К расчету зеркала оптического телескопа

В. Е. Величко

Институт проблем машиноведения РАН,
Российская Федерация, 199178, Санкт-Петербург, Большой пр. В. О., 61

Для цитирования: Величко В. Е. К расчету зеркала оптического телескопа // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2019. Т. 6 (64). Вып. 2. С. 298–307. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2019.212>

Рассматривается задача изгиба толстой кольцевой пластины переменной толщины, расположенной на точечных опорах и находящейся под действием собственного веса. Задача описывает напряженно-деформированное состояние главных зеркал больших оптических телескопов, когда ось зеркала направлена в зенит. Основной характеристикой, рассматриваемой в данной задаче, является поперечное перемещение поверхности приведения пластины, которая совмещена с плоским основанием, где зафиксированы опоры, и лицевой поверхностью пластины, где происходит отражение падающего излучения. С поперечным перемещением связывают ошибки волнового фронта отраженного света: среднеквадратичного отклонения и размаха волнового фронта. Задача решается с помощью двух неклассических теорий пластин: теории пластин Тимошенко — Рейсснера и теории оболочек средней толщины Палия — Спиро. Случай оптимального расположения опор соответствует наименьшему отклонению значений размаха и среднеквадратичного отклонения волнового фронта. При расчете по теории Тимошенко — Рейсснера и по теории Палия — Спиро место оптимального расположения опор совпадает. Для расчета искажения отражающей поверхности главных зеркал оптических телескопов предпочтительней применять теорию Палия — Спиро, учитывающую изменение поперечного перемещения по толщине пластины.

Ключевые слова: математическое моделирование, теория оболочек, модели неклассических теорий оболочек.

1. Введение. Известно, что зеркала оптических телескопов чувствительны к незначительным отклонениям от первоначально заданной формы отражающей поверхности, которые могут происходить из-за деформации зеркала под действием собственного веса и температуры. Оптические приборы имеют различные допуски на отклонение рабочих поверхностей с учетом их формы, расположения и назначения [1]. Отклонения отражающей поверхности зеркала обычно характеризуют двумя величинами: размахом (PV) и среднеквадратическим отклонением (RMS) волнового фронта. Величина PV представляет разницу между максимумом и минимумом оптического пути волнового фронта. С поперечным перемещением отражающей поверхности w она связана следующей формулой [1]:

$$PV = 2 (\max w - \min w). \quad (1)$$

Величина RMS — более общее понятие измерения отклонения волнового фронта. Оно принимает во внимание отклонение всей поверхности [1]:

$$RMS = 2 \sqrt{\frac{1}{S} \iint_S w^2 dS}. \quad (2)$$

Часто используемым критерием оптического качества поверхности является критерий Релея, согласно которому должны выполняться следующие ограничения $PV < \frac{\lambda}{4}$, $RMS < \frac{\lambda}{14}$, где λ — длина волны излучения [1]. Из-за того, что длина волны оптического диапазона порядка 1 мкм, этот критерий становится жестким ограничением на отклонение оптической поверхности.

Чтобы уменьшить влияние температурного расширения [2] и силы тяжести для зеркал, используют точечные опоры, сила реакции которых прикладывается нормально к поверхности, не участвующей в приеме излучения. Обычно это задняя поверхность зеркала. Само зеркало представляет собой пластину переменной толщины, причем средняя поверхность пластины не плоская, то есть пластина не симметричная. Чтобы обеспечить достаточную жесткость, толщина пластины делается большой, и поэтому зеркало, как правило, нельзя рассматривать как тонкую пластину. Отношение толщины зеркала к его диаметру h/D для больших зеркал (диаметром порядка 1 м и более) обычно лежит в пределах от 1/20 до 1/3. Следовательно, зеркало можно рассматривать как пластину средней толщины [3].

Вопрос влияния сдвига на поперечные перемещения зеркала, деформирующегося под собственным весом, рассматривался в [4]. Сравнение шло по классической теории пластин и теорий изгиба пластин с учетом сдвига (неклассическая теория). Как указано автором этой работы, процент влияния сдвиговых перемещений по сравнению с изгибными в зеркале постоянной толщины растет с увеличением отношения h/D при простой поддержке на сплошное кольцо. При поддержке на точечные источники это отношение преобразовывается в отношение толщины зеркала к расстоянию между опорами. Чем больше точечных опор, то есть чем меньше расстояние между ними, тем больше влияние сдвига на поперечные перемещения. Это приводит к выводу, что при расчете отклонения поверхности зеркал оптических телескопов под собственным весом на точечных опорах нужно рассматривать теории, учитывающие поперечный сдвиг.

В этой статье рассматривается расчет поперечных перемещений оптической поверхности зеркала с помощью двух неклассических теорий изгиба пластин: теория пластин Тимошенко — Рейсснера (ТР) и теория оболочек средней толщины Паля — Спиро (ПС). Обе эти теории учитывают сдвиг в пластинах. Проводится сравнение этих теорий по величинам PV и RMS .

2. Описание задачи. Рассмотрим сплошное зеркало переменной толщины, расположенное на трех точечных опорах (рис. 1). Сила тяжести направлена параллельно оси зеркала z . Температурные деформации в зеркале не рассматриваются. Изменение толщины пластины задано по ближайшему параболоиду. Задняя поверхность плоская и является поверхностью приведения пластины. На ней и расположены точечные опоры, расстояние от которых до центра r_{sup} выбирается так, чтобы значения PV и RMS были минимальны. Криволинейную отражающую поверхность зеркала, на которой важны значения поперечных перемещений, будем называть лицевой поверхностью.

Рис. 1. Кольцевая пластина переменной толщины и прикладываемые к ней внешние нагрузки. Разделение задачи на осесимметричную и циклично-симметричную.

Для удобства решения задача разбивается на две [3]. Первая — осесимметричная задача для кольцевой пластины, к которой прикладывается нагрузка, распределенная по всей поверхности пластины, имитирующая силу тяжести, и противоположная ей нагрузка, распределенная по кольцу, где были расположены точечные опоры. Интегральные величины каждой из нагрузок дают вес пластины:

$$q(r, \varphi) = q(r) = -\gamma + p_0 \delta(r - r_{sup}), \quad (3)$$

где распределенные нагрузки по поверхности и кольцу определяются формулами

$$\gamma(r) = \rho h(r)g, \quad p_0 = \frac{\iint_S \gamma(r) dS}{2\pi r_{sup}}. \quad (4)$$

Вторая — циклично-симметричная задача для кольцевой пластины, в которой сохраняются точечные усилия, имитирующие опоры, а вместо силы тяжести прикладывается та же самая по величине распределенная нагрузка, что и в первой задаче, но уже направленная вдоль силы тяжести пластины:

$$q(r, \varphi) = q(r) = -p_0 \delta(r - r_{sup}) + \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{r_{sup}} \delta(r - r_{sup}, \varphi - \varphi_{sup}), \quad (5)$$

где n — количество опор, а на каждую опору действует сосредоточенная сила

$$F_i = \frac{\iint_S \gamma(r) dS}{n}. \quad (6)$$

В сумме решения первой и второй задач дают полное решение (рис. 1).

3. Применение теории Тимошенко — Рейсснера и Палия — Спиро. Обозначение интегральных величин сил и моментов, а также перемещений и углов поворота поверхности приведения пластины представлены на рис. 2.

Рис. 2. Принятые обозначения: сил и моментов, приведенных к поверхности приведения пластины (а); перемещений и углов поворота на поверхности приведения пластины (б).

Приведем гипотезы, на которых основаны теории ТР и ПС. Теория ТР основана на следующих гипотезах [5]:

- прямолинейные волокна оболочки, перпендикулярные к ее поверхности приведения до деформации, остаются после деформации также прямолинейными;
- длина прямолинейного волокна оболочки не изменяется;
- напряжения обжатия по толщине σ_{33} считаются малыми и ими можно пренебречь.

Математическая формулировка этих гипотез сводится к следующим равенствам:

$$\begin{aligned} u^* &= u + z\vartheta, & v^* &= v + z\psi, & w^* &= w, \\ \vartheta &= \vartheta_0 + \gamma_1, & \psi &= \psi_0 + \gamma_2. \end{aligned} \quad (7)$$

где ϑ_0, ψ_0 — углы поворота нормали к поверхности приведения в направлениях координат x и y ; γ_1, γ_2 — углы сдвига в тех же направлениях.

Теория ПС основана на следующих гипотезах [6]:

- прямолинейные волокна оболочки, перпендикулярные к ее поверхности приведения до деформации, остаются после деформации также прямолинейными;
- длина прямолинейного волокна оболочки изменяется;
- напряжения обжатия по толщине σ_{33} изменяются по линейному закону.

Математическая формулировка этих гипотез сводится к следующим равенствам:

$$\begin{aligned} u^* &= u + z\vartheta, & v^* &= v + z\psi, & w^* &= w + F(z), \\ \vartheta &= \vartheta_0 + \gamma_1, & \psi &= \psi_0 + \gamma_2, \end{aligned} \quad (8)$$

где $F(z)$ — функция, характеризующая изменение прогиба по толщине оболочки с учетом σ_{33} . Для изотропного материала она имеет вид

$$F(z) = \frac{1}{E} \left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right) \int_0^z \sigma_{33} dz - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \frac{\nu}{1-\nu} z - (\varkappa_1 + \varkappa_2) \frac{\nu}{1-\nu} z^2 \quad (9)$$

Здесь и далее введены обозначения $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varkappa_1, \varkappa_2, \omega_1, \omega_2, \tau_1, \tau_2$ — деформации и кривизны по направлениям координат r и φ .

Как видно, отличие гипотез теории ПС от теории ТР сводится к учету напряжений σ_{33} и изменению длины прямолинейного элемента. Это позволяет находить поперечные перемещения не только на поверхности приведения, но также и на искривленной поверхности пластины, которая является отражающей поверхностью зеркала. В теории ТР изменение поперечных перемещений по толщине пластины не учитываются.

Применение теории ТР к расчету зеркал оптических телескопов дано в монографии [7] и используется автором в этой работе. Приведенные уравнения теории ПС для пластины получены по монографии [6].

Решение ищется в виде разложения величин в ряд Фурье по следующим формулам [3]:

$$Q(r, \varphi) = \sum_n \left[Q_n^{(1)}(r) \sin n\varphi + Q_n^{(2)}(r) \cos n\varphi \right]$$

для $q, T_1, T_2, N_1, M_1, M_2, u, w, \vartheta, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varkappa_1, \varkappa_2$,

$$Q(r, \varphi) = \sum_n \left[Q_n^{(1)}(r) \cos n\varphi - Q_n^{(2)}(r) \sin n\varphi \right]$$

для $T_{12}, N_2, M_{12}, v, \psi, \omega_1, \omega_2, \tau_1, \tau_2$.

С помощью разложения в ряд Фурье системы уравнений теорий ТР и ПС сводятся к $n+1$ системам обыкновенных дифференциальных уравнений 10-го порядка:

$$\begin{cases} \frac{dQ_i}{dr} = \sum_{f=1}^5 a_{if} u_f + \sum_{g=1}^5 b_{ig}^* Q_g + a_{i0}, & i = 1, 2, 3, 4, 5, \\ \frac{du_j}{dr} = \sum_{f=1}^5 a_{jf}^* u_f + \sum_{g=1}^5 b_{jg} Q_g + b_{j0}, & j = 1, 2, 3, 4, 5. \end{cases} \quad (10)$$

Список неизвестных, используемых в системе уравнений (10), представлены в табл. 1.

Таблица 1. Список неизвестных

Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5
T_1	T_{12}	N_1	M_1	M_{12}	u	v	w	ϑ	ψ

Отличие систем уравнений теории ТР и ПС будет в коэффициентах $a_{if}, b_{ig}^*, a_{jf}^*, b_{jg}$, значения которых для изотропного случая даны в табл. 2–6. Коэффициенты a_{i0} равны $q(r)$ при $i = 3$, во всех остальных случаях они равны 0. Коэффициенты $b_{j0} = 0$ при всех j .

Таблица 2. Коэффициенты a_{if} и b_{ig}^* из (10) в теории ПС

i	a_{if}				
	f				
	1	2	3	4	5
1	$-\frac{1-\nu}{r}$	$\frac{n}{r}$	0	0	0
2	$-\frac{\nu n}{r}$	$-\frac{2}{r}$	0	0	0
3	0	0	$-\frac{1}{r}$	0	0
4	0	0	1	$-\frac{1-\nu}{r}$	$\frac{n}{r}$
5	0	0	0	$-\frac{\nu n}{r}$	$-\frac{2}{r}$
i	b_{ig}^*				
	g				
	1	2	3	4	5
1	$2G\frac{h}{r^2}$	$-2G\frac{h}{r^2}$	0	$G\frac{h^2}{r^2}$	$-nG\frac{h^2}{r^2}$
2	$2nG\frac{h}{r^2}$	$-2n^2G\frac{h}{r^2}$	0	$-nG\frac{h^2}{r^2}$	$-n^2G\frac{h^2}{r^2}$
3	0	0	$\frac{Ghn^2}{r^2}$	0	$\frac{Ghn}{r}$
4	$G\frac{h^2}{r^2}$	$-nG\frac{h^2}{r^2}$	0	$\frac{2}{3}G\frac{h^3}{r^2}$	$\frac{2}{3}nG\frac{h^3}{r^2}$
5	$-nG\frac{h^2}{r^2}$	$n^2G\frac{h^2}{r^2}$	$\frac{Ghn}{r}$	$\frac{2}{3}G\frac{h^3}{r^2}$	$\frac{2}{3}nG\frac{h^3}{r^2} + Gh$

Таблица 3. Коэффициенты a_{jf}^* и b_{jg} из (10) в теории ПС

j	a_{jf}^*				
	f				
	1	2	3	4	5
1	$\frac{2(1-\nu)}{Gh}$	0	0	$-\frac{6(1-\nu^2)}{Eh}$	0
2	0	$\frac{4(1-\nu^2)}{Gh}$	0	0	$-\frac{3}{Gh^2}$
3	0	0	$\frac{1}{Gh}$	0	0
4	$-\frac{6(1-\nu^2)}{Eh^2}$	0	0	$\frac{12(1-\nu^2)}{Eh^3}$	0
5	0	$-\frac{3}{Gh^2}$	0	0	$\frac{3}{Gh^3}$
j	b_{jg}				
	g				
	1	2	3	4	5
1	$-\frac{\nu}{r}$	$\frac{n\nu}{r}$	0	0	0
2	$-\frac{n}{r}$	$\frac{1}{r}$	0	0	0
3	0	0	0	-1	0
4	0	0	0	$-\frac{\nu}{r}$	$\frac{n\nu}{r}$
5	0	0	0	$-\frac{n}{r}$	$\frac{1}{r}$

4. Результаты работы. Наружный диаметр зеркала примем равным 1 м, внутренний — 0.2 м. Высота нижней и верхней частей профиля зеркала — 0.2 и 0.3 м соответственно. Получится отношение максимальной толщины пластины к диаметру — 0.3. Материал, из которого изготовлено зеркало, — Zerodur. Он изотропен с модулем Юнга $E = 1.0 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициентом Пуассона $\nu = 0.3$ и плотностью $\rho = 2200$ кг/м³.

Рассматривались первые 61 гармоника. Система уравнений (10) при $n = 0$ решается методом прогонки. С повышением номера гармоники решение системы становится неустойчивым. Поэтому для номеров гармоники $n > 0$ применяется метод ортогональной прогонки [3]. Результаты решения для различных радиусов расположения опор r_{sup} показаны в табл. 6.

Таблица 4. Коэффициенты a_{if} и b_{ig}^* из (10) в теории ТР

a_{if}					
i	f				
	1	2	3	4	5
1	$-\frac{1-\nu}{r}$	$-\frac{n}{r}$	0	0	0
2	$\frac{\nu n}{r}$	$-\frac{h'}{r}$	0	0	0
3	0	$\frac{nh'}{6r}$	$-\frac{1}{r}$	0	$-\frac{nh'}{2rh}$
4	0	0	1	$-\frac{1-\nu}{r}$	$-\frac{n}{r}$
5	0	$-\frac{h'}{r}$	0	$\frac{n\nu}{r}$	$-\frac{2}{r} + \frac{h'}{2h}$
b_{ig}^*					
j	g				
	1	2	3	4	5
1	$\frac{Eh}{r^2}$	$-\frac{nEh}{r^2}$	0	$\frac{Eh^2}{2r^2}$	$-\frac{nEh^2}{2r^2}$
2	$-\frac{nEh}{2r^2}$	$\frac{n^2Eh}{2r^2}$	0	$-\frac{nEh^2}{2r^2}$	$\frac{n^2Eh^2}{2r^2}$
3	0	0	$-\frac{5Gn^2h}{6r^2}$	0	$-\frac{5Gnh}{6r}$
4	$\frac{Eh^2}{r^2}$	$-\frac{nEh^2}{2r^2}$	0	$\frac{Eh^3}{3r^2}$	$\frac{nEh^3}{3r^2}$
5	$-\frac{nEh^2}{2r^2}$	$\frac{n^2Eh^2}{2r^2}$	$-\frac{5Gnh}{6r}$	$\frac{n^2Eh^3}{3r^2}$	$\frac{7}{12} \frac{n^2Eh^3}{r^2} + \frac{5}{6} Gh$

Таблица 5. Коэффициенты a_{jf}^* и b_{jg} из (10) в теории ТР

a_{jf}^*					
j	f				
	1	2	3	4	5
1	$\frac{2(1-\nu)}{Gh}$	0	0	$-\frac{3(1-\nu)}{Gh^2}$	0
2	0	$\frac{4}{Gh}$	0	0	$-\frac{6}{Gh^2}$
3	$-\frac{h'}{5Gh}$	0	$-\frac{6}{5Gh}$	$\frac{3h'}{5Gh^2}$	0
4	$-\frac{3(1-\nu)}{Gh^2}$	0	0	$\frac{6(1-\nu)}{Gh^2}$	0
5	0	$-\frac{6}{Gh^2}$	0	0	$\frac{12}{Gh^3}$
b_{jg}					
j	g				
	1	2	3	4	5
1	$-\frac{\nu}{r}$	$-\frac{n\nu}{r}$	0	0	0
2	$\frac{n}{r}$	$\frac{1}{r}$	0	0	0
3	0	0	0	1	0
4	0	0	0	$-\frac{\nu}{r}$	$-\frac{n\nu}{r}$
5	0	0	0	$\frac{n}{r}$	$\frac{1}{r}$

Таблица 6. Значения размаха и среднеквадратичного отклонения при различном расположении опор вдоль радиуса

$r_{sup}, \text{ м}$	Теория ТР		Теория ПС			
	Поверхность приведения		Поверхность приведения		Лицевая поверхность	
	$PV, \text{ м}$ $\times 10^{-7}$	$\sigma, \text{ м}$ $\times 10^{-7}$	$PV, \text{ м}$ $\times 10^{-7}$	$\sigma, \text{ м}$ $\times 10^{-7}$	$PV, \text{ м}$ $\times 10^{-7}$	$\sigma, \text{ м}$ $\times 10^{-7}$
0.1	6.313	4.366	6.045	4.188	5.622	4.895
0.2	2.730	1.863	2.531	1.757	2.389	1.989
0.32	1.333	1.323	1.212	1.267	0.427	1.225
0.4	2.177	1.721	2.074	1.675	1.327	1.574
0.49	4.572	3.805	4.138	3.397	3.859	3.327

а

б

Рис. 3. Поперечные перемещения пластины на опорах, расположенных на радиусе $r_{sup} = 0.32$ м, в сечении, проходящем через опору (а); в сечении, проходящем между опор (б).

а

б

Рис. 4. Поперечные перемещения на лицевой поверхности пластины на опорах, расположенных на радиусе $r_{sup} = 0.32$ м, согласно теории Тимошенко — Рейсснера (а); Палия — Спиро (б).

Наиболее оптимальным случаем считается достижение минимальных значений PV и σ . По теории ТР и ПС для данной пластины этот случай реализуется, когда опоры расположены на радиусе $r_{sup} = 0.32$ м.

Результат решения для радиуса расположения опор $r_{sup} = 0.32$ м представлен на рис. 3 и 4. На рис. 3 показано решение системы уравнений (10) для теорий ТР и ПС на поверхности приведения и лицевой поверхности в сечении, проходящем через опору ($\varphi = 0$), и в сечении, проходящем между опор ($\varphi = \pi/3$). На рис. 4 показаны перемещения по теории ТР и ПС на лицевой поверхности пластины.

5. Заключение. Теория оболочек средней толщины ПС и теория пластин ТР — это уточняющие теории, учитывающие поперечный сдвиг в пластинах. Но в отличие от теории ТР теория ПС учитывает также изменение величины поперечных перемещений по толщине пластины, а не только на поверхности приведения. Это важно для толстых пластин, в которых необходимо знать поперечные перемещения точек поверхности, противоположных поверхности приложения силы. Частным случаем применения таких пластин являются оптические зеркала. Поэтому для расчета деформации отражающей поверхности главных зеркал оптических телескопов предпо-

читательней применять теории, учитывающие изменение поперечного перемещения с толщиной.

Литература

1. Doyle K. B., Genberg V. L., Michels G. J. Integrated optomechanical analysis. Second Edition. Bellingham, Washington, USA: SPIE Press, 2012.
2. Bauer S. M., Smirnov A. L. Calculation of the thermoelastic strain of a mirror // St. Petersburg University Mechanics Bulletin. 1993. N 2. P. 8–15.
3. Григоренко Я. М., Василенко А. Т. Методы расчета оболочек: в 5 т. Т. 4. Теория оболочек переменной жесткости. Киев: Наук. думка, 1981.
4. Yoder P., Vukobratovich D. Opto-Mechanical System Design. Vol. 2: Design and analysis of large mirrors and structures. London, New York: CRC Press Taylor and Francis Group. Boca Raton, 2015.
5. Григolloк Э. И., Селезов И. Т. Неклассические теории колебаний стержней, пластин и оболочек. М.: ВИНТИ, 1973.
6. Палий О. М., Спино В. Е. Анизотропные оболочки в судостроении. Л.: Судостроение, 1977.
7. Бауэр С. М., Ковалев М. Б., Петров М. Б. и др. Расчет и оптимизация металлических зеркал телескопов / под ред. М. И. Улитина. СПб: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 1997.

Статья поступила в редакцию 2 ноября 2018 г.;
после доработки 19 декабря 2018 г.;
рекомендована в печать 20 декабря 2018 г.

Контактная информация:

Величко Виктор Евгеньевич — аспирант; viktor.velichko@mail.ru

Calculating of the optical telescope mirror

V. E. Velichko

Institute for Problems in Mechanical Engineering RAS,
Bolshoy pr. V. O., 61, St. Petersburg, 199178, Russian Federation

For citation: Velichko V. E. Calculating of the optical telescope mirror. *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*, 2019, vol. 6 (64), issue 2, pp. 298–307. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2019.212> (In Russian)

The problem of bending of a thick annular plate of variable thickness based on point supports under its weight is considered. The stress-strain state of primary mirrors of large optical telescopes, when the mirror axes point to the Zenith, is analyzed. The main specific feature of the problem is the transverse displacement of the plate reference surface and the front surface of the plate. The flat base is assumed as the reference surface, where all supports are fixed. The front surface is surface, where the incident light is reflected. The wave front errors of the reflected light are associated with the transverse displacement: the standard deviation and the span of wave front. For the solution the Timoshenko — Reissner theory of plates and Palii — Spiro shells theory of the middle thickness are used. The case of the optimal supports location corresponds to the smallest magnitude of the wave front. Both Timoshenko — Reissner theory and Palii — Spiro theory provide same result for the optimal supports location. In order to make the calculation of the distortion of the reflecting surface of the mirror of an optical telescope more accurate it is recommended to use the Palii — Spiro theory, which takes into account the variableness of the transverse displacement along the plate thickness.

Keywords: mathematical simulation, shell theory, nonclassical models.

References

1. Doyle K. B., Genberg V. L., Michels G. J., *Integrated optomechanical analysis* (Second Edition, SPIE Press, Bellingham, Washington, USA, 2012).
2. Bauer S. M., Smirnov A. L., "Calculation of the thermoelastic strain of a mirror", *St. Petersburg University Mechanics Bulletin* (2), 8–15 (1993).
3. Grigorenko Ya. M., Vasilenko A. T., *Variable stiffness shell theory*, in *Shell calculation methods* 4 (Naukova dumka Publ., Kiev, 1981). (In Russian)
4. Yoder P., Vukobratovich D. *Design and analysis of large mirrors and structures*, in *Opto-Mechanical System Design 2* (CRC Press Taylor and Francis Group, Boca Raton, London, New York, 2015).
5. Grigoluk E. I., Seleznev I. T., *Nonclassical theory of oscillations of beams, plates and shells* (VINITI Publ., Moscow, 1973). (In Russian)
6. Palii O. M., Spiro V. E., *Anisotropic Shells in Shipbuildings. Theory and Analysis* (Sudostroenie Publ., Leningrad, 1977). (In Russian)
7. Bauer S. M., Kovalev A. B., Petrov M. B., *Calculation and optimization of metal mirrors for telescopes* (St. Petersburg University Press, St. Petersburg, 1997). (In Russian)

Received: November 2, 2018

Revised: December 19, 2018

Accepted: December 20, 2018

Author's information:

Viktor E. Velichko — viktor.velichko@mail.ru

ХРОНИКА

28 ноября 2018 г. на заседании секции теоретической механики им. проф. Н. Н. Поляхова в Санкт-Петербургском Доме ученых РАН был заслушан доклад доктора физ.-мат. наук, профессора А. А. Тихонова (СПбГУ) на тему «Об электродинамической тросовой системе для удаления космического мусора».

Краткое содержание доклада:

Обсуждается проблема неустойчивости электродинамической тросовой системы (ЭДТС) в околоземном пространстве. Рассматривается новая конструктивная схема для обеспечения функционирования ЭДТС в режиме ориентации натянутого троса вдоль местной вертикали. Предложены новые способы реализации восстанавливающего и демпфирующего моментов для стабилизации ЭДТС. Получены условия асимптотической устойчивости вертикального положения троса. Проанализировано влияние градиентности магнитного поля Земли на колебательное (относительно центра масс) движение натянутого троса. Доказано существование равновесного положения троса, близкого к вертикальному, для широкой области изменения параметров ЭДТС. Показано, что найденное положение равновесия может быть использовано в качестве номинального режима ориентации ЭДТС, предназначенной для удаления космического мусора.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-01-00672-а).