

УДК 359.3

DOI 10.17223/19988621/68/11

**В.М. Пестренин, И.В. Пестренина, С.В. Русаков, Г.В. Бузмакова****ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КРУПНОГАБАРИТНОЙ ОБОЛОЧКИ НА ЕЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ<sup>1</sup>**

Рассматривается развертывание внутренним давлением из упакованного состояния упругой цилиндрической оболочки за конечное время. Показано, что пневматическое нагружение упругой конструкции сопровождается ее колебаниями с возрастающей частотой и убывающей во времени амплитудой. Выявлено, что период колебаний оболочки зависит от текущего давления нагружения и не зависит от скорости подачи давления, практически совпадая с периодом колебаний статически нагруженной таким же давлением оболочки.

**Ключевые слова:** *крупногабаритные оболочки, колебания, геометрически нелинейная модель упругого тела, метод конечных элементов, развертывание пневматическое.*

Пневматические крупногабаритные конструкции широко применяются в современной строительной практике. Они изготавливаются из мягких материалов (тканей, пленок) и рассчитываются по безмоментной теории оболочек. К примеру, это здания, ангары для хранилищ, спортивные и выставочные павильоны, опалубки, емкости для хранения жидкости и т.п. [1–4]. Избыточное давление в таких конструкциях 0.001–0.1 ат. Крупногабаритные оболочечные конструкции планируется применять также в условиях космоса. Они могут доставляться на орбиту в упакованном состоянии и развертываться там внутренним давлением. Прогнозируется их использование в качестве рефлекторов космических телескопов и антенн [2, 5–7], зеркальных и линзовых концентраторов солнечного излучения [8, 9], модулей жизнеобеспечения космических экипажей [10, 11]. В космических условиях давление внутри оболочечной конструкции диктуется физиологическими возможностями человека и составляет 0.3–1 ат. При таком избыточном давлении изготовление крупногабаритной конструкции из мягкой ткани представляется нецелесообразным, поэтому в работах [12, 13] разрабатываются методы упаковки и пневматического статического развертывания крупногабаритных оболочечных конструкций, изготовленных из жестких (сопротивляющихся изгибу) композитов (в частности, из углепластиков). В этих публикациях изучаются крупногабаритные конструкции, составленные из соединенных шарнирами элементов, срединная поверхность которых имеет развертку, устанавливаются особенности термомеханического состояния газа, заполняющего оболочку при ее нагружении.

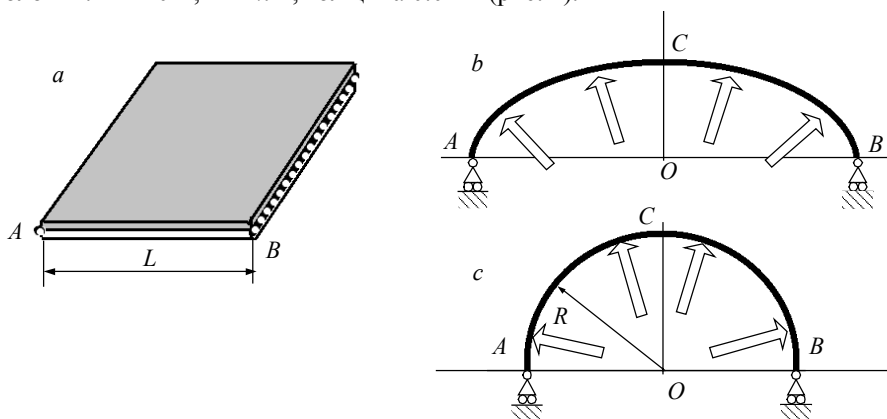
Целью настоящей работы является изучение влияния скорости пневматического развертывания оболочечной крупногабаритной цилиндрической конструкции из упакованного состояния в рабочее на ее текущие динамические параметры

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-41-590649 и гранта министерства образования и науки Пермского края С26-793.

(частоты собственных колебаний и их амплитуды, сопровождающие процесс развертывания); сравнение этих параметров с их значениями в квазистатическом случае нагружения.

### Постановка задачи

Принимается, что в упакованном состоянии оболочка представляет собой две одинаковые прямоугольные пластины, скрепляемые шарнирами по двум краям, параллельным образующим (рис. 1, *a*). Шарниры не сопротивляются изгибу, поэтому окружной момент в них задается равным нулю. Геометрические параметры оболочки:  $R = 10$  м,  $L = \pi R$ , толщина 0.01 м (рис. 1).



**Рис. 1.** Расчетная схема: *a* – упакованная оболочка; *b* – состояние в процессе развертывания; *c* – развернутая оболочка

**Fig. 1.** Computational scheme: (*a*) a packaged shell, (*b*) state of the shell during deployment, and (*c*) an unfolded shell

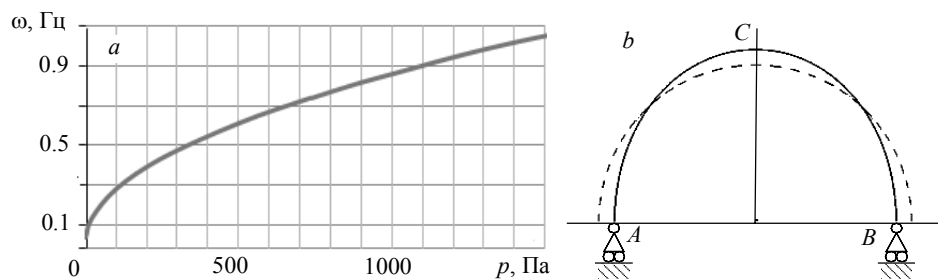
Протяженность конструкции в направлении оси оболочки считается достаточно большой (до 100 м). поэтому при симметричных движениях конструкции относительно плоскости симметрии оболочки, не содержащей шарниры, осевые деформации полагаются постоянными. Приведенные материальные характеристики: модуль Юнга  $50 \cdot 10^6$  Па, коэффициент Пуассона 0.26, плотность  $0.83 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Задача состоит в изучении динамического поведения рассматриваемой оболочечной конструкции в процессе пневматического развертывания из упакованного состояния в эксплуатационное за конечное время. Формоизменение оболочечной конструкции в процессе ее развертывания реализуется с конечными перемещениями ее точек и поворотами. При этом малыми остаются относительные удлинения и сдвиги. Поэтому напряженно-деформированное состояние (НДС) оболочки на этапе развертывания рассчитывается с использованием геометрически нелинейной модели, реализованной в инженерном пакете ANSYS (элемент shell\_181).

### Квазистатическое развертывание оболочки внутренним давлением

Предварительно рассматривается пневматическое развертывание оболочки в предположении, что силы инерции пренебрежимо малы. Нагнетаемое внутреннее давление изменяется от нуля до величины, при которой отрезки ОА, ОВ, ОС достигают значения 10 м (рис. 1, *c*). Окончательное давление развертывания оказыва-

ется равным 1500 Па. Рост внутреннего давления изменяет динамические характеристики конструкции, в частности возрастают ее собственные частоты. На рис. 2 приводится зависимость от давления первой собственной частоты.

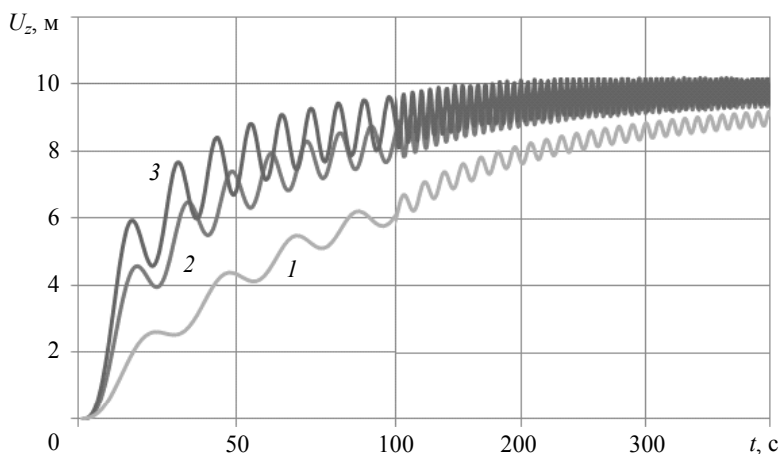


**Рис. 2.** Зависимость первой собственной частоты оболочки от внутреннего давления (а); первая форма колебаний (b)

**Fig. 2.** (a) The first natural frequency of the shell as a function of the internal pressure and (b) the first vibration mode

### Динамическое развертывание оболочки внутренним давлением

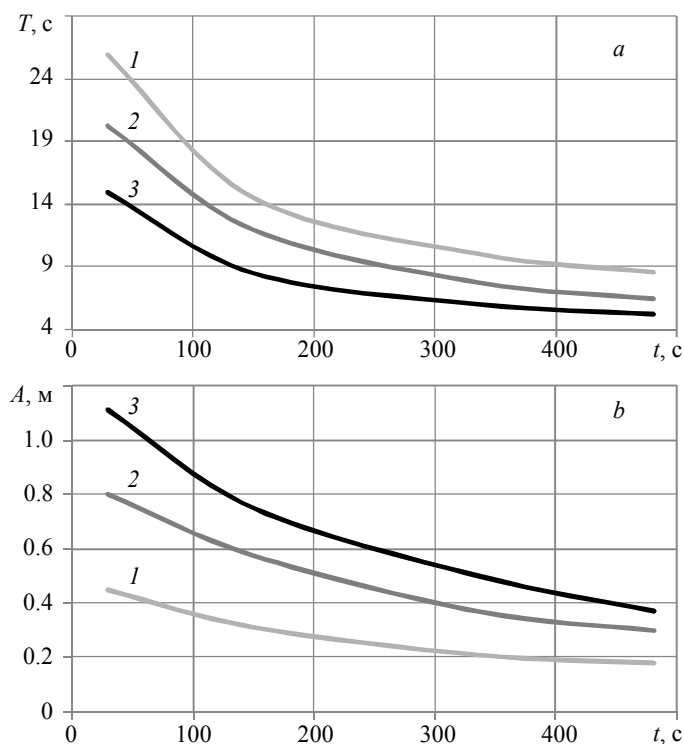
Под динамическим понимается развертывание конструкции посредством нагружения внутренним давлением за конечное время. В процессе динамического развертывания дополнительно к поверхностным силам на оболочку действуют силы инерции. Исследование динамического состояния оболочки проводится для трех скоростей нагнетания давлением:  $v_1 = 0.033$  Па/с,  $v_2 = 0.067$  Па/с,  $v_3 = 0.1$  Па/с. Считается, что в начальный момент оболочка находится в состоянии покоя. Предельное значение давления развертывания принимается равным статическому давлению 1500 Па. Результаты вычислений представлены на следующих рисунках.



**Рис. 3.** Перемещение точки C при развертывании оболочки в зависимости от времени при различных скоростях нагнетания давления: 1–  $v_1$ ; 2–  $v_2$ ; 3–  $v_3$

**Fig. 3.** Displacement of point C during shell's deploying as a function of time at various pressure injection rates: 1,  $v_1$ ; 2,  $v_2$ ; and 3,  $v_3$

Из рис. 3 видно, что перемещения точек оболочки имеют колебательный характер. Это утверждение справедливо для всех параметров ее состояния (усилий, напряжений, деформаций). При разворачивании оболочки с постоянной скоростью период колебаний параметров состояния оболочки и амплитуда с увеличением давления убывают (рис. 4).



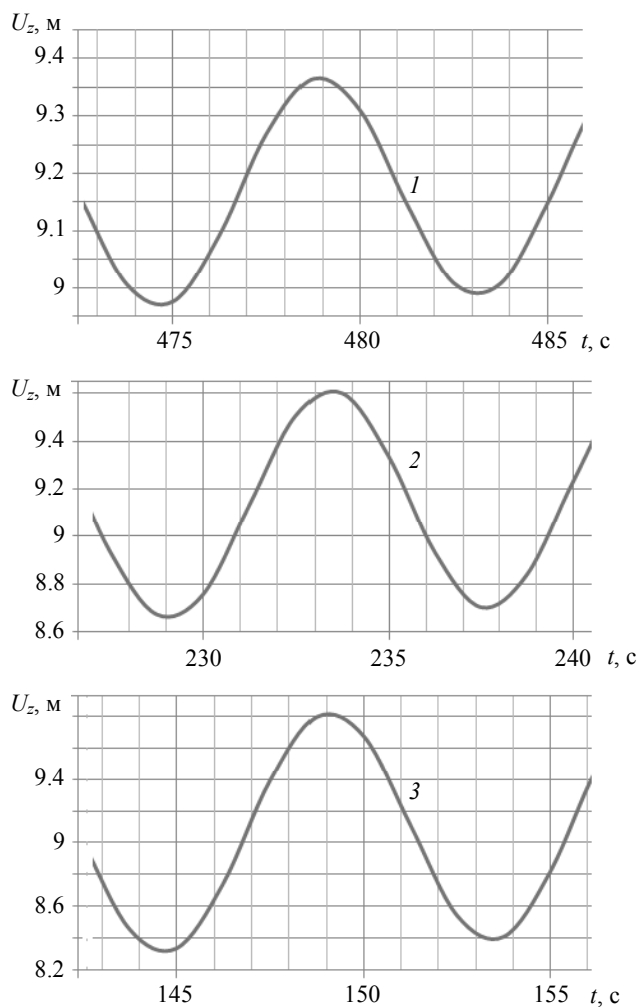
**Рис. 4.** Зависимость периода колебаний (а) и амплитуды точки *C* (б) от времени при различных скоростях нагнетания давления: 1–  $v_1$ ; 2–  $v_2$ ; 3–  $v_3$

**Fig. 4.** Dependence of the (a) oscillation period and (b) amplitude of point *C* on time at various pressure injection rates: 1,  $v_1$ ; 2,  $v_2$ ; and 3,  $v_3$

С приближением давления к 1500 Па (статическому давлению разворачивания) точки конструкции независимо от скорости нагружения совершают колебательные движения с частотой, равной первой собственной частоте колебаний при данном давлении в статическом состоянии.

Отмеченная особенность характерна для любого промежуточного давления нагружения. Периоды колебаний движения точек практически не зависят от скорости пневматического нагружения, а определяются лишь текущим давлением. Период колебаний с погрешностью, не превышающей погрешность используемого вычислительного метода, оказывается равным периоду собственных колебаний по первой форме оболочки. Для примера на рис. 5 приводится траектория движения точки *C* на коротком временном промежутке вблизи текущего давления  $p = 18$  Па при различных скоростях нагнетания давления.

Из рисунка видно, что в окрестности рассматриваемого давления периоды колебаний точки *C* для различных скоростей нагнетания давления совпадают.



**Рис. 5.** Движение точки  $C$  на отрезке времени со средним значением давления  $p = 18$  Па при различных скоростях нагнетания давления: 1 –  $v_1$ ; 2 –  $v_2$ ; 3 –  $v_3$

**Fig. 5.** Displacement of point  $C$  in a time interval with the average pressure  $p = 18$  Pa at various pressure injection rates: 1,  $v_1$ ; 2,  $v_2$ ; and 3,  $v_3$

### Закключение

Проведено исследование о динамическом пневматическом разворачивании крупногабаритной цилиндрической упругой оболочки из упакованного состояния за конечное время. Обнаружено, что такое разворачивание сопровождается свободными колебаниями конструкции. Частота таких колебаний возрастает, а амплитуда убывает с ростом внутреннего давления. Показано, что период колебаний не зависит от скорости нагружения давлением и зависит лишь от его текущего значения. При этом период колебаний параметров состояния оболочки оказывается равным периоду колебаний статически нагруженной текущим давлением кон-

струкции. Выявленное в результате исследования изменение в широком диапазоне частот собственных колебаний конструкции в процессе ее пневматического разворачивания представляется важным обстоятельством, так как делает возможным предсказание сопутствующих процессу резонансных режимов.

Приведенные результаты могут найти применение в задачах механики о разворачивании крупногабаритных оболочечных конструкций (например, рефлекторов антенн) в условиях космоса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белов Д.В., Югов А.М. Возведение купольных конструкций с использованием пневматических опалубок // Вестник Донбасской академии строительства и архитектуры. 2009. № 6(80). С. 3–8.
2. Кривошапко С.Н. Пневматические конструкции и сооружения // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2015. № 3. С. 45–53.
3. Соколовская И.Ю. Напряженно-деформированное состояние армированных пневмоопорных оболочек и наземных емкостей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17 – Строительная механика; 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.. Новосибирск: Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, 2006. 22 с.
4. Ермолов В.В., Бэрд У.У., Бубнер Э. и др. Прошлое, настоящее и будущее пневматических строительных конструкций // Пневматические строительные конструкции / под ред. В.В. Ермолова. М.: Стройиздат, 1983. С. 5–46.
5. Quinn G., Gengnagel C. A review of elastic grid shells, their erection methods and the potential use of pneumatic formwork // *Mob Rapidly Assem Struct IV*. 2014. V. 136. P. 129–143. DOI:10.2495/MAR140111.
6. Бельков А.В. Моделирование крупногабаритных пневматических конструкций // Перспективы развития фундаментальных наук: Сборник научных трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2016. Т. 3. С. 21–23.
7. Морозков И.С., Ромащенко С.В., Шевцов Е.А., Шatrov А.К. Рефлекторы антенн космических аппаратов на базе гибкой формообразующей структуры // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2010. Т. 1. № 6. С. 100–101.
8. Леонов В.В., Жарёнов И.С. Анализ особенностей конструкции крупногабаритных надувных концентраторов солнечного излучения // Наука и образование: научное издание МГТУ им. НЭ Баумана. 2013. № 10. С. 177–192. DOI:10.7463/1013.0618788.
9. Леонов В.В., Жарёнов И.С. Особенности проектирования крупногабаритных космических зеркальных концентраторов солнечного излучения // Сб. трудов шестой Российской национальной конференции по теплообмену. 2014. С. 1233–1236.
10. Kondyurin A., Lauke B., Kondyurina I., Orba E. Creation of biological module for self-regulating ecological system by the way of polymerization of composite materials in free space // *Advances in Space Research*. No. 34. 2004. P. 1585–1591.
11. Kondyurina I., Kondyurin A., Lauke B., Figiel L., Vogel R., Reuter U. Polymerisation of composite materials in space environment for development of a Moon base // *Advances in Space Research*. V. 37. 2006. P. 109–115.
12. Pestrenin V.M., Pestrenina I.V., Rusakov S.V., Kondyurin A.V. Deployment of large-size shell constructions by internal pressure // *Mechanics of Composite Materials*. 2015. V. 51. No. 5. P. 629–636.
13. Пестренин В.М., Пестренина И.В., Русаков С.В., Кондюрин А.В., Корепанова А.В. Упаковка и разворачивание внутренним давлением крупногабаритных оболочечных конструкций // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2016. № 4. С. 273–286. DOI 10.15593/pern.mech/2016.4.18.

Pestrenin V.M., Pestrenina I.V., Rusakov S.V., Buzmakova G.V. (2020) A STUDY OF THE IMPACT OF THE PNEUMATIC LOADING RATE ON DYNAMIC PARAMETERS FOR A LARGE-SIZED CYLINDRICAL SHELL *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 68. pp. 118–125

DOI 10.17223/19988621/68/11

Keywords: large-sized shells, vibrations, geometrically nonlinear model of elastic body, finite element method, pneumatic deployment.

The solid mechanics problem on the packaging and subsequent pneumatic deployment of large-sized shells is relevant due to the need to operate such structures in hard-to-reach places. In particular, such a place is outer space. The paper considers the elastic cylindrical shell deployment from a packed state by internal pressure in a finite time interval. The packaged shell consists of two rectangular plates joined by ideal (with no bending resistance) joint-hinges arranged at the edges. Both static and dynamic problems are considered. Solutions are obtained on the basis of a geometrically nonlinear model of an elastic body using the ANSYS engineering package. It is shown that the pneumatic loading of an elastic structure is accompanied by its oscillations with increasing frequency and the amplitude decreasing in time. The period of shell oscillations is found to be dependent on the operating loading pressure and independent of the pressure supply rate, and it almost equals the period of oscillations of the statically loaded shell under the same pressure. The wide range variation in the natural oscillation frequencies of the structure during pneumatic deployment, which is revealed in the study, is of great importance since it makes possible to predict resonant modes accompanying the process. The results of the study will be used in problems of mechanics related to the pneumatic deployment of shell structures (for example, telescope reflectors, antennas, etc.) in space.

**Financial support.** The research was supported by the RFFR grant N 17-41-590649 and the grant of the Ministry of Education and Science of the Perm Krai C26-793.

*Valeriy M. PESTRENIN* (Candidate of Physics and Mathematics, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation). E-mail: PestreninVM@mail.ru

*Irena V. PESTRENINA* (Candidate of Technical Sciences, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation). E-mail: IPestrenina@gmail.com

*Sergey V. RUSAKOV* (Doctor of Physics and Mathematics, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation). E-mail: Rusakov@psu.ru

*Galina V. BUZMAKOVA* (Perm State National Research University, Perm, Russian Federation). E-mail: galina210896@mail.ru

## REFERENCES

1. Belov D.V., Yugov A.M. (2009) Vozvedenie kupol'nykh konstruksiy s ispol'zovaniem pnevmaticheskikh opalubok [Erection of dome structures using pneumatic formwork]. *Vestnik Donbasskoy natsional'noy akademii stroitel'stva i arkhitektury – Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 6(80). pp. 3–8.
2. Krivoschapko S.N. (2015) Pnevmaticheskie konstruksii i sooruzheniya [Pneumatic structures and constructions]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy – Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 3. pp. 45–53.
3. Sokolovskaya I.Yu. (2006) *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie armirovannykh pnevmoopornnykh obolochek i nazemnykh emkostey* [Stress-strain state of reinforced air-supported shells and surface-mounted tanks]. Dissertation. Novosibirskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet.

4. Ermolov V.V. (1983) *Proshloe, nastoyashchee i budushchee pnevmaticheskikh stroitel'nykh konstruksiy. Pnevmaticheskie stroitel'ny'e konstrukcii* [Past, present, and future of pneumatic building structures. Pneumatic building structures]. Moscow: Stroyizdat. pp. 5–46.
5. Quinn G., Gengnagel C. (2014) A review of elastic grid shells, their erection methods and the potential use of pneumatic formwork. *Mobile and Rapidly Assembled Structures IV*. 136. pp. 129–143. DOI: 10.2495/MAR140111.
6. Bel'kov A.V. (2016) Modelirovanie krupnogabaritnykh pnevmaticheskikh konstruksiy [Modeling of large-sized pneumatic structures]. *Collection of scientific works of the XIII International conference of students, graduate students and young scientists. National Research Tomsk Polytechnic University*. 3. pp. 21–23.
7. Morozkov I.S., Romashchenko S.V., Shevtsov E.A., Shatrov A.K. (2010) Reflektory antenn kosmicheskikh apparatov na baze gibkoy formoobrazuyushchey struktury [Reflectors of spacecraft antennas based on a flexible shaping structure]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 1(6). pp. 100–101.
8. Leonov V.V., Zharenov I.S. (2013) Analiz osobennostey konstruksii krupnogabaritnykh naduvnykh kontsentratorov solnechnogo izlucheniya [Analysis of design features of large-sized inflatable solar concentrators]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana – Science and Education: Scientific Edition of Bauman MSTU*. 10. pp. 177–192. DOI: 10.7463/1013.0618788.
9. Leonov V.V., Zharenov I.S. (2014) Osobennosti proektirovaniya krupnogabaritnykh kosmicheskikh zerkal'nykh kontsentratorov solnechnogo izlucheniya [Features of the design of large-sized space mirror concentrators of solar radiation]. *Proceedings of the VI<sup>th</sup> National Conference on Heat Transfer*. pp. 1233–1236.
10. Kondyurin A., Lauke B., Kondyurina I., Orba E. (2004) Creation of biological module for self-regulating ecological system by the way of polymerization of composite materials in free space. *Advances in Space Research*. 34. pp. 1585–1591. DOI: 10.1016/j.asr.2004.01.019.
11. Kondyurina I., Kondyurin A., Lauke B., Figiel L., Vogel R., Reuter U. (2006) Polymerisation of composite materials in space environment for development of a Moon base. *Advances in Space Research*. 37. pp. 109–115. DOI: 10.1016/j.asr.2005.05.031.
12. Pestrenin V.M., Pestrenina I.V., Rusakov S.V., Kondyurin A.V. (2015) Deployment of large-size shell constructions by internal pressure. *Mechanics of Composite Materials*. 51(5). pp. 629–636. DOI: 10.1007/s11029-015-9532-5.
13. Pestrenin V.M., Pestrenina I.V., Rusakov S.V., Kondyurin A.V., Korepanova A.V. (2016) Upakovka i razvertyvanie vnutrennim davleniem krupnogabaritnykh obolocheknykh konstruksiy [Packaging and deployment of large shell structures by internal pressure loading]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika – PNRPU. Mechanics Bulletin*. 4. pp. 273–286. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.4.18.

Received: April 3, 2019