

УДК 533.6.05

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СКОРОСТНОЙ ВИДЕОКАМЕРЫ, УСТАНОВЛЕННОЙ НА РАКЕТНОМ ПОЕЗДЕ

© 2020 г. С. И. Герасимов<sup>1,2,\*</sup>, В. И. Ерофеев<sup>1</sup>, В. А. Кикеев<sup>1</sup>, О. В. Кривошеев<sup>2</sup>, В. И. Костин<sup>1</sup>, И. А. Одзерихо<sup>1,2</sup>, Р. В. Герасимова<sup>2</sup>, А. А. Глухов<sup>2</sup>, В. В. Писецкий<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, 603024, Россия

<sup>2</sup> Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров, 607186, Россия

\*e-mail: s.i.gerasimov@mail.ru

Поступила в редакцию 28.10.2019 г.

После доработки 28.10.2019 г.

Принята к публикации 10.12.2019 г.

Любая перевозка отработанного ядерного топлива представляет собой сложную многофакторную задачу, требующую согласования взаимодействия при использовании большого числа технических средств: специализированных транспортных контейнеров, крепежных приспособлений, перегрузочных приспособлений, захватов, демпферов, спецвагонов. Одним из способов решения подобных задач является проведение испытаний макета топливного упаковочного комплекта в условиях, имитирующих авиационную аварию (столкновение с жесткой преградой со скоростью 90 м/с). В данной статье представлена постановка испытаний с использованием возможностей ракетного трека. Выполнен расчет аэродинамического обтекания участка блока видеорегистрации в условиях аэробаллистического эксперимента. Произведена оценка прочности и собственных частот регистрирующей аппаратуры, используемой в аэробаллистическом эксперименте. Методом конечных элементов был произведен модальный расчет регистрирующей аппаратуры. Были получены 10 форм свободных колебаний регистрирующей аппаратуры. Сделан вывод о работоспособности аппаратуры. Приведенные расчеты позволили установить скоростную камеру на ступень ракетного поезда для повышения информативности в опыте для получения кадров разгона и отделения топливного упаковочного комплекта. Приводятся кадры разгона и отделения топливного упаковочного комплекта от ракетного поезда, снятые камерой с борта. Проведенные исследования позволили обосновать и применить скоростную съемку с борта разгонной ступени ракетного поезда при моделировании авиационной аварии для испытания транспортно-упаковочных комплектов по нормам МАГАТЭ.

**Ключевые слова:** топливный упаковочный комплект, аэробаллистические испытания, аэробаллистическая трасса, численное моделирование аэродинамических процессов, конечно-элементное моделирование, прочностной анализ, модальный анализ

**DOI:** 10.1134/S2304487X20010034

Обеспечение безопасности транспортирования радиоактивных веществ, ядерных делящихся материалов и изделий на их основе имеет большое значение в связи с наличием потенциального риска нанесения ущерба людям, окружающей среде и имуществу в процессе перевозки, выполнения погрузочно-разгрузочных операций и промежуточного хранения. Выбор воздушного транспорта для международных перевозок позволяет снять сразу несколько проблем, связанных с транзитными странами: исчезает необходимость в многосторонних международных транзитных соглашениях, упрощаются таможенные процедуры, облегчается задача обеспечения физзащиты, существенно сокращаются затраты на многосто-

роннее утверждение сертификатов-разрешений на конструкцию упаковки и перевозку отработанного ядерного топлива и оформление разрешительных документов в транзитных странах. Виды испытаний, которые должна выдержать упаковка в нормальных условиях перевозки, являются едиными и не зависят от вида используемого транспорта. Для достижения указанной цели необходимо, в том числе, проведение испытаний макета топливного упаковочного комплекта (ТУК) в условиях, имитирующих авиационную аварию (столкновение с жесткой преградой со скоростью 90 м/с).

Также требуются решения и согласования множества вопросов логистики (маршрут, места

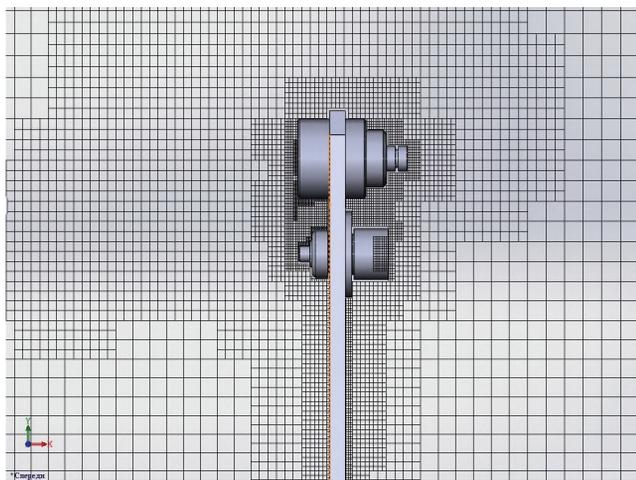


Рис. 1. Часть расчетной сетки при моделировании обтекания модели.

перегрузки, стыковки транспортных средств). Выбор воздушного транспорта для международных перевозок позволяет снять сразу несколько проблем, связанных с транзитными странами. Транспортные упаковочные комплекты, используемые для транспортировки и длительного хранения радиоактивных материалов и отработавшего ядерного топлива должны отвечать различным требованиям безопасности перевозки радиоактивных веществ. В частности, одним из них является обязательное проведение экспериментальной проверки головных образцов на соответствия конструкции требованиям, предъявляемым к упаковкам для воздушной перевозки РМ, указанным в п. 3.4.6.4 НП-053-04 [1] и п. 737 TS-R-1 [2].

Испытания представляют из себя разгон ТУК до требуемой скорости и последующее соударение с имитатором мишени. Для этого объект испытаний монтируется на ракетную тележку, способную перемещаться вдоль рельсовых направляющих, разгон тележки осуществляется ракетными двигателями [3, 4].

Для регистрации процесса разгона, полета и соударения используется как различная фотографическая аппаратура и различные методы визуализации аэродинамических процессов, так и средства видеорегистрации. Для получения качественных видеоданных необходимо обеспечить работоспособность видеооборудования, а также другой регистрирующей техники, монтируемой на блоке видеорегистрации.

Для того, чтобы оценить уровень давления, воспринимаемого аппаратурой на данной скорости, был произведен расчет обтекания конструкции потоком газа.

В качестве объекта моделирования выбрана модель части блока видеонаблюдения. В качестве

метода моделирования выбран метод численного решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, дополненный  $k$ - $\epsilon$ -моделью турбулентности. Этот метод реализован в современном инженерном программном пакете SolidWorks-FlowSimulation [5]. Пакет представляет собой комбинацию полной версии системы SolidWorks как графической среды, и гидрогазодинамического решателя FlowSimulation, препроцессор которого позволяет реализовывать автоматизированный или ручной метод блочного построения расчетной сетки и ее последующей адаптации в зонах больших градиентов параметров потока. Пакет FlowSimulation позволяет решать пространственные трехмерные задачи внешнего сверхзвукового обтекания твердых тел с учетом вязкости, теплопереноса, шероховатости стенки, степени турбулентности потока. В результате решения могут быть определены аэродинамические силы и моменты, действующие на обтекаемую поверхность объекта, получены все параметры обтекающего газа в расчетном объеме – поля давлений, плотностей, температур, скоростей. Полученные результаты могут выводиться в виде контурных распределений параметров течения в объеме и на поверхности тела и в виде соответствующих графиков для любого выбранного сечения.

Расчетная сетка, используемая в вычислениях в области крепления камеры и светочувствительного датчика к блоку видеорегистрации, приведена на рис. 1.

В результате аэродинамического расчета получены значения давления, воздействующего на камеру и светочувствительный элемент. Данные значения использовались в прочностном анализе элементов конструкции.

Конечно-элементная сетка, используемая в расчетах видеокамеры показана на рис. 2. Ограничения по перемещению прикладывались в местах крепления камеры к фундаменту блока видеорегистрации (по контуру корпуса). Давление, приложенное на фронтальные плоскости деталей взято из результатов аэродинамического анализа, проведенного ранее.

Контурные изображения полей напряжений и суммарного вектора перемещений показаны на рис. 3 и 4.

С целью оценки значений первых собственных частот конструкции производился модальный анализ КЭМ-камеры. Закрепления узлов при модальном анализе были приняты идентично прочностному анализу. В результате анализа получены и проиллюстрированы (рис. 5–7) первые моды собственных колебаний конструкции. Первая собственная частота (10.44 кГц) соответствует вертикальному перемещению задней части камеры, вторая частота (10.52 кГц) – поперечному.

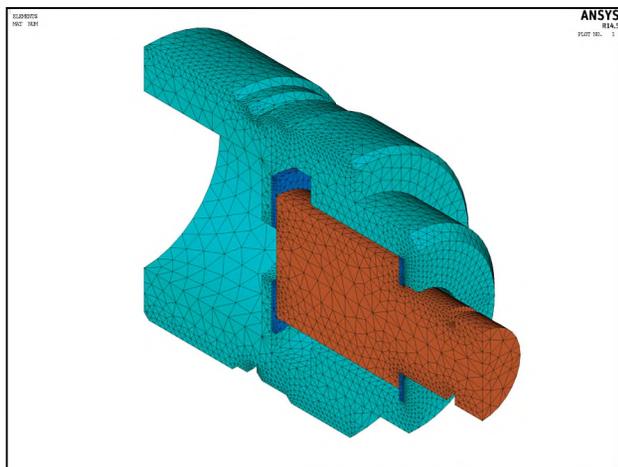


Рис. 2. Конечно-элементная сетка модели видеокамеры.

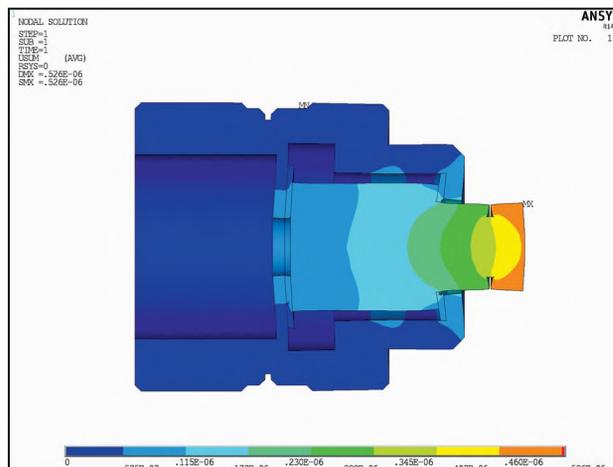


Рис. 3. Суммарный вектор перемещений модели видеокамеры.

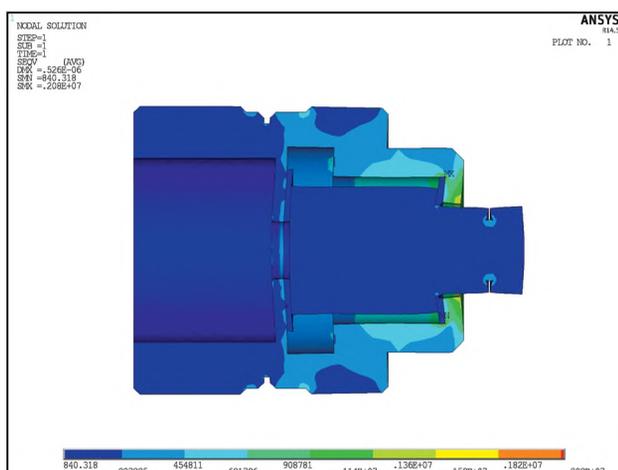


Рис. 4. Распределение эквивалентных по Мизесу напряжений в модели видеокамеры.

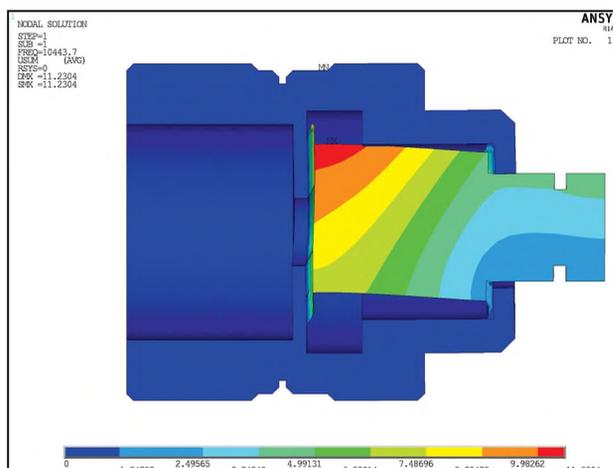


Рис. 5. Первая форма колебаний (10.44 кГц) камеры.

Третья собственная частота (10.86 кГц) соответствует повороту корпуса камеры относительно продольной оси.

В результате произведенных расчетов можно заключить, что уровень эквивалентных по Мизесу напряжений в элементах конструкции не превышает значения 13 МПа, что для материалов, используемых в конструкции блока видеорегистрации является допустимым.

Приведенные расчеты позволили установить скоростную камеру на ступень ракетного поезда для повышения информативности в опыте для получения кадров разгона и отделения ТУК. Постановка опыта была следующей. Разгон ТУК до заданной скорости по рельсовым направляющим ракетного трека и его столкновение с мишенью при заданном направлении и угле встречи обес-

печивались комплектом специальной оснастки, который включал в себя ракетную тележку (РТ) и элементы (башмаки), связывающие ТУК с рельсовыми направляющими ракетного трека. Передачи тяги к ТУК от РТ обеспечивалась за счет упора РТ.

Ракетная тележка снабжена тормозными башмаками, с помощью которых осуществляется ее связь с рельсовыми направляющими ракетного трека. Тормозные башмаки ракетной тележки оснащены пороховыми аккумуляторами давления для остановки тележки на заданном отрезке.

Разгон ракетного поезда осуществлялся твердотопливным ракетным двигателем, установленным на ракетной тележке. Ракетная тележка устанавливалась на 4 тормозных башмаках, содержащих по 2 пороховых аккумулятора давления.

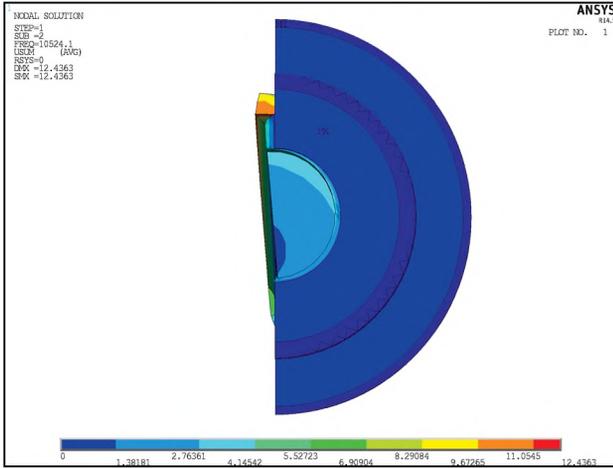


Рис. 6. Вторая форма колебаний (10.52 кГц) камеры.

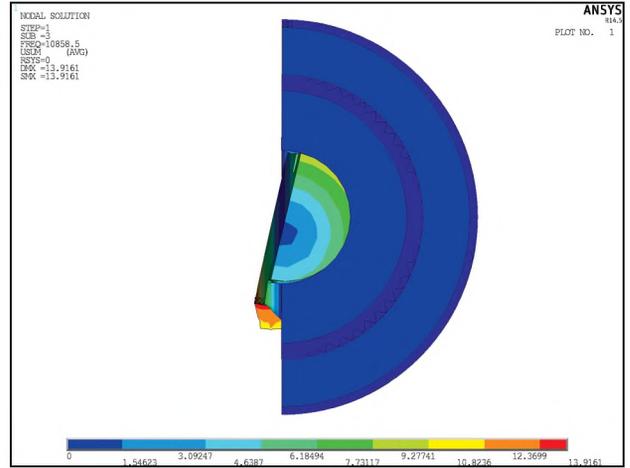


Рис. 7. Третья форма колебаний (10.86 кГц) камеры.

Непосредственное жесткое соединение между ракетной тележкой и ТУК отсутствовало.

После запуска ракетного двигателя ракетный поезд начал движение по рельсовым направляющим ракетного трека. По окончании работы ракетного двигателя и достижения ракетным поездом заданной скорости движения происходило задействование пороховых аккумуляторов давления тормозных башмаков и остановка РТ на рельсовых направляющих ракетного трека. При этом ТУК за счет полученного импульса продолжал движение по рельсовым направляющим. После схода с рельсовых направляющих ракетного трека

ТУК двигался в свободном полете до столкновения с мишенью.

Зависимости скорости движения и продольной перегрузки от времени приведены на рис. 8.

На рис. 9 представлены отдельные кадры отделения ТУК от тормозящегося ракетного поезда.

Проведенные исследования позволили обосновать и применить скоростную съемку с борта разгонной ступени ракетного поезда при моделировании авиационной аварии для испытания транспортно упаковочных комплектов по нормам МАГАТЭ. Это позволяет повысить информативность и достоверность подобных испытаний.

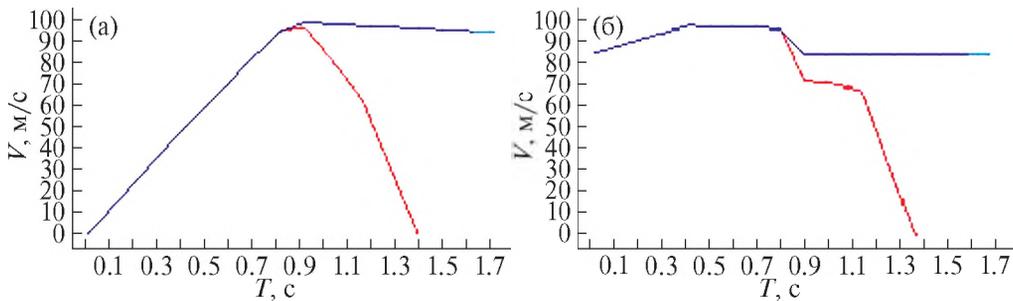


Рис. 8. Параметры движения ракетного поезда с ТУК, скорость движения (а), продольная перегрузка (б).



Рис. 9. Кадры разгона и отделения ТУК от ракетного поезда, снятые камерой с борта.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-2078.2019.8.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов: НП-053-04.-М., 2004. 70 с.
2. Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов. Требования безопасности: TS-R-1.-МАГАТЭ, Вена, 2009. 196 с.
3. Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kamchatnyi V.G., Odzerikho I.A. The Sliding Contact Condition in Stability Analysis of Stage Motion for a Rocket Sled Track Facility // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2018. V. 47. № 3. P. 221–226.
4. Герасимов С.И., Бутова С.В., Ерофеев В.И., Камчатный В.Г. Устойчивость движения высокоскоростных объектов по направляющим ракетного трека // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 1. С. 3–8.
5. [http://www.solidworks.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=151&Itemid=66](http://www.solidworks.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=151&Itemid=66)

---

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2020, vol. 9, no. 1, pp. 11–15

---

## Computational and Experimental Study of the Performance of a High-Speed Video Camera Installed on a Rocket Train

S. I. Gerasimov<sup>a,b,#</sup>, V. I. Erofeev<sup>a</sup>, V. A. Kikeev<sup>a</sup>, O. V. Krivosheev<sup>b</sup>, V. I. Kostin<sup>a</sup>, I. A. Odzerikho<sup>a,b</sup>, R. V. Gerasimova<sup>b</sup>, A. A. Glukhov<sup>b</sup>, and V. V. Pisetskiy<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 603024 Russia

<sup>b</sup> Sarov Physical Technical Institute, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Sarov, 607186 Russia

<sup>#</sup>e-mail: s.i.gerasimov@mail.ru

Received October 28, 2019; revised October 28, 2019; accepted December 10, 2019

**Abstract**—Any transportation of spent nuclear fuel is a complex multifactorial problem requiring the coordination of numerous technical means including specialized transport containers, fasteners, reloading devices, grippers, dampers, and special wagons. One of the ways to solve such problems is to test a prototype of the fuel package unit under conditions simulating an aviation accident (collision with a rigid barrier at a velocity of 90 m/s). Tests using the capabilities of a rocket track have been presented in this work. An aerodynamic flow around the section of a video recording unit has been calculated under the conditions of an aeroballistic experiment. The strength and natural frequencies of the recording instrument used in the aeroballistic experiment have been evaluated. The modal calculation of the recording instrument has been performed using the finite element method. Ten forms of free oscillations of the recording instrument have been obtained. It has been concluded that the instrument is performable. The calculations have allowed installing a high-speed camera on the stage of a rocket train to increase the information content in the experiment for obtaining frames of acceleration and separation of the fuel package unit. Photos of the acceleration and separation of the fuel packing kit from the rocket train taken by the aboard camera have been presented. The reported studies have made it possible to justify and apply high-speed shooting from the upper stage of the rocket train in the simulation of the aviation accident for testing transport packaging kits according to the IAEA standards.

**Keywords:** fuel package unit, aeroballistic tests, aeroballistic route, numerical simulation of aerodynamic processes, finite element simulation, strength analysis, modal analysis

DOI: 10.1134/S2304487X20010034

## REFERENCES

1. Pravila bezopasnosti pri transportirovanii radioaktivnykh materialov: NP-053-04.-М., 2004. 70 p.
2. Pravila bezopasnoy perevozki radioaktivnykh materialov. Trebovaniya bezopasnosti: TS-R-1.-МАГАТЭ, Вена, 2009. 196 p.
3. Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kamchatnyi V.G., Odzerikho I.A. The Sliding Contact Condition in Stability Analysis of Stage Motion for a Rocket Sled Track Facility // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2018, vol. 47, no. 3, pp. 221–226.
4. Gerasimov S.I., Butova S.V., Erofeev V.I., Kamchatnyi V.G. Ustoychivost' dvizheniya vysokoskorostnykh ob'yektov po napravlyayushchim raketnogo treka // Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin, № 1, 2015, pp. 3–8.
5. [http://www.solidworks.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=151&Itemid=66](http://www.solidworks.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=151&Itemid=66)