

## Оценка корректности экспериментальных данных с помощью идентификации характеристик слоя по результатам испытаний многослойных образцов

© Л.П. Таирова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Рассмотрены особенности решения задач идентификации характеристик слоя многослойных материалов, которые позволяют оценить корректность (достоверность) экспериментальных данных, используемых в качестве исходных при решении этих задач (с учетом принятых гипотез деформирования и разрушения материала). Приведены два примера решения задач идентификации по результатам испытаний на растяжение и сжатие углепластиковых образцов с 12 схемами армирования, для которых дана оценка корректности используемых экспериментальных данных. В первом случае проанализированы результаты идентификации технических постоянных слоя по экспериментальным значениям модулей упругости и коэффициентов Пуассона многослойных структур, во втором — характеристик прочности слоя, определенных по экспериментальным прочностным характеристикам многослойных образцов с использованием критерия максимальных напряжений.*

**Ключевые слова:** многослойные материалы, характеристики упругости, характеристики прочности, идентификация, эксперимент, достоверность.

Идентификацию характеристик однонаправленного слоя (моно-слоя) по результатам испытаний многослойных образцов с различными схемами армирования используют при исследованиях композитных материалов достаточно давно [1–6], поэтому большинство достоинств и недостатков этого метода уже известны. Основным его достоинством является увеличение достоверности значений искомым характеристик благодаря использованию избыточной экспериментальной информации. Задачу идентификации формулируют следующим образом: определить такие значения характеристик слоя, которые обеспечивают наилучшее соответствие между вычисленными по ним и экспериментально установленными значениями характеристик пакетов. Таким образом, задача идентификации относится к числу оптимизационных по алгоритму и обратных по отношению к задаче определения характеристик многослойного пакета по известным характеристикам слоя (полагаем, что многослойные пакеты состоят из одинаковых слоев, уложенных под разными углами к выбранным осям пакетов).

Прямые задачи формулируют для различных характеристик в соответствии с принятыми моделями материала, но в любом случае полагают, что при известных характеристиках слоя и структуре пакета

характеристики пакета определены однозначно. Решение задачи идентификации, как правило, не единственно и зависит от вида функции цели (минимизируемой функции), а также количества и типа исходных данных (характеристик пакетов). Таким образом, достоверность полученного при идентификации решения (правомерность утверждения, что вычисленные характеристики слоя действительно наилучшим образом описывают свойства материала) требует доказательства. Составляющие такого доказательства следующие:

проверка надежности алгоритма минимизации, т. е. уверенность в том, что определен глобальный минимум функции цели, а не один из локальных;

соответствие вида функции цели физическому смыслу задачи (достаточный вклад в значение функции цели всех искомым характеристик);

устойчивость решения к небольшим случайным отклонениям в значениях исходных данных.

В случае, когда при решении конкретной задачи получены положительные ответы для всех перечисленных составляющих оценки решения, целесообразно проанализировать степень отличий расчетных (определенных по вычисленным при идентификации характеристикам слоя) и экспериментальных значений характеристик многослойных пакетов (базовых характеристик). Обычно для большей части базовых характеристик эти отличия невелики, но для некоторых они составляют 15...40 %. Как правило, эти отличия являются сигналом к дополнительной проверке степени корректности экспериментального определения характеристик, включающей в себя оценку технологического состояния образцов, для которых они получены (соответствие углов укладки волокон заданным, наличие микрповреждений), и анализ погрешностей измерений во время эксперимента. В большинстве случаев удается обнаружить причины определения экспериментальных данных, не являющихся вполне корректными (отражающими достоверно свойства исследуемого материала), но эту некорректность без решения задачи идентификации очень сложно выявить.

Рассмотрим конкретные примеры решения задач идентификации характеристик слоя и последующего анализа корректности экспериментальных данных.

1. Идентификация технических постоянных упругости (ТПУ) углепластика по результатам испытаний на растяжение плоских образцов. В качестве исходных данных (базовых характеристик) для идентификации ТПУ слоя использовали средние экспериментальные значения модулей упругости  $\bar{E}_x$  и коэффициентов Пуассона  $\bar{\mu}_{xy}$  для семи структур:  $[0^\circ]$ ,  $[\pm 20^\circ]$ ,  $[\pm 40^\circ]$ ,  $[\pm 50^\circ]$ ,  $[\pm 70^\circ]$ ,  $[90^\circ]$ ,  $[0_4 / 90_6^\circ]$  [7].

Деформации в процессе нагружения измеряли на каждом образце тремя продольными и двумя поперечными тензодатчиками, что позволяло вести контроль равномерности деформаций в рабочем сечении в соответствии с ГОСТ 25.601–80. В качестве базовых характеристик для идентификации взяты средние значения для групп одинаковых образцов (не менее трех в группе).

При решении задачи идентификации в качестве модели деформирования многослойного пакета использовали модель послойного анализа [8], включающую в себя следующие гипотезы:

материал находится в условиях однородного плоского напряженного состояния;

деформации не изменяются по толщине пакета;

средние напряжения в пакете равны сумме соответствующих напряжений в слоях, умноженных на относительные толщины слоев; как однонаправленные слои, так и пакет в среднем ортотропны.

В этом случае связь между ТПУ пакета и слоя нелинейна и устанавливается в соответствии с известными формулами [8]. Математически связи ТПУ пакета с ТПУ слоев можно сокращенно записать следующим образом:

$$\{Z^\Sigma\} = F\{Z_0\}, \quad (1)$$

где  $F\{Z_0\}$  — функциональная связь между вектором-столбцом  $\{Z^\Sigma\}$  ТПУ пакета вектором-столбцом  $\{Z_0\}$  ТПУ слоя;  $\{Z_0\} = \{E_1, E_2, \mu_{12}, G_{12}\}^T$  ( $E_1, E_2$  — модули упругости вдоль и поперек волокон соответственно,  $\mu_{12}$  — коэффициент Пуассона,  $G_{12}$  — модуль сдвига монослоя);  $\{Z^\Sigma\} = \{E_x, \mu_{xy}\}^T$  (для пакета рассматривают только модуль упругости  $E_x$  и коэффициент Пуассона  $\mu_{xy}$  относительно оси ортотропии пакета, как наиболее легко технически определяемые характеристики).

Соотношения (1) позволяют однозначно определить ТПУ пакетов с известными схемами армирования при заданных ТПУ слоя (прямая задача).

Будем рассматривать одновременно  $N$  пакетов. Тогда вместо (1) связь между ТПУ пакетов (базовыми характеристиками) и ТПУ слоя будет определяться выражениями

$$\{E_x^1, \mu_{xy}^1, E_x^2, \mu_{xy}^2, \dots, E_x^N, \mu_{xy}^N\}^T = F^* \{E_1, E_2, \mu_{12}, G_{12}\}^T. \quad (2)$$

Здесь  $F^*$  состоит из зависимостей  $F$ , записанных последовательно для всех рассматриваемых пакетов.

Математически задачу идентификации решают как задачу минимизации некой функции цели при варьируемых параметрах (ТПУ слоя). Функция цели  $\Phi$  должна удовлетворять условиям

$$\begin{aligned} \lim \Phi &= 0 \quad \text{при} \quad |g_j^3 - g_j^p| \rightarrow 0; \\ \Phi &> 0 \quad \text{при} \quad g_j^3 \neq g_j^p, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $g_j^3$  — экспериментальное значение  $j$ -й базовой характеристики;  $g_j^p$  — ее рассчитанное в соответствии с формулой (2) значение.

При идентификации ТПУ слоя в качестве функции цели удобно использовать сумму квадратов относительных невязок расчетных и экспериментальных значений базовых ТПУ:

$$\Phi = \sum_N \left( 1 - \frac{g_j^p}{g_j^3} \right)^2. \quad (3)$$

Эта функция существенно нелинейна относительно варьируемых параметров, поэтому для решения задачи был применен алгоритм численной оптимизации — алгоритм случайного поиска с применением штрафных функций [9]. Для проверки сходимости процесса оптимизации были проведены расчеты с различными значениями начальных данных [7], которые показали надежность используемого алгоритма.

Весьма важной составляющей оценки достоверности решения задачи идентификации является анализ степени влияния случайных отклонений экспериментально определяемых исходных данных (характеристик пакетов) на искомые характеристики слоя. Если небольшие отклонения в характеристиках пакетов приводят к существенным отклонениям характеристик слоя, решение не может считаться достоверным. В настоящей работе для анализа степени влияния случайных отклонений в исходных данных на результаты решения использовали численный эксперимент [10]. Суть этого эксперимента — повторные решения рассматриваемой задачи идентификации при базовых характеристиках, в которые вносят случайные отклонения в заданных пределах, с последующим статистическим анализом полученных решений. Для рассматриваемой задачи получено, что максимальные значения коэффициентов вариации искомых характеристик по результатам численного эксперимента не превышают заданных коэффициентов вариации базовых характеристик. Это свидетельствует о весьма высокой степени устойчивости искомых характеристик к случайным отклонениям в исходных данных, т. е. о достоверности полученного решения.

Относительные невязки  $\delta_E$  и  $\delta_\mu$  соответственно для модулей упругости и коэффициентов Пуассона, вычисленные по формуле

$$\delta_j = \left( 1 - \frac{g_j^p}{g_j^e} \right) \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $g_j^p$ ,  $g_j^e$  — расчетные (вычислены по характеристикам слоя, определенным при решении задачи идентификации) и экспериментальные значения для каждой  $j$ -й из экспериментально исследованных 11 схем армирования углепластика, приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Относительные невязки для модулей упругости и коэффициентов Пуассона для всех исследованных схем армирования материала**

Схема армирования	$\delta_E$	$\delta_\mu$	Схема армирования	$\delta_E$	$\delta_\mu$
[0°]	11,2	1,2	[90°]	2,4	0
[±20°]	-3,7	-5,4	[0 <sub>4</sub> / 90 <sub>6</sub> °]	-2,3	-2,7
[±40°]	-0,6	-4,8	[0 <sub>2</sub> / ±70 <sub>3</sub> °]*	1,6	2,8
[±50°]	0,5	3,8	[90 <sub>2</sub> / ±20 <sub>3</sub> °]*	-1,2	15,7
[±70°]	-4,9	0,7	[0 / ±60 <sub>2</sub> °]*	-6,3	-0,7
			[90° / ±30 <sub>2</sub> °]*	-22,5	1,7

\* Схемы армирования, которые не участвовали в идентификации характеристик слоя.

Из таблицы следует, что для большинства ТПУ невязки составляют около 5 % и меньше, но для трех они превышают 10 %, что вызывает необходимость рассмотрения причин получения таких не вполне корректных экспериментальных данных. Действительно, для модуля упругости вдоль волокон, определенного на однонаправленных образцах, характерным является более высокое значение, чем в материале с несколькими направлениями укладки волокон. Этот факт наглядно подтверждает значимость идентификации для уточнения ТПУ, которые реализуются в композите при сложных схемах армирования, соответствующих реальным конструкциям.

Для схемы армирования [90° / ±30<sub>2</sub>°] модуль упругости очень чувствителен к отклонению от номинальных углов укладки волокон ±30°. Так, для схемы армирования [90° / ±33<sub>2</sub>°] расчетный модуль упругости уменьшается по сравнению с модулем для схемы [90° / ±30<sub>2</sub>°] на 17 %. Приближенные замеры реальных углов укладки

в образцах показали, что они действительно имеют отклонения на  $2...3^\circ$  от номинальных  $\pm 30^\circ$ . Таким образом, результаты идентификации позволили выявить технологические погрешности изготовления материала.

Разбросы экспериментальных значений коэффициентов Пуассона обычно больше, чем модулей упругости. Это связано, вероятнее всего, с большей чувствительностью поперечных деформаций для многих структур к технологическим несовершенствам материала (искривлению волокон, наличию микродефектов и т. д.). В частности, для структуры  $[90_2/\pm 20_3]$  максимальное отклонение экспериментального значения коэффициента Пуассона от среднего для группы испытанных образцов составляет 15 %, т. е. примерно то же, что и невязка между экспериментальным и расчетным по результатам идентификации значениями. Таким образом, для этой ГПУ сравнительно большая невязка не является признаком некорректности ее экспериментального определения.

Итак, приведенный пример показывает дополнительные возможности идентификации при оценке экспериментальных данных.

2. Идентификация характеристик прочности углепластика по результатам испытаний на растяжение плоских образцов. Алгоритм идентификации характеристик прочности существенным образом зависит от принятого для материала критерия прочности. Для многослойного материала при расчете прочности чаще всего используют алгоритм послойного анализа, включающий в себя критерий прочности однонаправленного слоя как ортотропного материала, правила взаимодействия слоев после выхода напряжений в одном или нескольких слоях на предельную поверхность и, наконец, критерий окончательного исчерпания несущей способности пакета. Первым этапом идентификации характеристик прочности является определение постоянных, входящих в критерий прочности слоя. Рассмотрим решение такой задачи для случая, когда в качестве предельных соотношений для слоя принят критерий максимальных напряжений [11]. Тогда связь между характеристиками прочности слоя и пакета не может быть выражена только с помощью алгебраических соотношений, она представляет собой некий алгоритм анализа наиболее напряженных слоев в каждом пакете.

Алгоритм идентификации, приведенный в работе [11], основан на сопоставлении напряжений вдоль и поперек волокон, а также при сдвиге в слоях каждого пакета в момент разрушения или нарушения монолитности (растрескивания в каких-либо слоях). В результате этого сопоставления для каждого пакета определяют слои, в которых напряжения каждого типа (вдоль, поперек волокон и касательные) максимальны. По напряжениям в этих слоях, после сравнения и ана-

лиза их значений во всех рассматриваемых пакетах, вычисляют предельные значения характеристик слоя.

Приведенные при описании идентификации ТПУ гипотезы, касающиеся особенностей деформирования пакета, используют и при идентификации прочности. Кроме того, полагают, что связь между напряжениями и деформациями линейна вплоть до выхода на предельное состояние какого-либо из слоев и что нарушение монолитности вызвано выходом на предельную поверхность напряжений в одном или нескольких слоях. ТПУ монослая считают известными. На экспериментальной диаграмме деформирования нарушению монолитности соответствует участок, где связь между напряжениями и деформациями в пакете становится нелинейной. О напряжениях нарушения монолитности судят по результатам кусочно-линейной аппроксимации диаграмм деформирования, их значения определяют с меньшей точностью, чем напряжения окончательного разрушения. Поэтому обычно проводят несколько вариантов идентификации характеристик прочности, отличающихся значениями базовых характеристик (там, где нет полной ясности, какие напряжения считать предельными — напряжения окончательного разрушения или появления нелинейности между напряжениями и деформациями).

В табл. 2 представлены экспериментальные значения предельных напряжений при растяжении  $[\sigma_3^+]$  и сжатии  $[\sigma_3^-]$ , принятые в качестве базовых при идентификации; расчетные значения разрушающих напряжений при растяжении  $[\sigma_p^+]$  и сжатии  $[\sigma_p^-]$  (по первому выходу на предельную поверхность в пространстве напряжений в каком-либо из слоев) и предельная прочностная характеристика  $[F]$ , послужившая причиной выхода на эту предельную поверхность, а также характеристики прочности слоя, при определении которых использованы предельные напряжения структуры и (где это неочевидно) вид нагружения, где произошел выход на предельную поверхность («+» — растяжение, «-» — сжатие).

Таблица 2

**Сравнение эксперимента и результатов идентификации характеристик прочности углепластика [7]**

Схема армирования	$[\bar{\sigma}_3^+]$	$[\bar{\sigma}_3^-]$	$[\bar{\sigma}_p^+]$	$[F]$	$[\bar{\sigma}_p^-]$ , МПа	$[F]$	Определение характеристики слоя
	МПа						
[0]	<b>2 690*</b>	<b>815*</b>	2 439	$F_1^+$	960	$F_1^-$	$F_1^+$ («+»), $F_1^-$ («-»)
[±20°]	<b>902*</b>	<b>477*</b>	917	$F_{12}$	891	$F_1^-$	$F_{12}$ («+»)
[±40°]	<b>180*</b>	—	200	$F_{12}$	200	$F_{12}$	$F_{12}$
[±50°]	85	<b>140*</b>	150	$F_{12}$	150	$F_{12}$	$F_{12}$ («-»)

Схема армирования	$[\bar{\sigma}_y^+]$	$[\bar{\sigma}_y^-]$	$[\bar{\sigma}_p^+]$	[F]	$[\bar{\sigma}_p^-]$ , МПа	[F]	Определение характеристики слоя
	МПа						
$[\pm 70^\circ]$	45,7	<b>194*</b>	187	$F_2^+$	194	$F_2^-$	$F_2^-, F_{12}$ («→»)
$[90^\circ]$	33,2	–	153	$F_2^+$	159	$F_2^-$	–
$[0_4/90_6^\circ]$	<b>873*</b>	–	912	$F_2^+$	427	$F_1^-$	$F_2^+$
$[0_6/90_4^\circ]$	–	<b>628*</b>	1 300	$F_2^+$	604	$F_1^-$	$F_1^-$ («→»)
$[0_2/\pm 70_3^\circ]$	<b>756*</b>	<b>330*</b>	725	$F_2^+$	297	$F_1^-$	$F_1^+, F_2^+, F_{12}$ («+»), $F_1^-$ («→»)
$[90_2^\circ/\pm 20_3^\circ]$	754	–	1 330	$F_2^+$	676	$F_1^-$	–
$[0/\pm 60_2^\circ]$	<b>594*</b>	<b>403*</b>	459	$F_{12}$	262	$F_1^-$	$F_1^+$ («+»), $F_{12}$ («+», «→»)
$[90^\circ/\pm 30_2^\circ]$	422	–	640	$F_{12}$	640	$F_{12}$	–

\*Значения базовых характеристик, использованные при определении характеристик слоя.

В табл. 2 звездочкой выделены значения базовых характеристик, которые использованы при определении характеристик прочности слоя. Значения остальных характеристик оказались существенно ниже ожидаемых. Здесь имеется в виду, что ожидаемые (рассчитанные по результатам идентификации) характеристики вычислены по пределу прочности слоя, определенному по уровням предельных напряжений, которые реализуется в других структурах. Так, по расчету причиной разрушения в структуре  $[90^\circ/\pm 30_2^\circ]$  являются напряжения сдвига  $F_{12}$  в слоях  $\pm 30^\circ$ , определенные по разрушающим напряжениям в структурах  $[0/\pm 60_2^\circ]$  (при растяжении и сжатии),  $[0_2/\pm 70_3^\circ]$  (при растяжении),  $[\pm 70^\circ]$  и  $[\pm 50^\circ]$  (при сжатии),  $[\pm 40^\circ]$  и  $[\pm 20^\circ]$  (при растяжении). В структуре же  $[90^\circ/\pm 30_2^\circ]$  в момент разрушения  $F_{12}$  примерно в 1,5 раза меньше, чем в перечисленных структурах, а остальные напряжения еще меньше по сравнению с предельными значениями, определенными по другим структурам. Причиной преждевременного разрушения в структуре  $[90^\circ/\pm 30_2^\circ]$ , вероятнее всего, являются так называемые кромочные эффекты — наличие межслойных напряжений  $\sigma_z$ , нормальных к плоскости армирования, вблизи свободной кромки растягиваемого образца [12]. Если эти напряжения положительны, возможно расслаивание образца вблизи свободных

кромки и, как следствие, существенное снижение прочности образца. Этим же объясняется заниженное значение прочности для структуры  $[90_2^\circ / \pm 20_3^\circ]$ . Здесь причиной разрушения должны являться растягивающие напряжения  $F_2^+$  в слоях  $[90^\circ]$ , которые определены по разрушающим напряжениям для структур  $[0_2 / \pm 70_3^\circ]$  и  $[0_4 / \pm 90_6^\circ]$ . Реально образцы со структурой  $[90_2^\circ / \pm 20_3^\circ]$  разрушаются при напряжениях  $F_2^+$ , почти в 2 раза меньших, чем при разрушении структур  $[0_2 / \pm 70_3^\circ]$  и  $[0_4 / \pm 90_6^\circ]$ .

Еще для трех структур  $[\pm 50^\circ]$ ,  $[\pm 70^\circ]$  и  $[90^\circ]$  при растяжении экспериментальные напряжения оказались значительно ниже расчетных (см. табл. 2). Можно предположить, что образцы этих структур обладают повышенной повреждаемостью либо критерий максимальных напряжений неудовлетворительно описывает предельное состояние слоя.

Для структуры  $[\pm 20^\circ]$  при сжатии экспериментальное значение прочности ниже расчетного, вероятнее всего, вследствие большего влияния краевых эффектов для этой структуры.

Таким образом, приведенный пример показывает, что решение задачи идентификации прочности позволяет не только определить характеристики прочности слоя, наилучшим образом соответствующие имеющимся экспериментальным данным при принятом критерии прочности, но и выявить экспериментальные данные, которые могут быть квалифицированы как «промахи» при используемой методике испытаний и принятом критерии прочности слоя. Следует иметь в виду, что объективно существующие сложности исследования характеристик прочности значительно больше, чем характеристик упругости; большая чувствительность экспериментальных характеристик прочности к концентрации напряжений; отсутствие уверенности в том, что разрушение реального материала хорошо описывается с помощью принятого критерия прочности; большее влияние технологических несовершенств материала на прочность, чем на деформативные свойства, и т. д. С учетом этого особенно важно иметь получаемые при решении задачи идентификации сведения о корректности (достоверности с учетом принятых гипотез деформирования и разрушения материала) экспериментальных данных.

В заключение можно отметить, что для реализации преимуществ методов идентификации характеристик слоя многослойных материалов необходимо, чтобы число экспериментально определенных линейно независимых характеристик пакетов было значительно больше числа искомых характеристик слоя.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Claudon B. Use Methode de Mesure des Caracteristiques Elastiques de Materiaux Stratifies: l'identification. *Vorre textile plastiques renforces*, 1977, № 8, pp. 7–12.
- [2] Vong T. S., Verchery G. Optimal use of Redundant Measurements of Constrained Quantities. *Advances in Composite Materials. Proc. of the 3rd Int. Conf. on Composite Mater.* Paris, 1980, № 2, pp. 1783–1795.
- [3] Суворова Ю.В., Добрынин В.С., Статников И.Н., Барт Ю.Я. Определение свойств композита в конструкции методом параметрической идентификации. *Механика композитных материалов*, 1989, № 1, с. 150–157.
- [4] Таирова Л.П. *Экспериментально-теоретическое исследование деформирования и разрушения трехслойных образцов с углепластиковыми несущими слоями*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1983, 268 с.
- [5] Zinoviev P.A., Tairova L. P. Identifying the Properties of Individual Plies Constituting Hybrid Composites. *Inverse Problems in Engineering*, 1995, vol. 2, pp. 141–154.
- [6] Терегулов И.Г., Каюмов Р.А., Фахрутдинов И.Х. Идентификация механических характеристик композитного материала по результатам испытаний оболочек вращения. *Механика композитных материалов*, 1998, № 6, с. 771–776.
- [7] Думанский А.М., Таирова Л.П., Смердов А.А. Исследование деформативных и прочностных характеристик углепластика на плоских и трехслойных образцах. *Сб. науч. трудов МНТК «Аэрокосмические технологии, 2010–2012»*. Симоньянц Р.П., ред. Москва, ОАО «ВПК «НПО машиностроение»; МГТУ им. Н.Э. Баумана, с. 180–192.
- [8] Васильев В.В., Тарнопольский Ю.М., ред. *Композиционные материалы*. Москва, Машиностроение, 1990, 512 с.
- [9] Zinoviev P.A., Smerdov A.A. *General Composite Analyzer & Designer*. Lancaster, USA, Technomik Publishing Company, 1994, 37 p.
- [10] Зиновьев П.А., Таирова Л.П. Численный эксперимент как метод оценки точности расчета при идентификации характеристик слоев гибридных многослойных композитов. *Сб. докл. 2-й международной конференции «Идентификация динамических систем и обратные задачи»*, Санкт-Петербург, 1994, с. 112–118.
- [11] Таирова Л.П. Идентификация характеристик прочности многослойных композитов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, Спец. вып., 2005. с. 10–21.
- [12] Межслойные эффекты в композитных материалах. Пейгано Н., ред. Москва, Мир, 1993, 346 с.

Статья поступила в редакцию 06.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Таирова Л.П. Оценка корректности экспериментальных данных с помощью идентификации характеристик слоя по результатам испытаний многослойных образцов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/860.html>

**Таирова Людмила Павловна** окончила МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1972 г. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, доцент кафедр «Космические аппараты и ракеты-носители» и «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 80 работ в области экспериментальных исследований и проектирования композитных материалов и конструкций. e-mail: com-or@yandex.ru