивания температуры во всех элементах.

В последующем 3D-модель исследуемой РГ импортируются в ПК «ЗЕНИТ-95» и «LS-DYNA», учитывающие граничные условия воздействий, прочностные и теплофизические свойства элементов конструктивных сопряжений (таблица) при решении задач механики деформируемого твёрдого тела и теплообмена.

В работе представлены результаты конечно-элементного анализа с количественной оценкой конструктивно-прочностной устойчивости РГ при падении с высоты и термических нагрузках.

Количество узловых соединений в конечно-элементной модели РГ составляет 505040.

При вертикальном падении на плоскую мишень начальная скорость взаимодействия исследуемой РГ с плоской мишенью составляла $V_0 = 12,85$ м/с.

Визуализированный результат оценки устойчивости РГ к ударному вертикальному взаимодействию основанием и лицевой стороной с плоской мишенью ПК «LS-DYNA» количественно представлен в виде эпюры распределений расчетных напряжений в объеме конечно-элементных моделей (рис. 2).

Таблица

	Уран (ТУ95.2054-2003)	ВНЖ-95	Сталь	Сталь, болт (Класс 8.8)	Д16	ВТ1-0	Бр.КМц3-1
Плотность, ρ , кг/м ³	19000	18000	7800	7800	2770	4505	8300
Теплоемкость, C_p , Дж/(кг·К)	124	134	462	462	922	540	385
Теплопроводность, λ , Вт/(м·К)	20	120	47	47	130	18,85	401
Модуль Юнга, E , Па	2e11	3e11	2,1e11	2,1e11	0,72e11	0,96e11	1,1e11
Коэффициент Пуассона, ν	0,23	0,28	0,3	0,3	0,33	0,36	0,34
Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	280	690	520	640	245–275	420	100–200
Модуль упрочне- ния, E_y , МПа	3000	2500	810	1142	1000	1500	1000
Предел прочности, σ_b , МПа	580	940	640	880	345–420	570	650–750
Относительное удлинение, δ , %	8,5	8–12	21	21	3–7	10	10

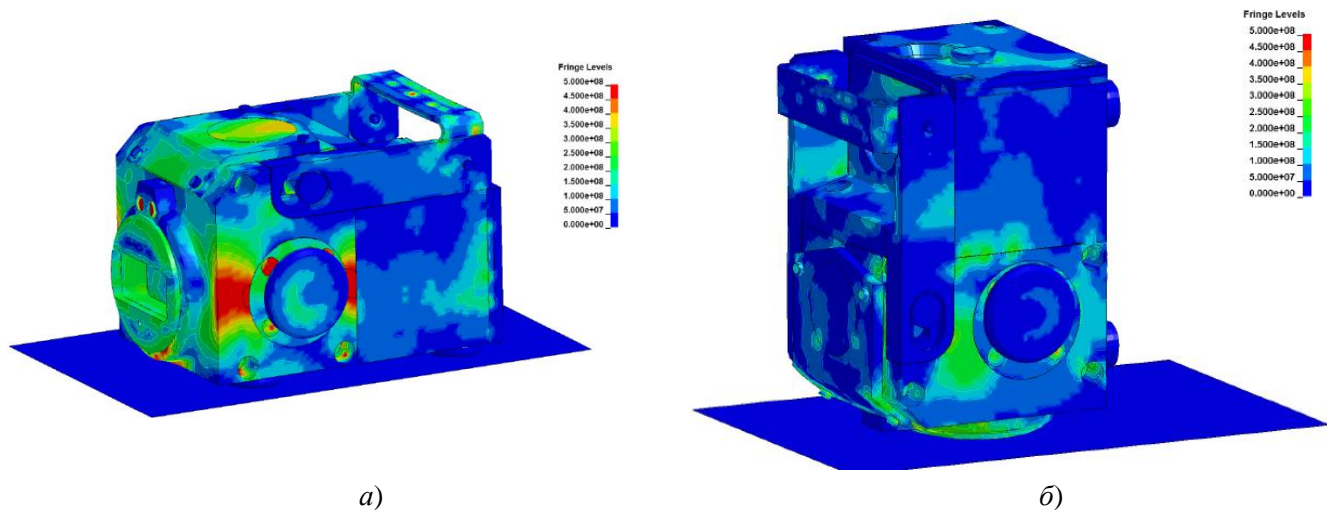


Рис. 2. Эпюра распределения напряжений в модели РГ при вертикальном ударном взаимодействии с плоской мишенью: а) – основанием ($t = 0,6$ мс); б) – лицевой стороной ($t = 0,4$ мс)

Устойчивость конструктивного исполнения моделей РГ к указанным ударным воздействиям на проектной стадии оценивается посредством сравнительного количественного анализа максимальных напряжений в том числе в критических зонах, например, по центральному сечению РГ с учетом множества различных вариантов контакта с плоской мишенью и соответственно визуализированной картины относительных деформаций элементов конструкции.

В частности, применительно к критической зоне повышенного интереса по центральному сечению РГ ПК «LS-DYNA» визуализирована эпюра (рис. 3) ожидаемого количественного распределения напряжений для случаев ударного взаимодействия модели с плоской мишенью при вертикальном взаимодействии основанием и лицевой стороной.

Максимальные значения интенсивности напряжений в элементах конструкции блока биологической защиты от радиоактивного излучения при падении на основание и лицевую сторону меньше допускаемых и составляют 470 МПа и 495 МПа соответственно.

Результатами расчетов модели РГ в различных вариантах соударений с плоской мишенью при падениях с высоты 9 м подтверждена сохранность закрытого радионуклидного источника излучения в блоке биологической защиты в герметизированном состоянии, целостность блока защиты и затворного узла и гарантирована стабильность мощности экспозиционной дозы (МЭД) гамма-излучения в рамках установленных санитарных норм.

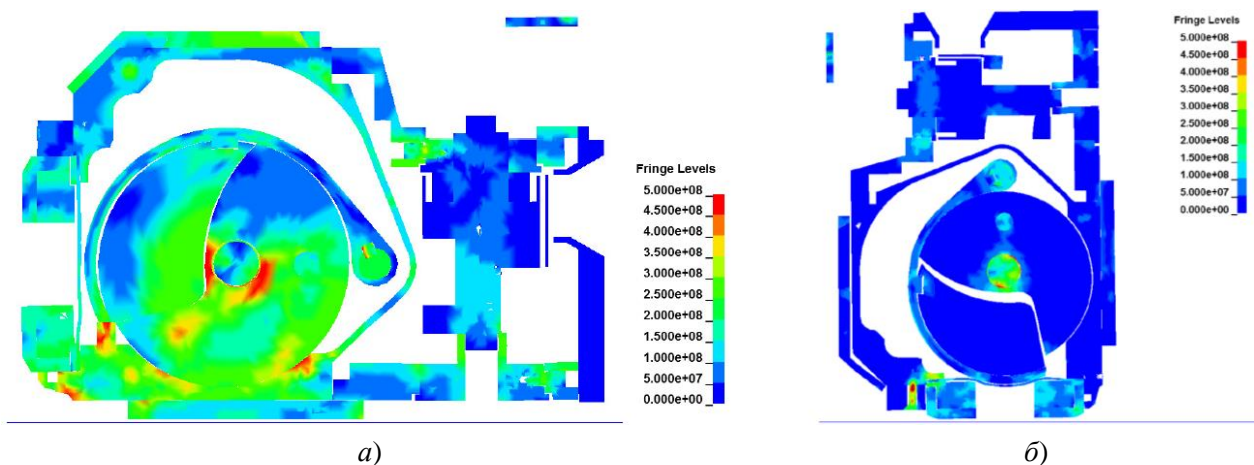


Рис. 3. Эпюра распределения напряжений по центральному сечению РГ при вертикальном ударном взаимодействии модели с плоской мишенью: а) – с основанием в момент времени $t = 0,6$ мс; б) – лицевой стороной с плоской мишенью в момент времени $t = 0,4$ мс

Для получения более полной информационной базы данных о прочностных свойствах РГ и ее состоянии при сложных ударных контактах с мишенью различными точками соприкосновения осуществлен конечно-элементный анализ с количественной оценкой конструктивно-прочностной устойчивости РГ при падении на стальную мишень в виде цилиндра с высоты 1 м (рис. 4) согласно [12] с

начальной скоростью взаимодействия РГ с барьером равной $V_0 = 4,42$ м/с.

Результат оценки устойчивости объектов исследований к вертикальному взаимодействию ребром и углом с металлическим цилиндром в ПК «LS-DYNA» количественно представлен в виде эпюры распределений расчетных напряжений в объеме конечно-элементных моделей (рис. 5).

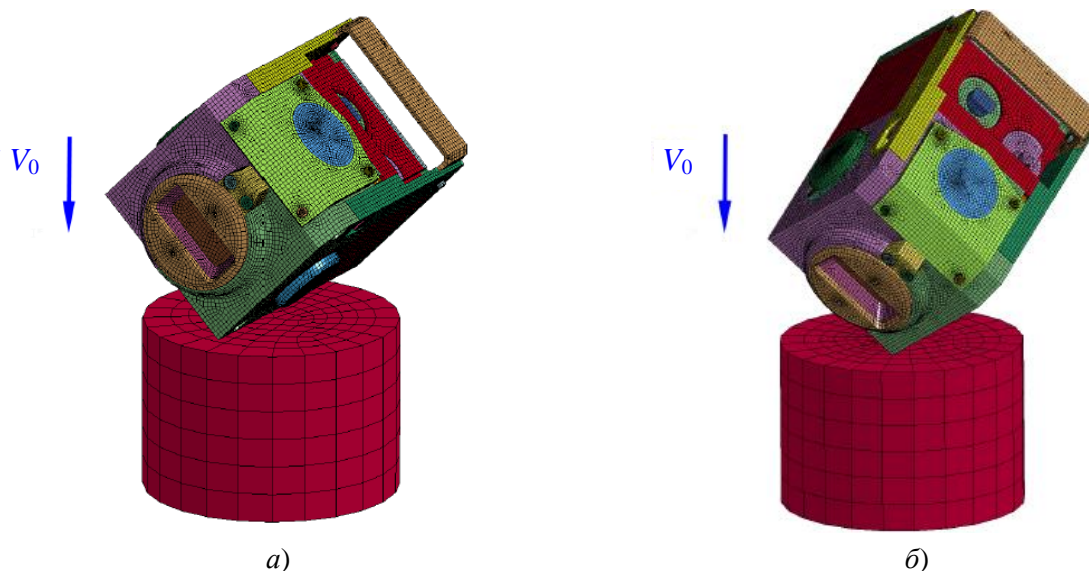


Рис. 4. Расчетная модель падения РГ на мишень в момент времени $t = 0$ мс: а) – нижним ребром; б) – углом

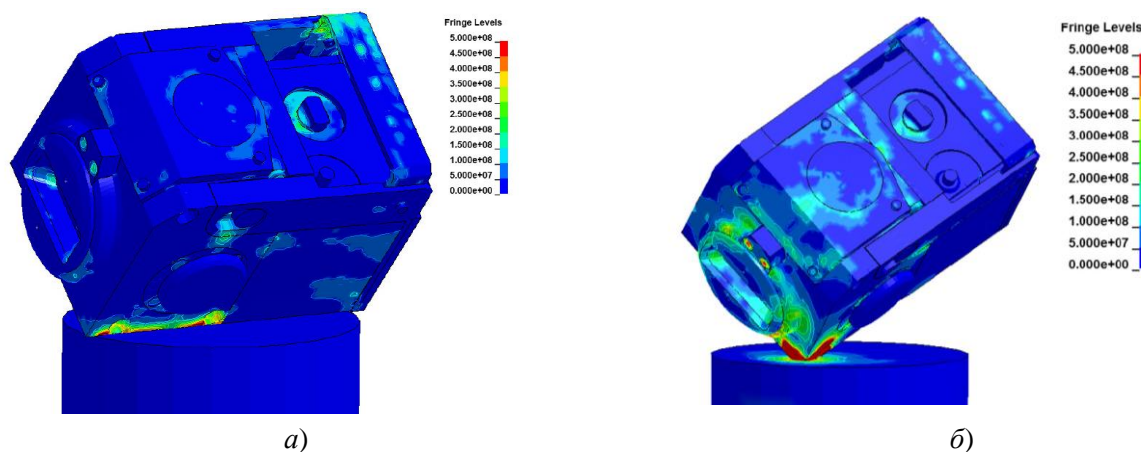


Рис. 5. Эпюра распределения напряжений в модели РГ при вертикальном взаимодействии с мишенью ($t = 0,4$ мс): а) – ребром; б) – углом

Максимальное значение интенсивности напряжений в элементах обеспечивающих защиту от радиоактивного излучения конструкции при падении на ребро составляет 410 МПа и 430 МПа при падении на угол, данные значения меньше допускаемых, что на проектной стадии свидетельствует о гарантирован-

ной механической прочности элементов защиты РГ.

Таким образом, результатами виртуальной количественной оценки устойчивости вновь модели радиационной головки в различных вариантах соударений с плоской мишенью при падениях с высоты 9 м и металли-

ческим цилиндром при падениях с высоты 1 м подтверждена сохранность закрытого радионуклидного источника излучения в блоке биологической защиты, целостность блока защиты и затворного узла.

Устойчивость к тепловому воздействию на примере конечно-элементной модели РГ

(см. рис. 1), представляющей собой систему элементов типа «объёмный элемент» с общим количеством узловых соединений 557973, количественно подтверждена ПК «ЗЕНИТ-95» в визуальном графическом отображении (рис. 6). Расчет производился неявным методом интегрирования по времени.

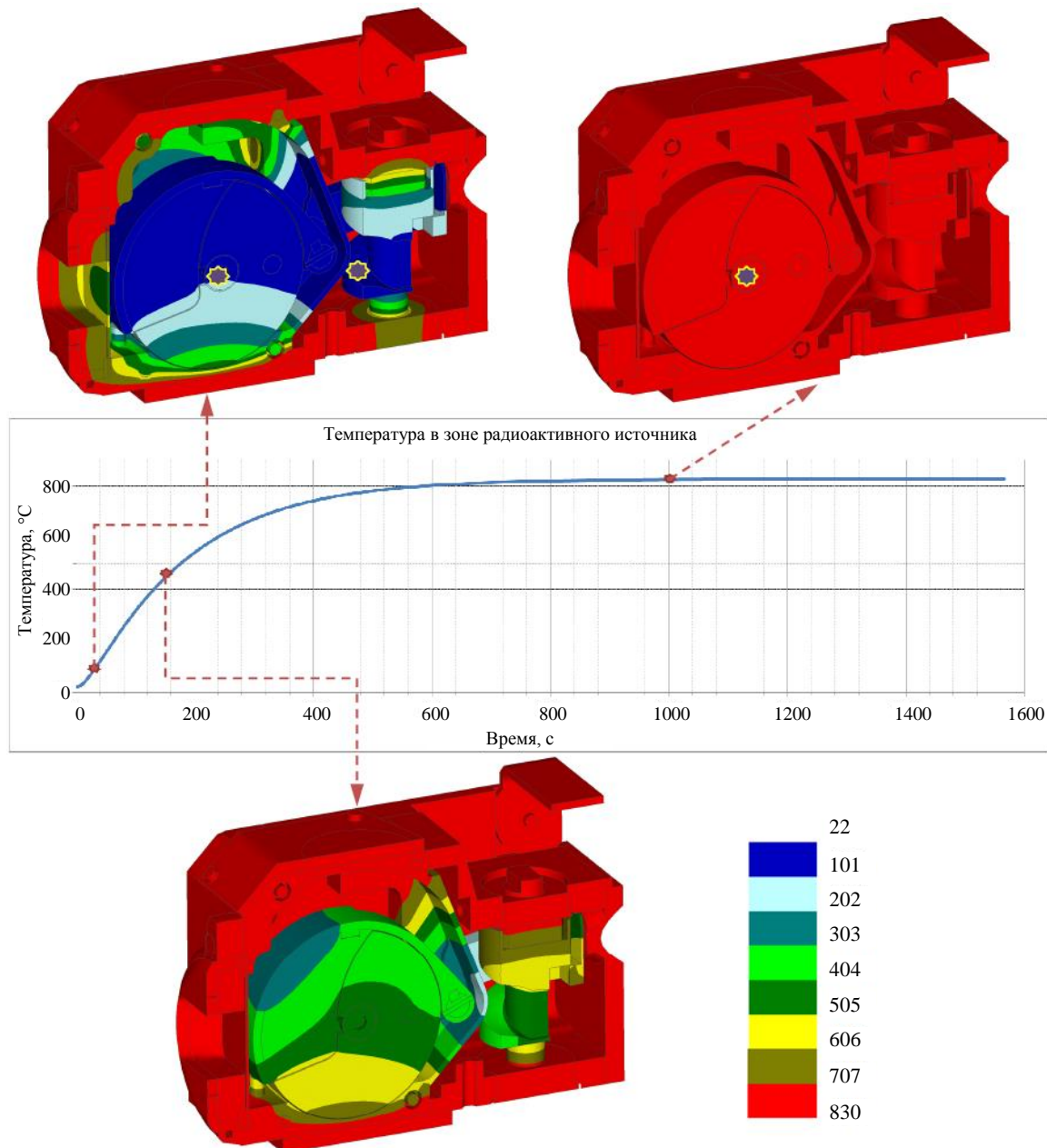


Рис. 6. Распределение температур (°C) модели радиационной головки во временном диапазоне: 41 с, 167 с и 1015 с

Условиями моделирования эффекта теплового воздействия с начальной температуры 22 °C на внешние поверхности радиационной головки до момента установления постоянной

температуры во всех элементах конструкции объекта предусмотрены:

– конвективный теплообмен с потоками пламени с температурой $T_{пл} = 827$ °C при ко-

эффиценте теплоотдачи поверхности объекта $\alpha = 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

– нагрев излучением внешней среды с температурой пламени $T_{\text{пл}} = 827 \text{ °С}$ и коэффициентом излучения поверхности объекта $\varepsilon = 0,3$.

Равномерный прогрев всех элементов модели радиационной головки массой не более 15 кг при тепловом воздействии огня наступает только через 1000 с (16 мин 40 с). При этом равномерный температурный фон не достигает температур плавления элементов корпуса и защиты в течение 30 мин, что подтверждает устойчивость объекта к тепловому воздействию, в том числе в аварийных условиях при транспортировании вне транспортной упаковки.

Выводы

1. Виртуальная верификация устойчивости вновь разрабатываемой аппаратуры к экстремальным условиям транспортирования с использованием цифровых технологий конечно-элементных расчетов позволяет получить количественную информационную базу данных поведения элементов твердотельных моделей исследуемых объектов для оптимизации технических решений на ранней стадии конструирования без использования трудоемкого ресурса натурных испытаний.

2. Использование технологий конечно-элементной верификации реализует возможность форсированного освоения выпуска образцов радиационной техники для опытно-промышленной апробации в реальных условиях эксплуатации.

3. Технология виртуальной оценки вновь разрабатываемой аппаратуры допускает подтверждение достоверности результатов оценки вновь разрабатываемой аппаратуры использованием дублирующих программных

комплексов конечно-элементных расчетов и минимизирует влияние человеческого фактора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скоморохов А. О., Нахабов А. В., Белоусов П. А. / Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2009. № 3. С. 29–36.
2. Саушкина Н. А., Саункин В. Т., Чухов А. А. / Глобальная ядерная безопасность. 2015. № 1 (14). С. 32–27.
3. Декопов А. С., Михайлов С. В., Лукьянов А. А., Крошкин Е. Н. / В мире неразрушающего контроля. 2021. № 3 (93). С. 52–56.
4. Майоров А. Н. и др. Радиоизотопная дефектоскопия (методы и аппаратура). – М.: Атомиздат, 1976. С. 71–73.
5. Декопов А. С., Михайлов С. В., Буданов И. А., Фирстов В. Г. / В мире неразрушающего контроля. 2015. № 2 (68). С. 62–66.
6. Хорошев В. Н., Декопов А. С., Никольский С. И., Федотов В. И., Косицын Е. М., Волчков Ю. Е. Гамма-дефектоскоп. Патент № 2418290 (РФ). 2010.
7. Декопов А. С., Федотов В. И., Хорошев В. Н., Косицын Е. М., Гуськов В. К. Гамма-дефектоскоп. Патент № 2477463 (РФ). 2011.
8. Декопов А. С., Крошкин Е. Н., Лукьянов А. А. / Вопрос атомной науки и техники. Серия: Техническая физика и автоматизация. 2021. Вып. 95. С. 4–15.
9. Гамма-дефектоскоп «Стапель-5» // Энциклопедия по машиностроению XXL. [Электронный ресурс]. URL <https://mash-xxl.info/pics/34397/>
10. Декопов А. С., Михайлов С. В., Лукьянов А. А. Гамма-дефектоскоп затворного типа. Патент № 2742632 (РФ). 2020.
11. Васильев А. В., Декопов А. С., Лукьянов А. А., Михайлов С. В., Черепанов А. В., Юшкин М. А., Баранов А. В. Гамма-дефектоскоп затворного типа. Патент № 2791427 (РФ). 2022.
12. ГОСТ 23764-79. Гамма-дефектоскопы. Общие технические условия. – М.: ИПК Изд. стандартов, 2005.
13. НП-053-16. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии "Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов".
14. ISO 3999:2004. Защита радиационная. Аппаратура для гаммардиографии. Технические требования к эксплуатационным показателям, проектированию и испытаниям.

Finite-element quantitative analysis of the stability of portable radiographic control equipment to the factors of a transport accident

A. S. Dekopov¹, A. A. Lukyanov^{1,2}, S. P. Maslennikov² and S. V. Mikhailov¹

¹ Joint Stock Company «Energomontazh International»
Bd. 1, 3 Krasnovorotsky proezd, Moscow, 107078, Russia
E-mail: sasha-lyk@bk.ru

² National Research Nuclear University MEPhI
31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia

Received 3.04.2023; revised 20.04.2023; accepted 26.04.2023

A method for quantitative finite element verification of the stability of portable radiographic monitoring equipment to the factors of a transport accident at the stage of automated design of a mathematical solid-state model of a shutter-type radiation head using software systems: "ZENIT-95" and "LS-DYNA" is proposed for consideration.

Keywords: stability, emergency transportation, software package, simulation of shock and thermal effects, finite element calculations.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-121-128

REFERENCES

1. Skomorokhov A. O., Nakhobov A. V. and Belousov P. A., Proceedings of Higher Educational Institutions. Nuclear Power Engineering, № 3, 29–36 (2009).
2. Saushkina N. A., Saunkin V. T. and Chukhov A. A., Global Nuclear Security, № 1 (14), 32–27 (2015).
3. Dekopov A. S., Mikhailov S. V., Lukyanov A. A. and Kroshkin E. N., In the world of nondestructive testing, № 3 (93), 52–56 (2021).
4. Mayorov A. N. et al., Radioisotope Defectoscopy (Methods and Equipment), Moscow, Atomizdat, 1976, pp. 71–73.
5. Dekopov A. S., Mikhailov S. V., Budanov I. A. and Firstov V. G., In the world of nondestructive testing, № 2 (68), 62–66 (2015).
6. Khoroshev V. N., Dekopov A. S., Nikol'skii S. I., Fedotov V. I., Kositsyn E. M. and Volchkov Yu. E. Gamma detector. Patent № 2418290 (RF). 2010.
7. Dekopov A. S., Fedotov V. I., Khoroshev V. N., Kositsin E. M. and Gus'kov V. K. Gamma detector. Patent № 24774638 (RF). 2011.
8. Dekopov A. S., Kroshkin E. N. and Luk'yanov A. A., Matter of atomic science and technique, № 95, 4–15 (2021).
9. Gamma-defectoscope "Stapel-5". Encyclopedia of Mechanical Engineering XXL. Electronic resource: <https://mash-xxl.info/pics/34397/>
10. Dekopov A. S., Mikhailov S. V. and Luk'yanov A. A. Gamma-defectoscope of the shutter type. Patent № 2742632 (RF). 2020.
11. Vasil'ev A. V., Dekopov A. S., Luk'yanov A. A., Mikhailov S. V., Cherepanov A. V., Yushkin M. A. and Baranov A. V. Gamma-defectoscope of shutter type. Patent № 2791427 (RF). 2022.
12. GOST 23764-79. Gamma detectors. General specifications.
13. NP-053-16. Federal norms and rules in the field of atomic energy use "Safety rules for transportation of radioactive materials.
14. ISO 3999:2004. Radiation protection. Apparatus for gammaradiography. Technical requirements for performance, design and testing.