УДК 51-7

А. В. Купряшов
Учреждение образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва», Красноярск, Российская Федерация

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА КОРПУСА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С УЧЁТОМ НАНЕСЁННОГО МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И МЕТОДА ТАБЛИЧНО-МАТРИЧНОЙ НОРМАЛИЗАЦИИ КРИТЕРИЕВ

Введение. В настоящее время наблюдается общемировая тенденция широкого использования в ответственных конструкциях композиционных материалов, которые позволяют добиться снижения веса и повышения эксплуатационных характеристик деталей и узлов, применяемых в космической и авиационной технике. Цилиндрические оболочки активно используются в качестве корпусов космических аппаратов. К внешней поверхности цилиндрического корпуса, с помощью специальных фиксирующих устройств, крепятся различные приборы, радиоаппаратура, антенны и даже солнечные батареи. Во внутренней части цилиндрического корпуса находятся двигательная установка, топливная система и трансмиссия космического аппарата. Они воспринимают большие нагрузки, работают в агрессивных средах и испытывают воздействие физических полей.

На внешнею поверхность корпуса наносят специальное многофункциональное покрытие, предназначенное для защиты от ионизирующего, электромагнитного и радиоизлучения, отражения лазерного влияния, теплозащиты, увеличения прочности и жесткости, а также защиты от коррозии и эрозии [1, с. 310].

При выведении космического аппарата на околоземную орбиту корпус испытывает действие различных нагрузок. Когда величины этих нагрузок достигают критических значений, несущая способность конструкции исчерпывается и происходит потеря устойчивости. Исследование устойчивости цилиндрического корпуса является важнейшим этапом его проектирование. Также значимый практический интерес представляет задача определения основной частоты колебаний цилиндрического корпуса, величина которой необходима для оценки жёсткости космического аппарата.

Актуальной является проблема выбора оптимального материала, из которого изготавливается цилиндрическая оболочка. Данное исследование проводится с целью выбора самого оптимального материала цилиндрической композиционной оболочки для конструкторского исполнения. Поэтому необходимо совместное исследование прочности, устойчивости и поведения оболочек из ортотропных материалов (композиты) на основе наиболее точных математических моделей их деформирования, эффективных алгоритмов расчета и специально разработанного программного обеспечения, а затем с помощью математических методов выбрать лучший вариант.

Основная часть. Расчеты прочности цилиндрических оболочек из композиционных материалов выполняются с использованием конечно-элементного анализа. Основой конечно-элементной модели является геометрическая модель. В работе рассматривается цилиндрическая оболочка (рисунок 1), конечно-элементная модель которой создана в программном комплексе *Femap with Nastran*. Основными размерами являются диаметр оболочки $d = 1$ м, длина оболочки $l = 2$ м, толщина оболочки $t = 0{,}001$ м. На внешней поверхности оболочки смоделирован слой специального многофункционального покрытия. Задача решается для оболочки, один край которой жёстко закреплен, а к другому краю прикреплен абсолютно жесткий диск. На абсолютно жёсткий диск действует сжимающая сила $P = 1000$ Н.

Схема нагружения — оболочка имеет жёсткий элемент, к нему приложена сила P по оси Z (рисунок 2).

Физико-механические свойства однонаправленных композитов представлены в таблице 1, исходя из источников [2—4]. Здесь E_1 *и* E_2 (*см.* таблицу 1) — модули упругости соответственно вдоль и поперёк волокон; G_{12} — модуль сдвига, μ — коэффициент Пуассона, ρ — плотность материала.

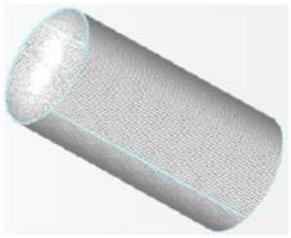

Рисунок 1 — Конечно-элементная модель цилиндрической оболочки с граничными условиями

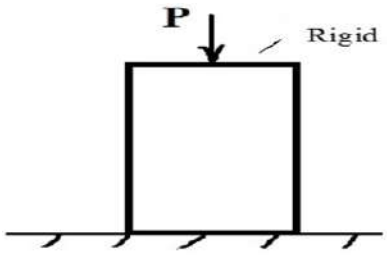

Рисунок 2 — Схема нагружения

© Купряшов А. В., 2020

Репозиторий БашГУ

Т а б л и ц а 1 — Свойства однонаправленных композитов

Характеристика	Стеклопластик	Органопластик	Углепластик	Боропластик	Бороалюминий
E_1, ГПа	57	180	72	210	230
E_2, ГПа	9,0	6,2	4,9	19	140
G_{12}, ГПа	5,2	5,0	2,0	6,2	63
μ_{21}	0,26	0,21	0,28	0,21	0,23
ρ , кг/м^3	2100	1500	1380	2000	2640

В работе произведены статический и модальный анализы, а также анализ на устойчивость, так как именно данные виды исследования могут определить уровень деформирования, а, следовательно, и лучший выбор материала конструкции.

Результатом линейного статического анализа являются перемещения узлов, реакции в связях, напряжения, деформации и внутренние усилия в элементах модели.

Результатом модального анализа является получение динамических свойств конструкции — собственные частоты и формы колебаний. Собственными (свободными) колебаниями называются колебания, которые происходят в системе в отсутствие переменных внешних воздействий и возникают вследствие начального отклонения одного из параметров системы от состояния равновесия [5, с. 89]. В реальных макроскопических системах из-за потери энергии свободные колебания всегда затухают.

При осевом сжатии цилиндрическая оболочка может сохранять свою первоначальную цилиндрическую форму лишь при определенных значениях напряжений, меньших так называемого критического напряжения ($P_{кр}$). Определение $P_{кр}$ является основной целью анализа на устойчивость. На рисунке 3 представлены результаты исследования.

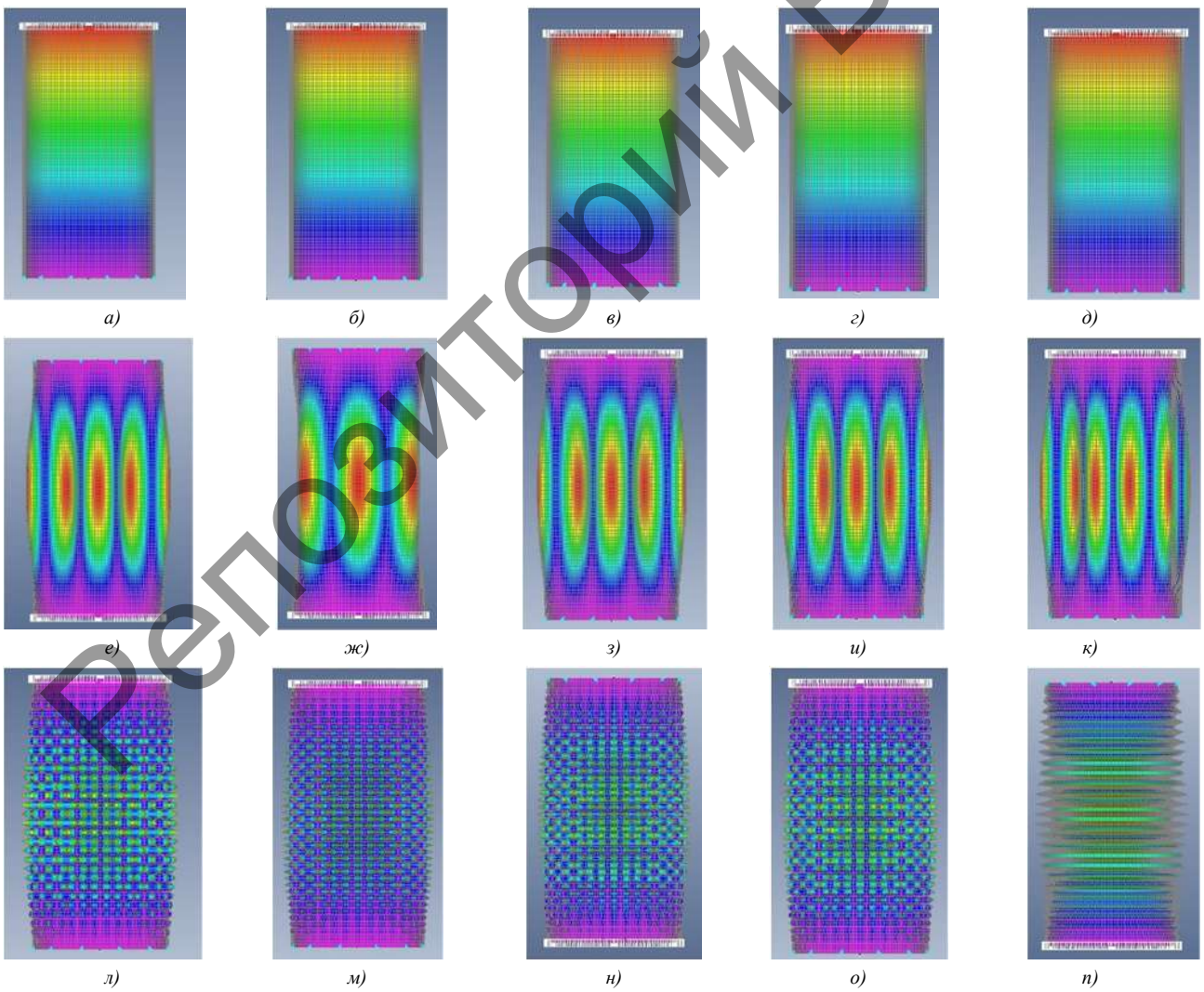

Рисунок 3 — Отображение результатов исследования: деформированное состояние оболочки при статическом анализе: *а* — стеклопластик; *б* — органопластик; *в* — углепластик; *г* — боропластик; *д* — бороалюминий; первая форма колебаний оболочки: *е* — стеклопластик; *ж* — органопластик; *з* — углепластик; *и* — боропластик; *к* — бороалюминий; осесимметричная форма потери устойчивости: *л* — стеклопластик; *м* — органопластик; *н* — углепластик; *о* — боропластик; *п* — бороалюминий

Репозиторий БарГУ

Результаты исследования значения перемещения узлов и критическое напряжение для каждого материала внесены в сводную таблицу 2.

Т а б л и ц а 2 — Верификация результатов исследования

Характеристика	Стеклопластик	Органопластик	Углепластик	Боропластик	Бороалюминий
t, мкм	71	103	130	33,5	4,55
f, Гц	39,975	57,352	42,62	63,888	101,942
l,м 10^{-2}	59,6	69,7	73,2	60,5	53,4
$P_{кр}$, кН 10^{-1}	7,13	8,298	3,851	12,285	66,19
b, мм	20,7	14,4	15,6	16,4	15,1
m, кг	13,193	9,424	8,67	12,565	16,586

Здесь *t* — значение максимального деформирования при статическом анализе; *f* — первая частота собственных колебаний; *l* — величина деформирования при модальном анализе; $P_{кр}$ — критическое напряжение; *b* — величина деформирования при анализе на устойчивость; *m* — масса.

Построим графики зависимости значений перемещений, критического напряжения, частот собственных колебаний и массы для разных материалов композитной цилиндрической обечайки (рисунок 4).

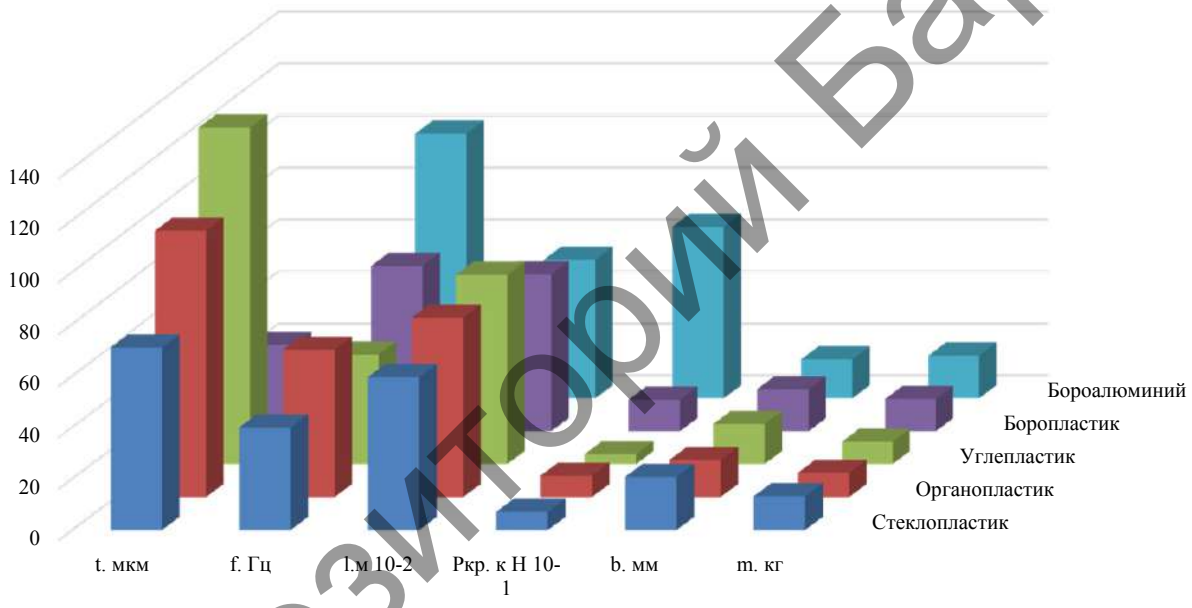

Рисунок 4 — График зависимости полученных значений для разных материалов композитной цилиндрической обечайки

График, представленный на рисунке 4, наглядно показывает, что аналитическим (гистограммным) методом практически невозможно решить поставленную задачу.

Поэтому для определения оптимального материала исполнения цилиндрической композитной оболочки воспользуемся математическим методом таблично-матричной нормализации критериев. Суть метода сводится к последовательности процедур, с помощью которой все критерии приводятся к единому, безразмерному масштабу измерений [6].

Обозначим *Uij* — оценку *i*-й альтернативы по *j*-му критерию. Пусть оценки альтернатив по критериям имеют различные размерности. Введём обозначение $\hat{U}_j = \max_i(U_{ij})$ — максимальное значение *j*-го критерия по каждой альтернативе, а $\breve{U}_j = \min_i(U_{ij})$ — минимальное значение *j*-го критерия по альтернативам. Тем самым, вводятся нормализованные оценки альтернатив по критериям.

В случае максимизации критериев (по формуле (1)) из каждого элемента столбца матрицы U_{ij} вычитается минимальный элемент данного столбца и результат делится на разницу между максимальным и минимальными элементами этого столбца:

$$u_{ij} = \frac{U_{ij} - \breve{U}_j}{\hat{U}_j - \breve{U}_j} \qquad (1)$$

Репозиторий БарГУ

В случае минимизации критериев нормализованные оценки рассчитываются:

$$u_{ij} = \frac{\hat{U}_{ij} - U_{ij}}{\hat{U}_j - \check{U}_j} \qquad (2)$$

В результате нормализации (с помощью (1) и (2)), вне зависимости, ведётся максимизация или минимизация критерия, альтернатива, имеющая наилучший индекс показателя по любому критерию получает оценку 1, наименее имеет оценку 0, а остальные альтернативы имеют промежуточные оценки от 0 до 1 пропорционально их ценности между показателями наилучшей и наихудшей альтернатив [6]. Функции полезности каждой альтернативы F_i *с* нормализованными показателями ценности определяются по формуле:

$$F_i = \sum_{j=1}^{k} u_{ij} \cdot W_j; i = 1,2,...,n, \quad 2 \qquad (3)$$

где W_j — веса критериев.

Выбирается та альтернатива, для которой функция полезности (полученная по (3)) максимальна.

Вес критериев определим относительно важности при выборе требований, предъявляемых к тонкостенным цилиндрическим оболочках в ракетно-космической области, на основе работ [2, 3] и занесём данные в таблицу 3. Важнейшую роль в выборе композиционного материала в ракетно-космической отрасли играет масса конструкции (W = 10).

Т а б л и ц а 3 — Значение веса критериев

№ п\п	Критерии	Вес W_j
1	*t*	5
2	*f*	6
3	*l*	2
4	$P_{кр}$	8
5	*b*	3
6	*m*	10

Исходные данные для анализа представлены в таблице 4. Данные имеют разные размерности, поэтому необходимо провести нормализацию.

Т а б л и ц а 4 — Исходные данные для выбора оптимального варианта исполнения

Материал	Критерии (матрица *Uij*)					
	t, мкм	*f*, Гц	*l*, м 10^{-2}	$P_{кр}$, кН·10^{-1}	*b*, мм	масса, кг
Стеклопластик	71,00	39,975	59,6	7,130	20,7	13,1933
Органопластик	103,00	57,352	69,7	8,298	14,4	9,4240
Углепластик	130,00	42,620	73,2	3,851	15,6	8,6700
Боропластик	33,50	63,888	60,5	12,285	16,4	12,5650
Бороалюминий	4,55	101,942	53,4	66,190	15,1	16,5860
ВЕС	5	6	2	8	3	10

Самый важный критерий (масса) минимизируется (1). Поэтому от максимального элемента каждого столбца матрицы выигрышей отнимаем каждый элемент этого столбца и делим данное число на разность между максимальным и минимальным элементами столбца. Второй критерий (значение максимального деформирования при статическом анализе) максимизируется, поэтому проводим обратные итерации (2). И так для каждого критерия. В результате получим матрица рисков, которая оформлена в виде таблицы 5.

Т а б л и ц а 5 — Матрица рисков

Материал	Нормализованные критерии (матрица u_{ij})					
	t, мкм	*f*, Гц	*l*, м·10^{-2}	$P_{кр}$, кН·10^{-1}	*b*, мм	масса, кг
Стеклопластик (I)	0,470	0,000	0,687	0,053	0,000	0,429
Органопластик (II)	0,215	0,280	0,177	0,071	1,000	0,905
Углепластик (III)	0,000	0,043	0,000	0,000	0,810	1,000
Боропластик (IV)	0,769	0,386	0,641	0,135	0,683	0,508
Бороалюминий (V)	1,000	1,000	1,000	1,000	0,889	0,000

Репозиторий БарГУ

Теперь можно вычислить функции полезности по каждой альтернативе (3). В результате, рассчитанные с учетом весов функции полезности равны: $F_{\text{I}} = 8{,}432$; $F_{\text{II}} = 15{,}73$; $F_{\text{III}} = 12{,}685$; $F_{\text{IV}} = 15{,}654$; $F_{\text{V}} = 23{,}667$.

Заключение. В результате анализа видно, что альтернатива V: изготовление цилиндрической оболочки из композитного материала — бороалюминий наилучшая, так как ее функция полезности максимальна.

Проведённые исследования позволяют разработать и спроектировать необходимую конструкцию корпуса космического аппарата. Материалы исследования могут быть внедрены при разработке новой космической техники, с целью повышения весовой эффективности космического аппарата, его эксплуатационных показателей и надёжности.

Список цитируемых источников

1. *Kupryashov, A. V.* Multifunctional coating in modern rocket and space technology / A. V. Kupryashov, I. Ya. Shestakov // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации : материалы XIX Междунар. науч. конф. бакалавров, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (20 мая 2020, г. Красноярск) ; под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; — СибГУ им. М. Ф. Решетнева. — Красноярск, 2020. С. 310—311.
2. *Немировский, Ю. В.* Многослойные анизотропные оболочки и пластины. Изгиб, устойчивость, колебания / Ю. В. Немировский, А. Н. Андреев. — Новосибирск : Наука, 2001. — 288 с.
3. *Бондалетова, Л. И.* Полимерные композиционные материалы (часть 1) : учебное пособие / Л. И. Бондалетова, В. Г. Бондалетов. — Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2013 — 118 с.
4. *Скворцов, Ю. В.* Механика композиционных материалов : конспект лекций / Ю. В. Скворцов. — Самарский гос. аэрокосмич. ун-т. — Самара, 2013. — 94 с.
5. *Межин, В. С.* Практика применения модальных испытаний для целей верификации конечно-элементных моделей конструкций изделий ракетно-космической техники / В. С. Межин, В. В. Обухов. — Королёв : Космическая техника и технологии. 2014. — №1. — С. 86—91.
6. *Малыхин, В. И.* Математические методы принятия решений : учебное пособие / В. И. Малыхин, С. И. Моисеев. — Воронеж : ВФ МГЭИ, 2009. — 102 с.

УДК 338.364.2

О. В. Лупей, О. А. Марисова, А. Г. Климков

Государственное учреждение «Белорусский институт системного анализа и информационного обеспечения научно-технической сферы», Минск, Республика Беларусь

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ПОДГОТОВКИ НАУЧНЫХ РАБОТНИКОВ ВЫСШЕЙ КВАЛИФИКАЦИИ — ГЛАВНЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ РЕСУРС МОНИТОРИНГА СИСТЕМЫ ПОСЛЕВУЗОВСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Введение. Задача обеспечения своевременности, синхронности и достоверности сбора разрозненных локальных данных по всей республике и их последующей интеграции в единое представление, характеризующее состояние и динамику развития всей отрасли — одна из наиболее актуальных для решения проблем цифровизации экономики и построения электронного правительства. Эта задача решается путем создания соответствующих автоматизированных систем, организации систематического анализа актуализируемой мониторинговой информации и выполнения на этой основе регулирующих воздействий на объекты управления. В то же время, в условиях перехода к инновационной экономике важнейшее место занимает развитие интеллектуального капитала, повышение квалификации научных кадров, в том числе в рамках системы послевузовского образования, призванной выступать одним из факторов сохранения и приумножения кадрового потенциала. В этой связи мониторинг кадровой составляющей (научных кадров высшей квалификации) страны на различных уровнях всегда актуален и необходим для оценки текущего состояния и возможностей воспроизводства ее интеллектуального капитала, повышения конкурентоспособности в целом.

Основная часть. В сфере послевузовского образования в Республике Беларусь большая часть задач, непосредственно связанных с мониторингом состояния кадров высшей квалификации, выполняется с помощью автоматизированной информационно-аналитической системы мониторинга подготовки научных работников высшей квалификации (АСМ НРВК), созданной в 2010 г. Статус данной системы как республиканского информационного ресурса закреплен в Положении о порядке планирования, финансирования и контроля подготовки научных работников высшей квалификации за счет средств республиканского бюджета, утвержденном постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 4 августа 2011 г. № 1049 «Об изменении, дополнении и признании утратившими силу некоторых постановлений Правительства Республики Беларусь по вопросам образования» [1]. Основной целью функционирования АСМ НРВК является обеспечение органов государственного управления оперативной информацией о состоянии системы послевузовского образования, оптими-

© Лупей О. В., Марисова О. А., Климков А. Г., 2020

Репозиторий БарГУ