

УДК 621.421.37

Экспериментальное и расчетное исследование отклика на внешнее гармоническое воздействие модели оболочки ампулы для радиоактивных отходов с учетом их тепловыделения

А.В. Онуфриев, С.Н. Дмитриев, В.В. Онуфриев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Experimental and computational studies of the response of a radioactive waste ampoule shell model to an external harmonic action allowing for heat release

A.V. Onufriev, S.N. Dmitriev, V.V. Onufriev

Bauman Moscow State Technical University, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation.



e-mail: alexandr7@yandex.ru, dmitrievsn@mail.ru, onufryev@bmstu.ru



Особое место в проектировании космических аппаратов (КА) для транспортировки радиоактивных отходов (РАО) занимает исследование их упругих динамических свойств при рабочих температурах агрегатов, что связано с обеспечением возможности вывода КА ракетой-носителем в температурном режиме, близком к рабочему. Описано экспериментальное и расчетное исследование упругих динамических свойств модели ампулы для космической транспортировки РАО в режиме «самодоставка», когда РАО являются первичным источником энергии. Для экспериментального исследования был создан комплекс и разработана методика исследования упругих динамических свойств как «холодного» так и «горячего» состояний ампулы. В результате исследования определены экспериментальные амплитудно-частотные характеристики модели ампулы для различных температурных режимов. Впервые получены амплитудно-частотные характеристики модели ампулы с имитатором внутреннего тепловыделения в диапазоне температур 293...503 К. Методом конечных элементов рассмотрена и решена задача по определению частот и форм колебаний данной модели. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных результатов. Полученные результаты могут быть использованы при экспериментальной отработке элементов КА для транспортировки РАО и других специальных аппаратов.

Ключевые слова: космический аппарат, радиоактивные отходы, упругие динамические свойства, ампула, режим «самодоставка».



The analysis of elastic dynamic properties of a spacecraft for transporting radioactive waste at elevated operating temperatures is of great importance. This paper describes experimental and computational studies of the dynamic elastic properties of a radioactive waste ampoule shell model in the case when the radioactive waste is used as the primary source of energy. An experimental setup and a technique for the analysis of dynamic elastic properties of both «cold» and «hot» ampoules are developed. The frequency response of the ampoule model at various temperatures is experimentally studied. The amplitude-frequency characteristics of the ampoule model with internal heat release in the temperature range 293...503 K are first

determined. The finite element method is used to determine frequencies and mode shapes of the model. The calculated and experimental results are compared. The results can be used in the experimental development of spacecraft elements for transporting radioactive waste and other special purpose vehicles.

Keywords: spacecraft, radioactive waste, elastic dynamic properties, ampoule, self-delivery.

В настоящее время вопросам удаления радиоактивных отходов (РАО) в космос уделяется достаточно много внимания [1–3]. Проблема охватывает методики проектирования космического аппарата (КА), его проектный облик, конструктивно-компоновочную и конструктивно-силовую схемы, механические и динамические характеристики как КА в целом, так и его узлов и агрегатов в отдельности. Особое место отводится исследованию режима «самодоставка» [4–10], когда РАО является первичным источником энергии, которая обеспечивает осуществление транспортной операции в космосе. В этом случае температурный режим ампулы с РАО (как источника энергии) определяет эффективность конструкции не только с точки зрения КПД, но и с точки зрения ее механических и динамических свойств (термопрочность, частоты и формы колебаний), которые существенно влияют на конструкцию всего КА.

Цель работы — исследование упругих свойств модели оболочки ампулы с РАО при повышенных температурах.

Экспериментальный комплекс для исследования отклика на внешнее гармоническое воз-

действие модели оболочки ампулы в «холодном» и «горячем» состояниях. Для исследования отклика на внешнее гармоническое воздействие модели оболочки ампулы с РАО в «холодном» и «горячем» состояниях разработан экспериментальный стенд с различным диагностическим и измерительным оборудованием, представленный на рис. 1.

Экспериментальный стенд, представленный на рис. 1, включает в себя систему управления гармоническим воздействием SignalStar Vector II [11], которая представляет собой персональный компьютер с установленным на нем программным обеспечением ABAQUS, генератор и аппаратуру обработки сигнала отклика.

Стенд позволяет проводить экспериментальное исследование отклика на гармоническое воздействие с максимальной возбуждающей силой 310 Н в диапазоне частот 20...8 000 Гц. Масса электродинамического силовозбудителя составляет 42,7 кг.

Для исследования отклика на гармоническое воздействие «горячего» состояния модели оболочки ампулы с имитатором тепловыделения РАО использовалось следующее диагностическое оборудование:

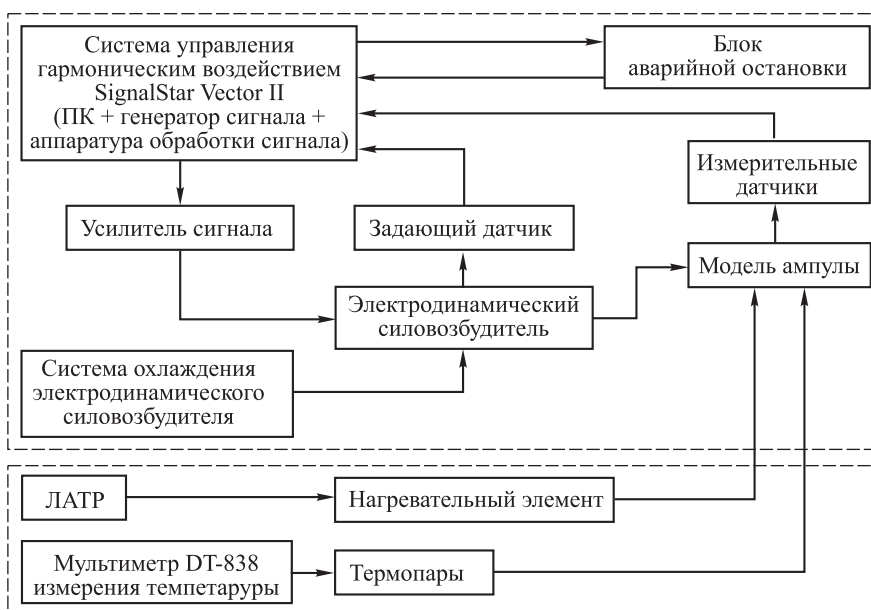


Рис. 1. Экспериментальный стенд для исследования отклика на внешнее гармоническое воздействие модели оболочки ампулы с имитатором тепловыделения РАО:

ЛАТР — лабораторный автотрансформатор

- электронные приборы DT-838 Digital Multimeter, позволяющие регистрировать и обрабатывать информацию о тепловом состоянии модели по сигналу с термопар, расположенных на внешней поверхности физической модели оболочки ампулы;

- персональный компьютер с установленным на нем программным обеспечением ABAQUS и аппаратуру обработки сигнала отклика; усилитель сигнала гармонического воздействия, набор измерительных датчиков.

В качестве модельного источника тепловыделения РАО использовался протяженный (1 500 мм) нагревательный элемент, размещенный внутри полости оболочки ампулы. Нагревательный элемент создавал тепловую нагрузку от 0 до 1 кВт посредством изменения напряжения питания от лабораторного автотрансформатора (ЛАТР).

Для поддержания рабочей температуры и работоспособности измерительных датчиков и штока электродинамического силовозбудителя при высокотемпературных исследованиях в стенде предусмотрена система охлаждения.

Общий вид экспериментального стенда с испытуемой моделью оболочки ампулы с имитатором тепловыделения РАО, ее оснастки, включая систему подвеса и амортизации, охлаждения, представлен на рис. 2.

Методика исследования отклика на внешнее гармоническое воздействие модели оболочки ампулы в «холодном» и «горячем» состояниях. Физическая модель оболочки ампулы, представляющая собой цилиндрическую трубу длиной 1,2 м и толщиной стенки 3 мм, вывешивалась горизонтально на амортизаторах; подвеска осуществлялась в местах крепления к амортизаторам, как показано на рис. 2. Для контроля теплового состояния в процессе экспериментального исследования к модели ампулы крепились термопары (хромель-алюмель), одна из которых располагалась в центре, вторая — на расстоянии 80 мм от торца. Еще две термопары (из того же материала) устанавливались на штоке силовозбудителя и измерительном датчике, их сигнал позволял контролировать тепловое состояние в процессе эксперимента. Хромель-алюмель, из которого выполнены термопары, обеспечил корректные результаты в диапазоне изменения температур стенки модели 20...230 °С (293...503 К). Измерительный датчик располагался в цен-

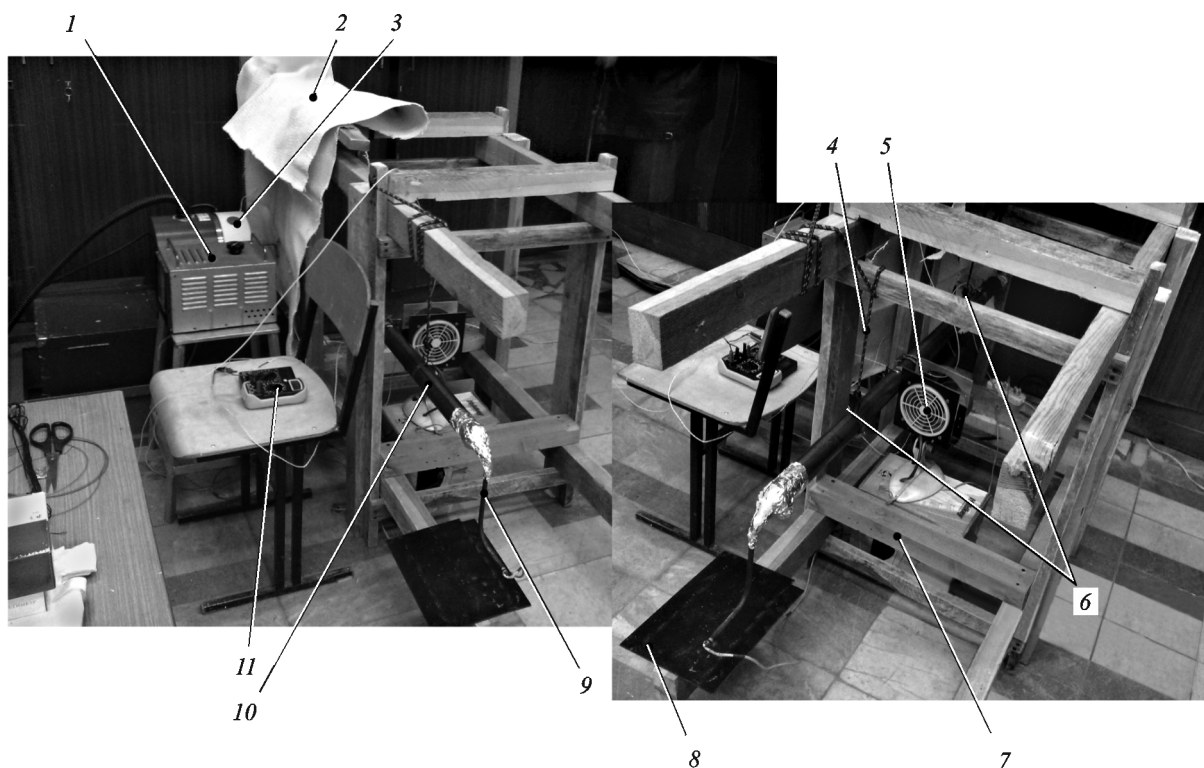


Рис. 2. Общий вид экспериментального комплекса

- 1 — ЛАТР; 2 — асбестостолитовая ткань; 3 — электродинамический силовозбудитель; 4 — система подвеса и амортизации; 5 — система охлаждения измерительных датчиков; 6 — место крепления ампулы к амортизаторам; 7 — оснастка; 8 — прокладка из текстолита; 9 — нагревательный элемент; 10 — модель ампулы; 11 — ДТ-838 Digital Multimeter

тре модели оболочки ампулы, а задающий датчик — на столе электродинамического силового возбудителя. Для обеспечения требуемого температурного режима измерительного датчика в процессе высокотемпературного эксперимента он был установлен на модели ампулы через термическое сопротивление, состоящее из двух слоев фторопласта и двух слоев асбестолитовой ткани.

Для снижения теплового потока, приходящего от модели, при исследовании электродинамический силовозбудитель прикрывался асбестолитовой тканью (рис. 2). Шток электродинамического силовозбудителя охлаждался посредством тряпичного фитиля малой массы (~ 5 г) с водой, который располагался вблизи места его крепления с моделью.

Характеристики электродинамического силового возбудителя марки GW-V55/PA300E представлены ниже:

- Maximum Sine Force — 310 Н;
- Maximum Random Force — 110 Н;
- Maximum Acceleration (Sine) — 63 g;
- Armature Mass — 0,5 кг;
- Armature Resonance +5 % — 7 000 Гц;
- Frequency Range — 8 000 Гц;
- Shaker Body Mass — 42,7 кг.

Система внутреннего охлаждения электродинамического силовозбудителя представляла собой вентилятор охлаждения SB 0140, а воздух, используемый в качестве охлаждающего хладагента, проходил через фильтр, находящийся внутри вентилятора.

Схема воздействия и измерения сигналов. Для исследования отклика на внешнее гармоническое воздействие физической модели в «горячем» состоянии тепловыделение РАО моделировалось с помощью нагревательного элемента трубчатого типа электрической мощностью 1 кВт (диаметром 11 мм и длиной 1 500 мм), который располагался внутри и фиксировался набором теплоизоляторов на основе углекислого кальция (мела) размерами 10×10×80 мм. Для исключения перемещений теплоизоляторы фиксировались прокладками из алюминиевой фольги. Для предотвращения перетекания воздуха торцы физической модели закрывались заглушками из алюминиевой фольги; это снизило потери тепла при нагреве. Нагревательный элемент запитывался от ЛАТР, что позволило регулировать тепловое состояние модели в процессе исследования ее упругих свойств. Контроль температуры в точках внешней стенки модели показал, что модель ампулы почти изотермична по всей длине (раз-

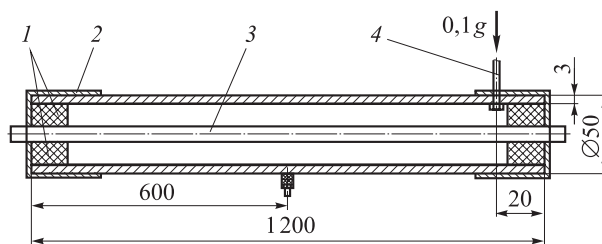


Рис. 3. Схема нагружения физической модели оболочки ампулы:

- 1 — углекислый кальций; 2 — фольга;
- 3 — нагревательный элемент; 4 — шток электродинамического силовозбудителя

ница температур на длине 600 мм составила 2...3 °С).

Система физического воздействия (нагружения) в экспериментальном исследовании отклика на внешнее гармоническое воздействие модели ампулы для РАО представляет собой источник гармонических колебаний, имеющий ускорение 0,1g (g — ускорение свободного падения), который передает гармоническое силовое воздействие с помощью штока силовозбудителя, прикрепленного на расстоянии 20 мм от торца физической модели оболочки ампулы.

Схема нагружения и регистрации отклика на гармоническое воздействие физической модели оболочки ампулы с имитатором тепловыделения РАО и измерительным датчиком ускорений представлена на рис. 3. Измерительный датчик ускорения устанавливался на расстоянии 600 мм от левого торца трубы.

Блок-схема программного обеспечения SignalStar Vector II для проведения экспериментальных исследований упругих свойств физической модели оболочки ампулы с имитатором тепловыделения РАО на гармоническое воздействие показана на рис. 4.

Размеры и массовые характеристики физической модели оболочки ампулы и других элементов стенда представлены в табл. 1.

Экспериментальное исследование отклика на внешнее гармоническое воздействие в «холодном» и «горячем» состояниях физической модели оболочки ампулы проводилось на основе методики SignalStar Vector II, позволяющей измерять и обрабатывать результаты с помощью персонального компьютера (ПК). Тепловое состояние модели оболочки контролировалось в течение всего эксперимента.

Сигнал с генератора через усилитель мощности передавался на электродинамический силовозбудитель. Параметры вибрации контролировались с помощью задающего датчика, который

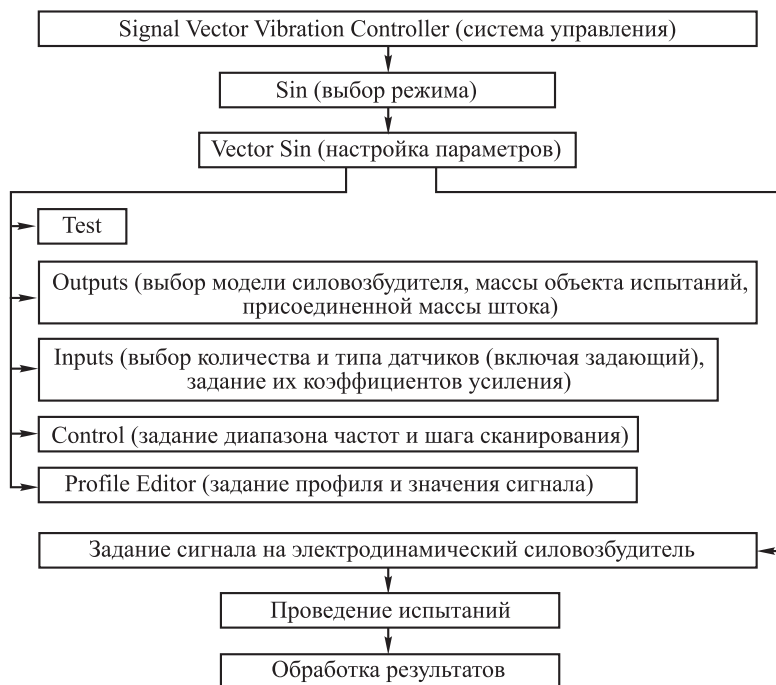


Рис. 4. Блок-схема программного обеспечения SignalStar Vector II для проведения динамических испытаний на гармоническое воздействие

Таблица 1

Характеристики физической модели

Элемент модели	Геометрическая характеристика			Масса, кг
	Длина, м	Диаметр, м	Толщина, м	
Модель внутренней оболочки ампулы	1,2	0,05	0,003	4,62
Нагревательный элемент	1,5	0,011	—	1,10
Шток электродинамического силовогозбудителя	0,025	0,006	—	0,15
Углекислый кальций	0,08	—	0,01	0,20
Фольга	—	—	0,0001	0,02

устанавливался на фланце электродинамического силовогозбудителя. В качестве этого датчика использовался датчик типа 4 ISP, с диапазоном рабочих частот 0,3...5 000 Гц и амплитудой ускорений до 50g.

По показаниям задающего датчика определялись действительные значения воспроизводимого ускорения, которые использовались для расчета коэффициентов преобразования установленных измерительных датчиков, а также для организации обратной связи, что обеспечивало воспроизведение нагружения физической модели ампулы с заданными параметрами. На основе этой информации формировался задающий входной сигнал на силовогозбудитель и выполнялась регистрация отклика модели на вынужденное воздействие.

Контроль теплового состояния осуществлялся цифровыми мультиметрами типа DT-838 Digital

Multimeter, которые учитывают схемным решением температуру свободных концов термопар и имеют инструментальную погрешность 0,5 °С. Погрешность измерения частоты отклика аппаратного комплекса SignalStar Vector II составляла 0,01 Гц. Поскольку измерения проводились несколько раз, то при обработке результатов использовалась методика расчета случайных погрешностей измерений [12]. Погрешность измерения масс составила 1 г (инструментальная погрешность используемых весов типа SOEHNLE 67080).

Исследование амплитудно-частотных характеристик отклика физической модели оболочки ампулы. По сигналам измерительного датчика, расположенного посередине модели, осуществлялась регистрация амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) с помощью системы управления вибрационными нагрузками SignalStar Vector II,

которая по показаниям датчика ускорений (находящегося на столе силового возбудителя) определяла значения параметров воспроизводимой вибрации по условиям нагружения модели. Указанные параметры использовались для организации обратной связи, что обеспечивало воспроизведение нагружения с заданными контролируемыми параметрами.

Экспериментальное исследование отклика на внешнее гармоническое воздействие проводилось для трех различных температурных состояний физической модели оболочки ампулы:

1) «холодного» состояния модели без приложения тепловых нагрузок (с обесточенным нагревательным элементом) при температуре наружной стенки модели составляла 293 К (20 °С);

2) «горячего» состояния модели при температуре наружной стенки модели 373 К (100 °С);

3) «горячего» состояния модели при температуре наружной стенки модели 503 К (230 °С).

АЧХ вынужденных колебаний модели регистрировались 6 раз для каждого фиксированного температурного режима стенки физической модели. В качестве физической модели использовалась трубка из стали Ст20 со следующими механическими характеристиками: модуль упругости 1-го рода $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, плотность $\rho = 7\,800$ кг/м³.

В результате экспериментального исследования упругих динамических свойств были получены АЧХ физической модели оболочки ампулы при температуре стенки ($T_{ст}$) 295, 373 и 503 К (рис. 5).

Результаты исследования, представленные на рис. 5, показывают наличие четырех основных резонансных пиков в диапазоне 0...1 000 Гц. Первые два резонанса лежат в области 100...130 Гц (при $T_{ст} = 295$ К частота резонанса составила 112,34 Гц и 121,14 Гц; при $T_{ст} = 373$ К — 110,59 Гц и 117,65 Гц; при $T_{ст} = 503$ К — 110,41 Гц и 115,85 Гц соответственно).

Третий пик резонанса наблюдается в области 400...450 Гц (при $T_{ст} = 295$ К частота резонанса составила 432,04 Гц; при $T_{ст} = 373$ К — 423,79 Гц; при $T_{ст} = 503$ К — 420 Гц). Следует отметить существенное возрастание амплитуды отклика — до 14 единиц, т.е. данный резонанс опасен для конструкции.

Четвертый резонанс наблюдается в области 780...830 Гц (при $T_{ст} = 295$ К частота резонанса составила 820,38 Гц; при $T_{ст} = 373$ К — 796,46 Гц; при $T_{ст} = 503$ К — 787,15 Гц).

При температуре нагрева стенки физической модели ампулы от 295 до 503 К произошло падение частоты и амплитуды отклика на всех четырех резонансах в области 100...1 000 Гц.

Исследование отклика на внешнее гармоническое воздействие физической модели ампулы при различных температурных режимах показало снижение частоты физической модели:

- на 2...6 Гц в диапазоне 100...150 Гц;
- 12 Гц в диапазоне 400...500 Гц;
- 35 Гц в высокочастотном диапазоне 800 Гц при увеличении температуры модели на 230 К.

Полученный результат коррелирует с данными об изменении модуля упругости материала

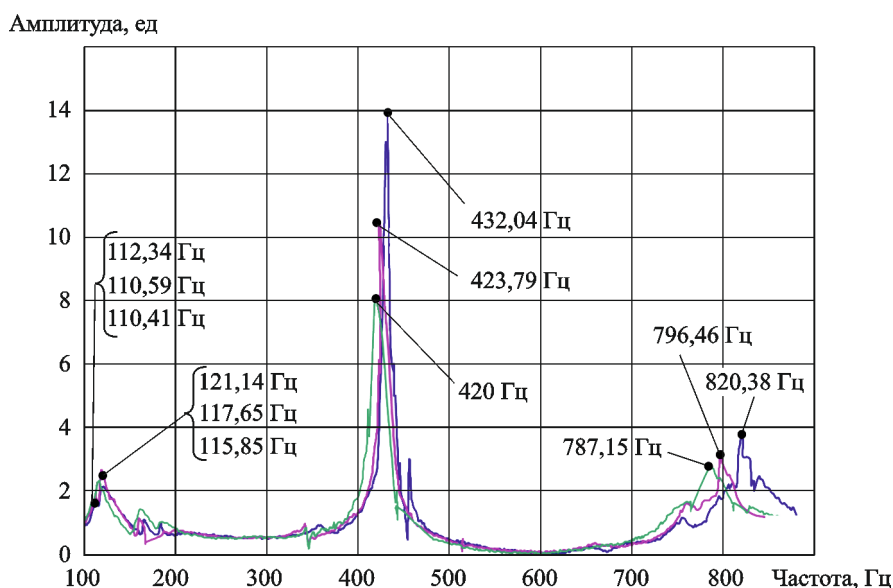


Рис. 5. АЧХ экспериментальной физической модели внутренней оболочки ампулы:

1 — $T_{ст} = 295$ К; 2 — $T_{ст} = 373$ К; 3 — $T_{ст} = 503$ К

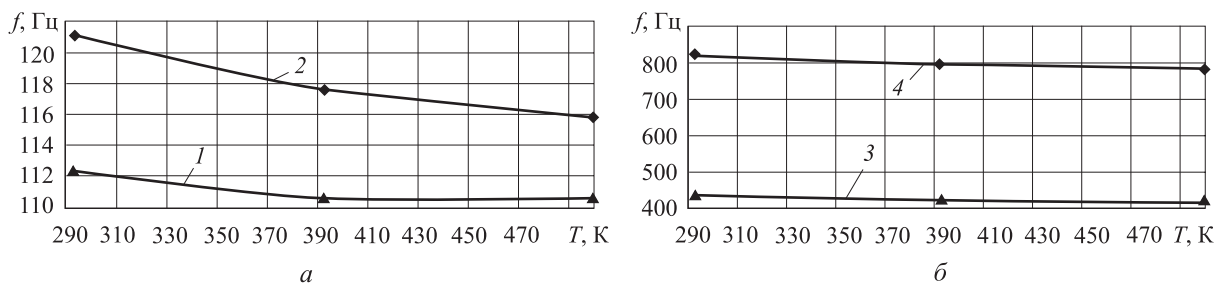


Рис. 6. Зависимости резонансной частоты колебаний модели ампулы от ее теплового состояния:
 а — первый и второй тон; б — третий и четвертый тон

при повышении его температуры [12].

Наблюдаемое уменьшение коэффициентов усиления (амплитуды отклика):

- на первом тоне колебаний — от 1,7 до 1,63;
- на втором тоне — от 2,1 до 2,03;
- на третьем тоне — от 14 до 8;
- на четвертом тоне — от 3,7 до 2,75.

На основе полученных результатов регистрации АЧХ построены зависимости смещения частоты резонанса от температуры стенки физической модели ампулы для каждого тона (рис. 6).

Расчетное исследование отклика на внешнее гармоническое воздействие модели оболочки ампулы с помощью конечно-элементного моделирования. На основе физической модели оболочки ампулы в пакете MSC.Patran была разработана трехмерная конечно-элементная (КЭ) модель, представленная на рис. 7.

Оболочка ампулы промоделирована из Quad-элементов, а нагревательный элемент — из Wed-элементов. Нагревательный элемент связан с оболочкой через MPC-элементы. Условия закрепления промоделированы в местах крепления штока к оболочке (отсутствуют поступательные и вращательные степени свободы).

Результаты исследования частот и форм колебаний по КЭ модели оболочки ампулы для

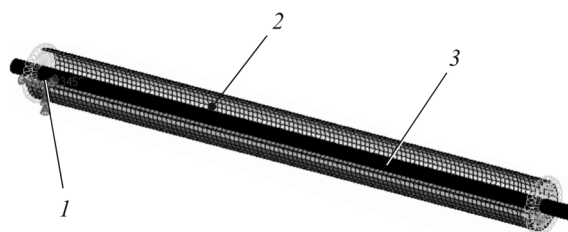


Рис. 7. Конечно-элементная модель оболочки ампулы:
 1 — условие закрепления; 2 — внутренняя оболочка ампулы; 3 — нагревательный элемент

«холодного» состояния представлены на рис. 8. Все механические характеристики материала Ст20 вводились перед расчетом в программу [13].

Результаты исследования частот и форм колебаний КЭ модели оболочки ампулы для теплового режима ампулы 373 К приведены на рис. 9.

Результаты исследования частот и форм колебаний КЭ модели внутренней стенки для теплового режима ампулы 503 К представлены на рис. 10.

Из результатов расчетного исследования частот и форм колебаний КЭ модели оболочки ампулы следует, что первый тон колебаний (см.

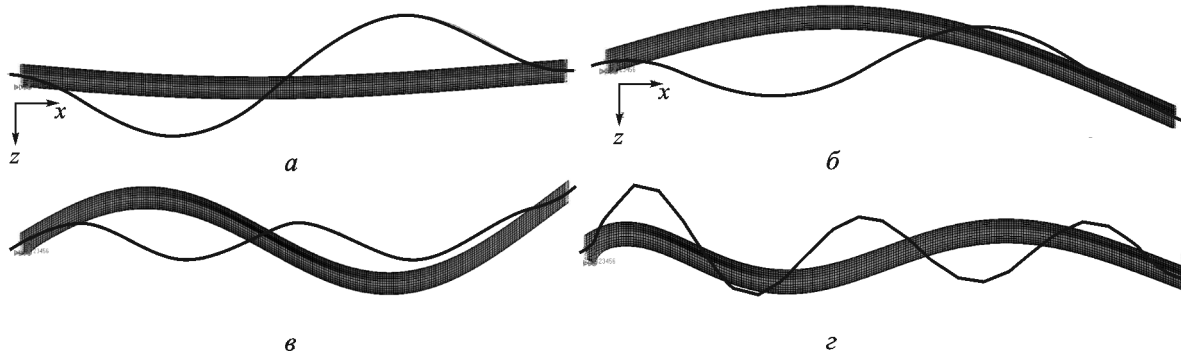
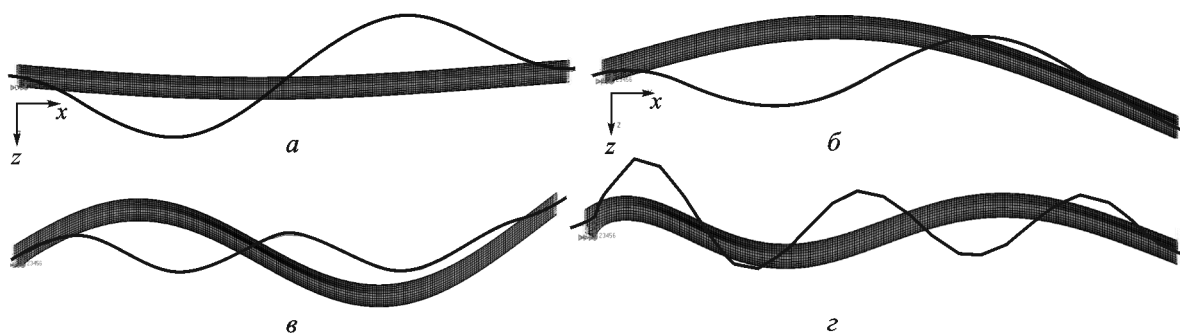
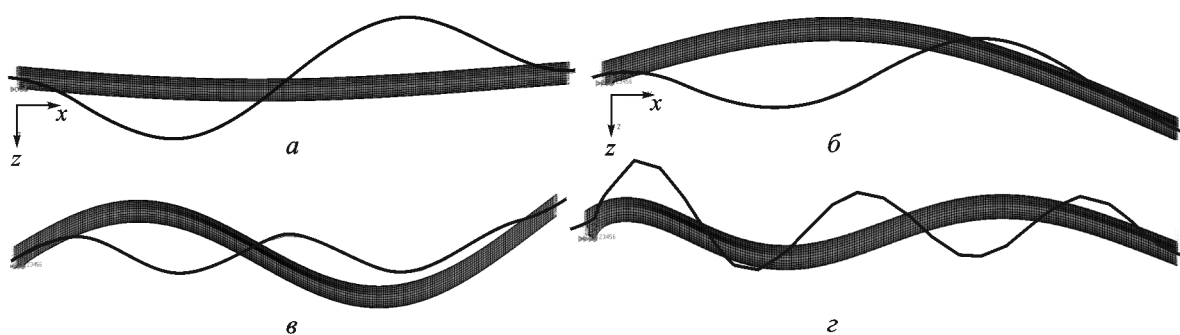


Рис. 8. Тон колебаний при $T = 293$ К:

а — первый тон, частота 113,7 Гц; б — второй тон, частота 122,4 Гц; в — третий тон, частота 431,05 Гц; г — четвертый тон, частота 822,3 Гц

Рис. 9. Тон колебаний при $T = 373$ К:

а — первый тон, частота 111,2 Гц; *б* — второй тон, частота 118,7 Гц; *в* — третий тон, частота 422,1 Гц; *г* — четвертый тон, частота 798 Гц

Рис. 10. Тон колебаний при $T = 503$ К:

а — первый тон, частота 111,1 Гц; *б* — второй тон, частота 116,65 Гц; *в* — третий тон, частота 418 Гц; *г* — четвертый тон, частота 787 Гц

рис. 8, *а*, 9, *а* и 10, *а*) соответствует тону колебаний нагревательного элемента, обладающего меньшей жесткостью по сравнению с жесткостью оболочки. Это подтверждается результатами экспериментального исследования АЧХ физической модели оболочки ампулы, выраженными наличием двух близко лежащих резонансных пиков (см. рис. 5). В области частот 200...1 000 Гц влияние нагревательного элемента на общую жесткость системы мало.

Второй, третий и четвертый тона колебаний КЭ модели оболочки ампулы соответствуют второму, третьему и четвертому резонансным пикам АЧХ экспериментальной физической модели оболочки ампулы при трех температурных режимах.

Сравнение полученных результатов экспериментального исследования при изменении температурного режима физической модели оболочки ампулы и результатов численного моделирования на основе КЭ модели (при тех же механических характеристиках материала и его температурного режима) приведено в табл. 2.

Из данных, представленных в табл. 2, следует, что результаты имеют хорошее совпадение (расхождение по частоте не более 1...1,5 Гц).

Выводы

1. Разработан и создан экспериментальный динамический стенд и комплекс для исследо-

Таблица 2

Сравнение экспериментальных и расчетных данных

T, К	Частота, Гц							
	Эксперимент				КЭ модель			
	1-й тон	2-й тон	3-й тон	4-й тон	1-й тон	2-й тон	3-й тон	4-й тон
293	112,34	121,14	432,04	820,38	113,7	122,4	431,05	822,3
373	110,59	117,65	423,79	796,46	111,2	118,7	422,1	798
503	110,41	115,85	420,24	787,15	111,1	116,65	418	787,2

вания упругих динамических характеристик «холодного» и «горячего» состояний модели оболочки ампулы.

2. Разработана физическая модель оболочки ампулы с модельным источником, имитирующим тепловыделение РАО для проведения экспериментальных исследований упругих динамических свойств в «холодном» и высокотемпературном состоянии.

3. Получены экспериментальные значения амплитудно-частотных характеристик вынужденных колебаний физической модели обо-

лочки ампулы при различных температурных режимах.

4. Определены значения резонансных частот и коэффициентов усиления физической модели внутренней оболочки ампулы в диапазоне 100...1 000 Гц при трех температурных режимах.

5. Проведено расчетное исследование вынужденных колебаний с помощью конечно-элементного моделирования оболочки ампулы. Получено хорошее совпадение экспериментальных и расчетных упругих динамических свойств модели оболочки ампулы.

Литература

- [1] Миненко В.Е. Исследование принципов и экологических аспектов создания системы удаления радиоактивных отходов в космос. *Сб. ст. Космос, время, энергия, посвященных 100-летию Д.Д. Иваненко*. Москва, «Белка», 2004, с. 126–146.
- [2] Семенов Ю.П., Филин В.М., Соколов Б.А., Клипа В.П., Лакеев В.Н., Рогов А.В., Синявский В.В., Юдитский В.Д. О космическом захоронении особо опасных радиоактивных отходов атомной энергетики. *Известия академии наук, Энергетика*, 2003, № 3, с. 6–14.
- [3] Семенов Ю.П., Баканов Ю.А., Синявский В.В. Исследования перспектив использования космических ядерных энергетических двигательных установок в разработках РКК «Энергия» им. С.П. Королева. *Сб. докл. Пятая междунар. конф. Ядерная энергетика в космосе*, ч. 1, 1999, с. 61–74.
- [4] Онуфриев А.В., Дмитриев С.Н., Онуфриев В.В. Об особенностях транспортировки радиоактивных отходов на орбиты захоронения с помощью электроракетных двигательных установок. *Известия РАН, Энергетика*, 2011, № 3, с. 129–138.
- [5] Онуфриев А.В., Онуфриев В.В., Ивашкин А.Б. Проектный облик космического аппарата с энергодвигательной установкой для транспортировки радиоактивных отходов в дальний космос. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, спец. вып. Ионно-плазменные технологии, 2011, с. 64–69.
- [6] Дмитриев С.Н., Онуфриев А.В., Онуфриев В.В. *Способ космического захоронения радиоактивных отходов в дальнем космосе и космический аппарат для его осуществления*. Пат. № 2492537 Российская Федерация, 2013, бюл. № 20.
- [7] Онуфриев А.В., Дмитриев С.Н., Алиев И.Н., Онуфриев В.В. О выборе радиационной защиты космического аппарата при транспортировке радиоактивных отходов на орбиты захоронения с помощью электроракетных двигательных установок. *Тез. докл. 21-я Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий*. 12–14 мая, 2009, Казань. Изд-во «Отечество», 2009, ч. 2, с. 175–177.
- [8] Алиев И.Н., Дмитриев С.Н., Онуфриев А.В., Онуфриев В.В. Проектный облик КА для транспортировки радиоактивных отходов на орбиты захоронения в режиме самодоставки. *Актуальные проблемы Российской космонавтики: Тез. докл. XXXV академ. чт. по космонавтике*. Москва, 2011, с. 103–105.
- [9] Онуфриев А.В., Дмитриев С.Н., Онуфриев В.В. Анализ выбора рабочего тела КА для транспортировки РАО. *Тез. докл. 23-й Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. Электро-механические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий*. Казань, 2011, с. 70–71.
- [10] Онуфриев А.В., Дмитриев С.Н., Онуфриев В.В. Анализ перемещений и напряжений топливного отсека космического аппарата с радиоактивными отходами. *23-я Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. Электро-механические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий*. Казань, 2011, с. 81–82.
- [11] Система управления вибрационными нагрузками SignalStar Vector II. *Руководство пользователя*. 2009. 54 с.

- [12] Савельев А.И., Фетисов И.Н. *Обработка результатов измерений при проведении физического эксперимента*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1990. 32 с.
- [13] Рыжов С.Б., Зубченко А.С., Каширский Ю.В. *Стали и сплавы энергетического оборудования*. Москва, Машиностроение, 2008. 957 с.

References

- [1] Minenko V.E. *Issledovanie printsipov i ekologicheskikh aspektov sozdaniia sistemy udaleniia radioaktivnykh otkhodov v kosmos* [Investigation principles and environmental aspects of the creation of radioactive waste into space]. *Sbornik Kosmos, vremia, energii. Sbornik statei, posviashchennykh 100-letiiu D.D.Ivanenko* [Collection Space, time, energy. Collection of articles dedicated to the 100th anniversary D.D.Ivanenko]. Moscow, Belka publ., 2004, pp. 126–146.
- [2] Semenov Iu.P., Filin V.M., Sokolov B.A. Klipa V.P., Lakeev V.N., Rogov A.V., Siniavskii V.V., Iuditskii V.D. O kosmicheskom zakhoroneniі osobo opasnykh radioaktivnykh otkhodov atomnoi energetiki [Space-based burial of especially hazardous radioactive waste of nuclear power engineering]. *Izvestiia akademii nauk. Energetika* [Journal of the Russian academy of sciences. Energy]. 2003, no. 3, pp. 6–14.
- [3] Semenov Iu.P., Bakanov Iu.A., Siniavskii V.V. *Issledovaniia perspektiv ispol'zovaniia kosmicheskikh iadernykh energeticheskikh dvigatel'nykh ustanovok v razrabotkakh RKK «Energiia» imeni S.P. Koroleva* [Research prospects for space nuclear power propulsion systems in the development of RSC «Energiia» after S.P. Koroleva] *Piataia mezhdunarodnaia konferentsiia «Iadernaia energetika v kosmose»*. *Sbornik dokladov* [Fifth International Conference «Nuclear Power in Space». Collection of reports]. 1999, pt. 1, pp. 61–74.
- [4] Onufriev A.V., Dmitriev S.N., Onufriev V.V. Ob osobennostiakh transportirovki radioaktivnykh otkhodov na orbity zakhoroneniia s pomoshch'iu elektroraketnykh dvigatel'nykh ustanovok [On the issues relating to the transportation of radioactive wastes to their disposal orbit using electrical propulsion systems]. *Izvestiia RAN. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy]. 2011, no. 3, pp. 129–138.
- [5] Onufriev A.V., Onufriev V.V., Ivashkin A.B. Proektnyi oblik kosmicheskogo apparata s energodvigatel'noi ustanovkoi dlia transportirovki radioaktivnykh otkhodov v dal'nii kosmos [Project appearance spacecraft power propulsion systems for the transport of radioactive waste in deep space]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering], *spetsial'nyi vypusk Ionno-plazmennye tekhnologii* [special issue of Ion-plasma technology]. 2011, pp. 64–69.
- [6] Dmitriev S.N., Onufriev V.V., Onufriev A.V. *Sposob kosmicheskogo zakhoroneniia radioaktivnykh otkhodov v dal'nem kosmose i kosmicheskii apparat dlia ego osushchestvleniia* [The method of space disposal of radioactive waste in deep space and spacecraft for its implementation]. Patent RF no. 2492537, BI no. 20, MPK G21F 9/34, B64G 1/66, 2013.
- [7] Onufriev A.V., Dmitriev S.N., Aliev I.N., Onufriev V.V. O vybore radiatsionnoi zashchity kosmicheskogo apparata pri transportirovke radioaktivnykh otkhodov na orbity zakhoroneniia s pomoshch'iu elektroraketnykh dvigatel'nykh ustanovok [On the choice of radiation protection of the spacecraft during the transportation of radioactive waste disposal orbit using electric propulsion systems]. *21-ia Vserossiiskaia mezhvuzovskaia nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia «Elektromekhanicheskie i vnutrikamernye protsessy v energeticheskikh ustanovkakh, struinaia akustika i diagnostika, pribory i metody kontroliia prirodnoi sredy, veshchestv, materialov i izdelii»* [21th National Interuniversity Scientific Conference «Electromechanical and intrachamber processes in power plants, jet and acoustic diagnostics, devices and methods of control environment, substances, materials and products»]. Kazan', 2009, 12–14 May, Otechestvo publ., pt. 2, pp. 175–177.
- [8] Aliev I.N., Dmitriev S.N., Onufriev A.V., Onufriev V.V. *Proektnyi oblik KA dlia transportirovki radioaktivnykh otkhodov na orbity zakhoroneniia v rezhime samodostavki* [Project SC appearance for the transport of radioactive waste disposal orbits mode samodostavki]. *Aktual'nye problemy Rossiiskoi kosmonavtiki: Tezisy doklada. 35 akademicheskie chteniia po kosmonavtike* [Actual problems of Russian Space: Abstracts. 35 academic readings on space]. Moscow, 2011, pp. 103–105.
- [9] Onufriev A.V., Dmitriev S.N., Onufriev V.V. *Analiz vybora rabocheho tela KA dlia transportirovki RAO* [Analysis of the choice of the working body of spacecraft to transport RAO]. *23-ia Vserossiiskaia mezhvuzovskaia nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia «Elektro-mekhanicheskie i vnutrikamernye protsessy v energeticheskikh ustanovkakh, struinaia akustika i diagnostika,*

pribory i metody kontrolya prirodnoi sredy, veshchestv, materialov i izdelii [23rd National Interuniversity Scientific Conference «Electromechanical and intrachamber processes in power plants, jet and acoustic diagnostics, devices and methods of control environment, substances, materials and products»]. Kazan', 2011, pp. 70–71.

- [10] Onufriev A.V., Dmitriev S.N., Onufriev V.V. *Analiz peremeshchenii i napriazhenii toplivnogo otseka kosmicheskogo apparata s radioaktivnymi otkhodami* [Analysis of displacements and stresses fuel compartment spacecraft radioactive waste]. *23-ia Vserossiiskaia mezhvuzovskaia nauchno-tehnicheskaja konferentsiia «Elektro-mekhanicheskie i vnutrikamernye protsessy v energeticheskikh ustanovkakh, struinaia akustika i diagnostika, pribory i metody kontrolya prirodnoi sredy, veshchestv, materialov i izdelii* [23rd National Interuniversity Scientific Conference «Electromechanical and intrachamber processes in power plants, jet and acoustic diagnostics, devices and methods of control environment, substances, materials and products»]. Kazan', 2011, pp. 81–82.
- [11] *Sistema upravleniia vibratsionnymi nagruzkami «SignalStar Vector II». Rukovodstvo pol'zovatelja* [The control system of the vibration load «SignalStar Vector II». User Guide]. 2009. 54 p.
- [12] Savelev A.I., Fetisov I.N. *Obrabotka rezul'tatov izmerenii pri provedenii fizicheskogo eksperimenta* [Processing of measurement results during a physical experiment]. Moscow, Bauman Press, 1990. 32 p.
- [13] Ryzhov S.B., Zubchenko A.S., Kashirskii Iu.V. *Stali i splavy energeticheskogo oborudovaniia* [Steels and alloys power equipment]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2008. 957 p.

Статья поступила в редакцию 13.05.2014

Информация об авторах

ОНУФРИЕВ Александр Валерьевич (Москва) — аспирант кафедры «Аэрокосмические системы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: alexandr77@yandex.ru).

ДМИТРИЕВ Сергей Николаевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Аэрокосмические системы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: dmitrievsn@mail.ru).

ОНУФРИЕВ Валерий Валентинович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Плазменные энергетические установки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: onufryev@bmstu.ru).

Information about the authors

ONUFRIEV Aleksandr Valer'evich (Moscow) — Post-Graduate of «Aerospace Systems» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: alexandr77@yandex.ru).

DMITRIEV Sergey Nikolaevich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Aerospace Systems» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: dmitrievsn@mail.ru).

ONUFRIEV Valeriy Valentinovich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Plasma Power Plants» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: onufryev@bmstu.ru).