

Гилев В.Г., Русаков С.В., Пестренин В.М., Пестренина И.В. Оценка жесткости разворачиваемой внутренним давлением цилиндрической композитной оболочки на начальном этапе полимеризации связующего // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 1. – С. 93–99. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.1.08

Gilev V.G., Rusakov S.V., Pestrenin V.M., Pestrenin I.V. Estimation of the cylindrical composite shell stiffness at the initial stage of curing during deployment by internal pressure. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2018, no.1, pp. 93-99. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.1.08



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 1, 2018

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2018.1.08

УДК 539.3:531.7

## ОЦЕНКА ЖЕСТКОСТИ РАЗВЕРТЫВАЕМОЙ ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КОМПОЗИТНОЙ ОБОЛОЧКИ НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ СВЯЗУЮЩЕГО

В.Г. Гилев, С.В. Русаков, В.М. Пестренин, И.В. Пестренина

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 20 декабря 2017 г.  
Принята: 15 марта 2018 г.  
Опубликована: 30 марта 2018 г.

#### Ключевые слова:

экспериментально-расчетный метод, эффективный модуль упругости, отверждение полимера, цилиндрическая оболочка, композитные материалы.

### АННОТАЦИЯ

Рассматривается экспериментально-расчетный метод оценки жесткостных свойств цилиндрической оболочечной конструкции из композиционного материала с полимерной матрицей на начальном этапе ее отверждения. Оценка жесткостных параметров композиции на этом этапе полимеризации вследствие различного физического состояния армирующих элементов и связующего методами механики композитных материалов приводит к плохо обусловленным матрицам жесткости, непригодным для достоверного описания механического поведения конструкции. Актуальность проводимого исследования связана с изучением технологии изготовления крупногабаритных пневматических конструкций на основе композиций, подвергаемых отверждению в условиях космоса. В предлагаемом методе экспериментально определяется давление разворачивания цилиндра (давление, при котором диаметр цилиндра принимает номинальное значение), соответствующее текущей степени полимеризации связующего. Степень полимеризации характеризуется измеряемыми вискозиметром вязкостью и динамическим модулем полимера. Приводится описание установки, используемой в экспериментах, приборов, осуществляющих фиксацию измеряемых параметров состояния, и порядок проведения опытов. Расчетным путем на основе геометрически нелинейной упругой модели методом последовательных приближений определяется эффективный модуль упругости материала цилиндра, соответствующий его жесткостным характеристикам в течение нагружения внутренним давлением до давления разворачивания. Время разворачивания мало по сравнению с временем полной полимеризации связующего. Посредством сопоставления экспериментальных и расчетных данных устанавливается зависимость эффективного модуля упругости от параметров отверждения связующего. Выявлена практически линейная зависимость давления разворачивания цилиндра от эффективного модуля упругости, что позволяет экстраполировать результаты исследования на значения параметров связующего, не подтвержденные опытом. Приведенные результаты позволяют проводить оценку внутреннего давления, необходимого для разворачивания цилиндрических оболочек из композитов с частично отвержденным связующим, путем решения задач механики деформируемого твердого тела.

© ПНИПУ

© Гилев Валерий Григорьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, e-mail: [gvg@psu.ru](mailto:gvg@psu.ru)  
Русаков Сергей Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: [Rusakov@psu.ru](mailto:Rusakov@psu.ru)  
Пестренин Валерий Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент, e-mail: [Pestreninv@mail.ru](mailto:Pestreninv@mail.ru)  
Пестренина Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: [IPestrenina@gmail.com](mailto:IPestrenina@gmail.com)

Valery G. Gilev – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: [gvg@psu.ru](mailto:gvg@psu.ru)  
Sergey V. Rusakov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: [Rusakov@psu.ru](mailto:Rusakov@psu.ru)  
Valery M. Pestrenin – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: [Pestreninv@mail.ru](mailto:Pestreninv@mail.ru)  
Irina V. Pestrenina – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: [IPestrenina@gmail.com](mailto:IPestrenina@gmail.com)



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## ESTIMATION OF THE CYLINDRICAL COMPOSITE SHELL STIFFNESS AT THE INITIAL STAGE OF CURING DURING DEPLOYMENT BY INTERNAL PRESSURE

V.G. Gilev, S.V. Rusakov, V.M. Pestrenin, I.V. Pestrenin

Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

### ARTICLE INFO

Received: 20 December 2017

Accepted: 15 March 2018

Published: 30 March 2018

#### Keywords:

experimental-calculation method, effective modulus of elasticity, polymer curing, cylindrical shell, composite materials.

### ABSTRACT

An experimental-calculation method aimed at evaluating the stiffness properties of a cylindrical shell structure made of a composite material with a polymer matrix at the initial stage of its curing is considered. Evaluation of the stiffness composition parameters at this stage of polymerization due to the different physical state of the reinforcing elements and the binder by the methods of composite materials mechanics leads to poorly determined stiffness matrices that are not suitable for a reliable description of the mechanical behavior of the structure. The research relevance is related to the study of the manufacturing large-sized pneumatic structures technology based on compositions subjected to curing in space conditions. In the proposed method, the cylinder deployment pressure (the pressure at which the cylinder diameter assumes a nominal value) corresponding to the current binder polymerization degree is determined experimentally. The degree of polymerization is characterized by viscosity and the dynamic polymer module, measured with the viscosimeter. The structure specification as well as devices used in the experiments, instruments that fix the measured state parameters and the test procedure description are provided. The effective modulus of the cylinder's elasticity of the material has to be corresponding to its stiffness characteristics during the loading by internal pressure to the deployment pressure. It is determined by the method of successive approximations based on a geometrically nonlinear elastic model. The deployment time is much shorter, than the total binder curing time. By comparing the experimental and calculated data, the dependence of the effective elasticity modulus on the binder curing parameters is established. The almost linear dependence of the cylinder deployment pressure on the effective modulus of elasticity is revealed. It allows to extrapolate the results of the study to the values of binder parameters that are not backed up by the experience. These results allow us to evaluate the internal pressure necessary for the deployment of composite cylindrical shells with a partially cured binder, by solving the problems of solid mechanics.

© PNRPU

### Введение

Важная роль в освоении космического пространства отводится оболочечным пневматическим конструкциям из композиционных материалов на основе полимерных связующих. Прогнозируется использование таких конструкций в качестве рефлекторов космических телескопов и антенн [1–7], зеркальных и линзовых концентраторов солнечного излучения [8, 9], модулей жизнеобеспечения космических экипажей (лабораторий, оранжерей, хранилищ расходных материалов и т.п.) [10, 11]. Предлагаемые авторами технологии изготовления конструкций из композиционных материалов в космосе связаны главным образом с тем, что такие конструкции могут доставляться к месту эксплуатации в упакованном виде и развертываться там посредством нагружения внутренним давлением. Примеры решения подобных задач для оболочечных конструкций, имеющих развертку, приводятся в работах [12, 13]. В этих статьях упаковка и развертывание пневматических конструкций рассматриваются для случая полностью отвержденного связующего. Другой подход, развиваемый авторами публикаций [14–17], связан с возможностью процесса полимеризации связующего непосредственно в космосе за счет поглощения солнечной энергии. Изучению отверждения связующего и композитных конструкций аэрокосмического назначения в широком диапазоне температур посвящены работы [18–26]. Важной особенно-

стью процесса полимеризации связующего в условиях открытого космоса является испарение элементов реакционной смеси [27, 28]. Исследования показали, что контролирование этого явления можно осуществить путем предварительного частичного отверждения композита [16, 28]. В публикациях [29, 30] в лабораторных условиях изучалось влияние на процесс отверждения полимеров высокого вакуума, значительных перепадов температур, высокой энергии ионного излучения, возникновения дополнительных химических реакций и других сопутствующих явлений. Полученные авторами результаты указывают на возможность изготовления пневматических конструкций в условиях космоса с использованием технологии отверждения. В таком случае отверждению композитной конструкции предшествует ее упаковка в земных условиях и развертывание внутренним давлением в космосе. Технологии упаковки и развертывания предусматривают ограниченную полимеризацию связующего. Предварительная частичная полимеризация обеспечивает защиту от уноса компонентов реакционной смеси и придает конструкции необходимую при транспортировке и развертывании способность держать форму. Статические жесткостные характеристики композиционного материала на начальном этапе отверждения связующего вследствие различного физического состояния армирующих элементов и связующего отсутствуют. Жесткость композиции здесь определяется возрастающей с уровнем полимеризации вязкостью поли-

мера. Для оценки жесткостных свойств и описания механического поведения рассматриваемых композитных конструкций в настоящей работе предлагается введение материального параметра – эффективного модуля упругости  $E$ . Определение этого параметра на начальном этапе отверждения связующего и использование его для оценки давления развертывания цилиндрической оболочки осуществляется описанным в статье расчетно-экспериментальным методом.

## 1. Постановка задачи

Изучается развертывание внутренним давлением цилиндрической оболочки, изготовленной из препрега на основе композиции: эпоксидная смола  $L$  и отверди-

тель ЕРН-161, сертифицированного к применению в конструкционных материалах авиационного назначения. Цилиндрическая оболочка представляет собой углеродную преформу («чулок») саржевого плетения  $2 \times 2$  диаметром 20 мм. Внутренняя поверхность оболочки выстилается латексным техническим изделием, обеспечивающим герметизацию. Процесс полимеризации связующего в препреге происходит при постоянной температуре  $25\text{ }^\circ\text{C}$ . Принимаются во внимание силы тяжести, обусловленные массовой плотностью оболочки, атмосферное давление и давление внутри оболочки. Полагается, что оболочка развертывается посредством нагружения внутренним давлением из состояния, при котором силы тяжести, внешнее атмосферное давление и такое же внутреннее уравниваются (рис. 1, *a*).

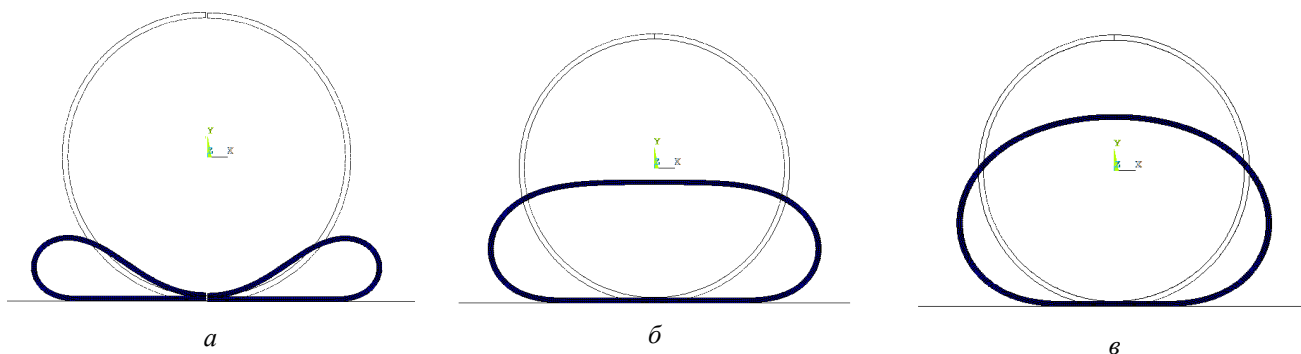


Рис. 1. Этапы развертывания оболочки: *a* – исходное состояние; *b*, *c* – промежуточные; серый контур – окончательное  
 Fig. 1. The stages of the shell deployment: *a* is the initial state; *b*, *c* are intermittent states; the grey line shows the final state

Критерием окончания развертывания служит достижение вертикальным диаметром оболочки своего номинального значения. Избыточное давление  $\Delta p$  (разность между внутренним и внешним давлением в оболочке), обеспечивающее выполнение критерия, далее называется давлением развертывания. Время нагружения оболочки до давления развертывания мало по сравнению с временем полного отверждения полимера. Задача состоит в изучении изменения жесткостных свойств связующего в процессе его отвер-

ждения и влияния этого отверждения на жесткостные свойства рассматриваемого элемента конструкции (цилиндра).

## 2. Экспериментальные исследования процесса развертывания цилиндра

Экспериментальная установка для исследования давления развертывания цилиндрической оболочки представлена на рис. 2.

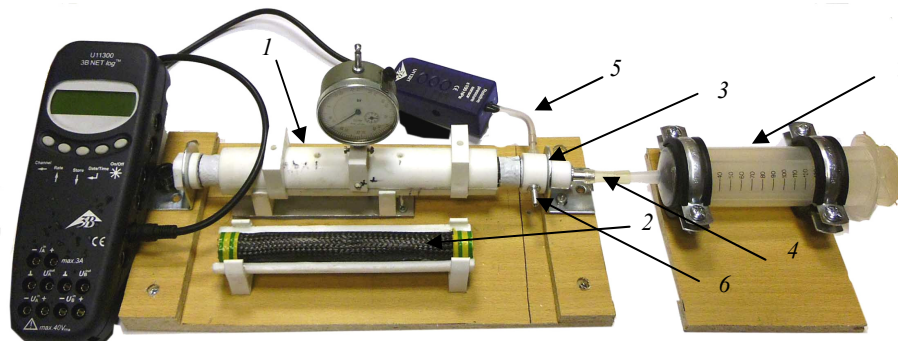


Рис. 2. Модуль развертывания (пояснения в тексте)  
 Fig. 2. Deployment module (explanations are in the text)

Испытательный комплекс выполнен в виде отдельных функциональных модулей. Основа комплекса – полый цилиндрический блок  $1$  из полипропилена, задающий размеры изделия. Блок разрезан по образую-

щей на две равные половины для удобства помещения в него испытываемого образца. Испытываемый образец  $2$  – углеродная преформа-рукав («чулок»). Для развертывания образца внутрь «чулка» помещается латексное

техническое изделие (на рис. 2 не показано), концы которого фиксируются с помощью специальных насадок 3, обеспечивающих герметизацию. Насадки снабжены штуцерами для подачи давления 4, измерения давления 5, а также выпуска воздуха 6. Давление задается дозирующим устройством (шприц) 7 объемом 100 мл, поршень которого поступательно перемещается с помощью модуля перемещения. Модуль перемещения (на рис. 2 не показан) представляет собой червячную передачу, вращение которой осуществляется моторчиком постоянного тока с редуктором. Скорость перемещения поршня может варьироваться от 0,02 до 1 мл/с. Давление измеряется цифровым датчиком относительного давления с ценой деления 0,01 Па. Для измерения изменения характеристик развертывания и контроля завершения процесса используется индикатор часового типа ИЧ-25, установленный в центральной части цилиндрического блока 1.

При изготовлении препрега смесь эпоксидной смолы и отвердителя в весовом отношении 1:4 тщательно смешивалась в течение 1–2 мин электромеханическим смесителем и дополнительно 1–2 мин в ультразвуковой ванне Digital Ultrasonic Cleaner CD 4820 на частоте 40 кГц. Последняя операция способствует также дегазации смеси. Поскольку реакция полимеризации начинается практически сразу после смешения компонентов клея, начало отчета времени полимеризации препрега отсчитывается от момента подготовки смеси.

Преформа-рукав пропитывалась эпоксидной смесью (объем, необходимый для однородной пропитки, определялся в предварительных опытах) и помещалась в цилиндрический блок. «Чулок» укладывался в нижнюю половину блока, обе половины блока фиксировались специальными зажимами, включались модуль перемещения, обеспечивающий развертывание цилиндра внутренним давлением, и датчик давления. Время развертывания цилиндра не превышало 80 с. Повторение эксперимента осуществлялось через 20–30 мин. Результаты измерений давления развертывания до размеров исходного диаметра цилиндра в зависимости от времени полимеризации показаны на рис. 3.

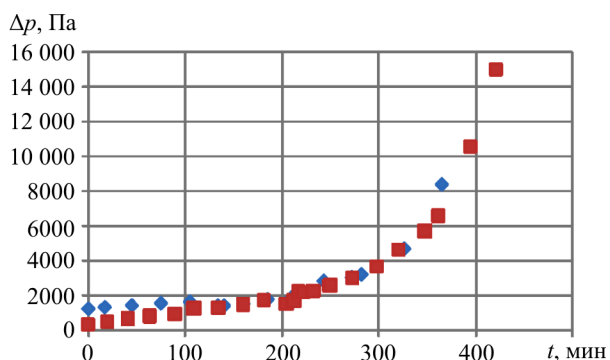


Рис. 3. Зависимость давления развертывания  $\Delta p$  от времени полимеризации  
 Fig. 3. Dependence of deployment pressure  $\Delta p$  on polymerization time

«Квадратами» и «ромбами» на рис. 3 отмечены результаты, соответствующие двум независимым циклам измерений. Из рис. 3 видно, что на промежутке времени приблизительно 200 мин давление развертывания меняется незначительно, но далее начинает резко возрастать.

Параллельно с опытом по определению давления развертывания проводится визкозиметрическое измерение вязкости и динамического модуля сдвига связующего на той же реакционной смеси. Измерения выполнены на ротационном реометре Physica MCR501 в режиме осцилляций с параметрами: угловая частота  $\omega = 6,28 \text{ с}^{-1}$ , касательные напряжения  $\tau = 10 \text{ Па}$ , среднее время измерений каждой точки – 40 с. Используемая геометрия – «конус-плита». Диаметр конуса  $d = 25 \text{ мм}$ , угол  $\alpha = 1^\circ$ . Температура измерений  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Результаты измерений приводятся на рис. 4.

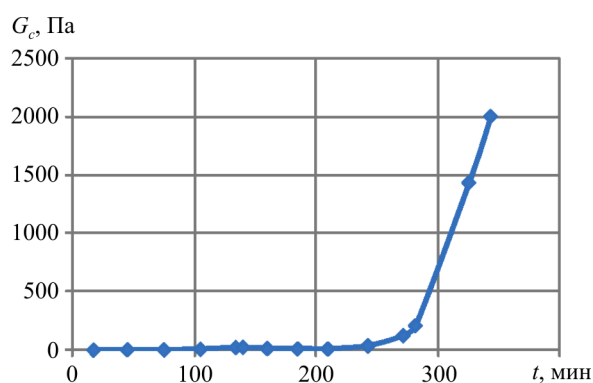


Рис. 4. Динамический модуль сдвига связующего  
 Fig. 4. Dynamic shear modulus of the binder

Итак, для решения поставленной задачи в момент окончания развертывания цилиндра экспериментально устанавливаются давление развертывания и параметры состояния связующего.

### 3. Численные исследования процесса развертывания цилиндра

На начальном участке отверждения связующего его жесткостные характеристики отличаются от соответствующих характеристик армирующих элементов на несколько порядков (7–8 порядков). Поэтому использование методов механики композиционных материалов для вычисления эффективных жесткостных характеристик материала цилиндра не представляется возможным, так как результирующие матрицы жесткости оказываются плохо обусловленными. По этой причине материал развертываемого цилиндра моделируется изотропной средой с фиксированным коэффициентом Пуассона и эффективным модулем упругости  $E$ . Эффективный модуль определяется расчетным путем на основании полученных в п. 2 опытных данных. С этой целью из зависимостей, представленных на рис. 3, 4 посредством исключения времени устанавливается зависимость между давлением развертывания и динамическим модулем упругости связующего  $E_c$  (рис. 5). Последний изменя-

ется незначительно за время разворачивания (вследствие краткосрочности этого процесса). Данное обстоятельство позволяет рассматривать задачу как квазистатическую. Следующим шагом устанавливается зависимость между модулем упругости связующего, отвечающим заданному давлению разворачивания, и эффективным модулем упругости материала цилиндра. Для этого численно методом последовательных приближений определяется эффективный модуль упругости  $E$ , соответствующий рассматриваемому давлению разворачивания.

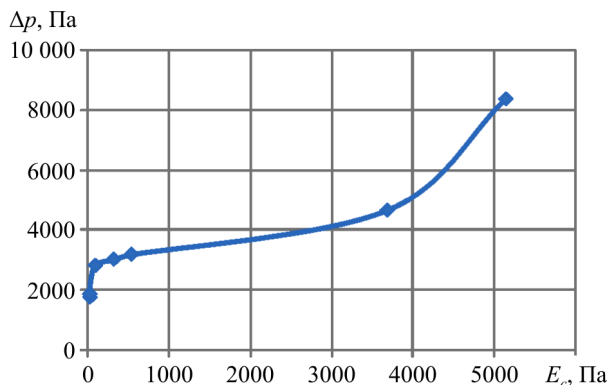


Рис. 5. Зависимость избыточного давления  $\Delta p$  (Па) от динамического модуля упругости связующего  $E_c$  (Па)

Fig. 5. The dependence of the excess pressure  $\Delta p$  (Pa) on the dynamic modulus of elasticity of the binder  $E_c$  (Pa)

Расчет на каждом шаге осуществляется на основе геометрически нелинейной теории упругости с использованием инженерного пакета ANSYS (КЭ solid185). Результат вычислений представлен на рис. 6.

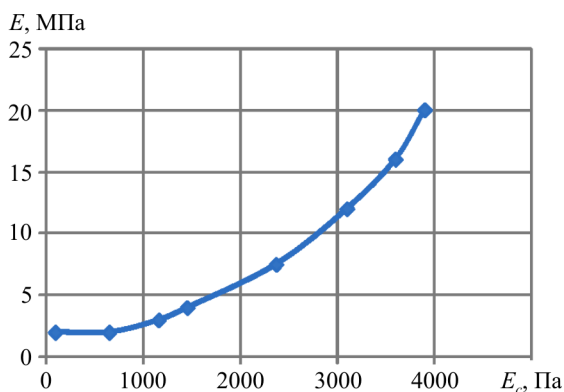


Рис. 6. Зависимость эффективного модуля упругости  $E$  (МПа) от модуля упругости связующего  $E_c$  (Па)

Fig. 6. Dependence of the effective modulus of elasticity  $E$  (MPa) on the modulus of elasticity of the binder  $E_c$  (Pa)

Исключая из зависимостей, представленных на рис. 5, 6, модуль упругости связующего, строим кривую, отражающую соответствие между давлением разворачивания и эффективным модулем упругости.

Зависимость, представленная на рис. 7, близка к линейной. Относительная среднеквадратическая ошибка ее

линейного приближения равна 3,7 %. Модуль упругости связующего, устанавливаемый вискозиметрическими

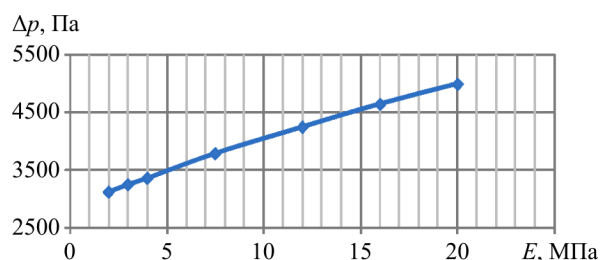


Рис. 7. Зависимость избыточного давления  $\Delta p$  (Па) от эффективного модуля упругости  $E$  (МПа)

Fig. 7. The dependence of the excess pressure  $\Delta p$  (Pa) on the effective modulus of elasticity  $E$  (MPa)

измерениями в процессе полимеризации связующего, характеризует степень его отверждения. Поэтому эффективный модуль  $E$  (в соответствии с зависимостью, представленной на рис. 6) характеризует жесткость оболочки также в зависимости от степени отверждения связующего. Откуда следует, что данный модуль может использоваться при моделировании механического поведения рассматриваемой конструкции из композиционного материала на основе полимерной матрицы на начальном этапе ее отверждения.

## Заключение

Предложенный расчетно-экспериментальный подход позволяет оценить жесткость композитной оболочки с полимерным связующим на начальном этапе его отверждения. Выявленная (в проведенном исследовании близкая к линейной) зависимость давления  $\Delta p$  от эффективного модуля упругости дает возможность экстраполировать результат исследования на значения параметров отверждаемого связующего, не подтвержденные опытом. Полученные результаты найдут применение для оценки возможности разворачивания из упакованного состояния цилиндрических оболочек из композиционных материалов с частично не отвержденным связующим.

## Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта №С-26/793 субсидии (гранта) Пермского края и гранта РФФИ №17-41-590649.

## Acknowledgments

The work has been carried out with the financial support of the Government of the Perm Krai within the framework of the scientific project No. С-26/793 of the grant (grant) of the Perm Krai and the RFBR grant No. 17-41-590649.



## Библиографический список

1. Кривошапко С.Н. Пневматические конструкции и сооружения // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2015. – № 3. – С. 45–53.
2. 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. – Vol. 136. – P. 129–143. DOI: 10.2495/MAR140111
3. Бельков А.В. Моделирование крупногабаритных пневматических конструкций // Перспективы развития фундаментальных наук: сб. науч. тр. XIII Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во Нац. исслед. Том. политехн. ун-та, 2016. – Т. 3. – С. 21–23.
4. Рефлекторы антенн космических аппаратов на базе гибкой формообразующей структуры / И.С. Морозков, С.В. Ромащенко, Е.А. Шевцов, А.К. Шатров // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2010. – Т. 1, № 6. – С. 100–101.
5. Зимин В. Н. Экспериментальное определение динамических характеристик крупногабаритных трансформируемых космических конструкций // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2011. – № 1. – С. 47–56.
6. Зимин В.Н., Колосков И. М., Мешковский В. Е. Динамические испытания раскрывающейся зеркальной космической антенны // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2000. – № 2. – С. 120–124.
7. Design evaluation of a large aperture deployable antenna / S.P. Chodimella, J.D. Moore, J. Otto, Fang. Houfei // In 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, Newport, Rhode Island, 1-4 May 2006. AIAA. – 2006. – P. 1603.
8. Леонов В.В., Жаренов И.С. Анализ особенностей конструкции крупногабаритных надувных концентраторов солнечного излучения // Наука и образование: науч. изд. МГТУ им. НЭ Баумана. – 2013. – № 10. – С. 177–192. DOI:10.7463/1013.0618788
9. Леонов В.В., Жаренов И.С. Особенности проектирования крупногабаритных космических зеркальных концентраторов солнечного излучения // Сб. тр. VI Рос. нац. конф. по теплообмену. – 2014. – С. 1233–1236.
10. Creation of biological module for self-regulating ecological system by the way of polymerization of composite materials in free space / A. Kondyurin, B. Lauke, I. Kondyurina, E. Orba // *Advances in Space Research*. – 2004. – No. 34. – P. 1585–1591.
11. Polymerisation of composite materials in space environment for development of a Moon base / I. Kondyurina, A. Kondyurin, B. Lauke, L. Figiel, R. Vogel, U. Reuter // *Advances in Space Research*. – 2006. – Vol. 37. – 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. – No. 5. – P. 629–636.
13. Упаковка и развертывание внутренним давлением крупногабаритных оболочечных конструкций / В.М. Пестренин, И.В. Пестренина, С.В. Русаков, А.В. Кондюрин, А.В. Корепанова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 4. – С. 273–286. DOI 10.15593/per.mech/2016.4.18
14. Мальцев М.С., Свистков А.Л., Евлампиева С.Е. Исследование возможности использования горячего отверждения для изготовления надувной конструкции на околоземной орбите // XX Зимняя школа по механике сплошных сред: тез. докл. – Пермь, 2017. – С. 209.
15. Кондюрин А.В., Нечитайло Г.С. Композиционный материал для надувных конструкций, фотоотверждающийся в условиях орбитального космического полета // Космонавтика и ракетостроение. – 2009. – № 3 (56). – С. 182–190.
16. Кондюрин А.В., Комар Л.А., Свистков А.Л. Моделирование отверждения композиционного материала в условиях открытого космоса // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2009. – Т. 15, № 4. – С. 512–526.
17. Власов А.Ю., Пасечник К.А., Мартынов В.А. Разработка технологии частичного отверждения тонкостенных оболочек при создании конструкций из полимерных композиционных материалов // Вестн. Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. – 2015. – Т. 16. – № 4. – С. 918–923.
18. Чернин И.З., Смахов Ф.М., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции. – М.: Химия, 1982. – 232 с.
19. Mitzel E., Koenig J. Epoxy resins and composites. – Berlin, 1986. – Vol. 2. – 73 p.
20. Dmitriev O.S., Zhyvenkova A.A., Dmitriev A.O. Thermochemical analysis of the cure process of thick polymer composite structures for industrial applications // *Advanced Materials and Technologies*. – 2016. – No. 2. – С. 53–60.
21. Кинетика отверждения эпоксидных связующих и микроструктура полимерных матриц в углепластиках на их основе / В.Б. Литвинов [и др.] // *Материаловедение*. – 2011. – № 7. – С. 15–20.
22. Тараненко Е.В., Кандырин Л.Б. Реологические свойства и реокинетика отверждения модифицированных термореактивных олигомеров // Вестн. Моск. гос. ун-та тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова. – 2008. – Т. 3, № 1. – С. 79–85.
23. Исследование начальных стадий отверждения ДИФА вискозиметрическим методом. / С.Г. Куличихин, А.С. Реутов, М.С. Сурова, Е.В. Осипова, А.Я. Малкин // *Пластмассы*. – 1988. – № 5. – С. 43–44.
24. Тарасов В.А., Беляков Е.В. Математическое моделирование процесса неизоотермического отверждения полимерных композиционных конструкций // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2011. – № 1. – С. 113–120.
25. Антюфеева Н.В., Алексахин В.М., Столянков Ю.В. Определение степени отверждения ПКМ методами термического анализа // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 3 (36). – С. 79–83.
26. Исследование возможности использования углепластиков в условиях арктического климата / Антюфеева Н.В., Алексахин В.М., Павлов М.Р., Столянков Ю.В. // *Авиационные материалы и технологии*. – 2016. – № 4 (45). – С. 86–94.
27. Испарение молекул отвердителя в реакции полимеризации эпоксидной смолы / М.С. Мальцев, А.Л. Свистков, В.Н. Терпугов, Л.А. Комар // Математика и междисциплинарные исследования: сб. докл. всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых с междунар. участием/гл. ред. Ю.А. Шарапов / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2016. – С. 88–91.
28. Русаков С.В. Влияние уноса вещества на процесс отверждения эпоксидной смолы в условиях открытого космоса // *Материалы X Междунар. конф. по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2014)*. – Алушта; М.: Изд-во МАИ, 2014. – С. 567–569.
29. Kondyurin A. Direct Curing of Polymer Construction Material in Simulated Earth's Moon Surface Environment // *Journal of spacecraft and rockets*. – 2011. – Vol. 48 (2). – P. 378–384.
30. Kondyurin A., Lauke B., Vogel R. Photopolymerisation of composite material in simulated free space environment at low Earth orbital flight // *European polymer journal*. – 2006. – Vol. 42 (10). – P. 2703–2714. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2006.04.018
31. Гилев В.Г., Русаков С.В. Экспериментальное исследование давления развертывания цилиндрической оболочки композитного материала в процессе полимеризации // Механика композитных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред: сб. тр. всерос. науч.-конф. – Москва 21–23 ноября 2017 г. / ИПРИМ РАН. – М., 2017. – С. 63–66.

## References

1. Krivoshapko S.N. Pnevmaticheskie konstruksii i sooruzheniia [Pneumatic structures and structures]. *Stroitel'naiia mekhanika inzhenernykh konstruksii i sooruzhenii*, 2015, no. 3, pp. 45-53.
2. 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, vol. 136, pp. 129–143. DOI:10.2495/MAR140111

3. Bel'kov A.V. Modelirovanie krupnogabaritnykh pnevmaticheskikh konstruktssii [Modeling of large-size pneumatic structures]. *Perspektivy razvitiia fundamental'nykh nauk*, 2016, vol. 3, pp. 21-23.
4. Morozkov I.S., Romashchenko S.V., Shevtsov E.A., Shatrov A.K. Reflektory antenn kosmicheskikh apparatov na baze gibkoi formoobrazuiushchei struktury [Reflectors of aeriels of space vehicles on the basis of flexible form-building structure]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki*, 2010, vol. 1, no. 6, pp. 100-101.
5. Zimin V.N. Eksperimental'noe opredelenie dinamicheskikh kharakteristik krupnogabaritnykh transformiruemykh kosmicheskikh konstruktssii [Experimental determination of the dynamic characteristics of large-sized transformable space structures]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. "Mashinostroenie"*, 2011, no. 1, pp. 47-56.
6. Zimin V.N., Koloskov I.M., Meshkovskii V.E. Dinamicheskie ispytaniia raskryvaiushcheisia zerkal'noi kosmicheskoi anteny [Dynamic tests of the unfolding mirror aerial]. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin*, 2000, no. 2, pp. 120-124.
7. Chodimella S.P., Moore J.D., Otto J., Houfei Fang. Design evaluation of a large aperture deployable antenna. In *47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit*, Newport, Rhode Island, 2006, pp. 1603.
8. Leonov V.V., Zharenov I.S. Analiz osobennosti konstruktssii krupnogabaritnykh naduvnykh konsentratrov solnechnogo izlucheniia [Analysis of the design features of large-size inflatable solar concentrators]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana*, 2013, no. 10, pp. 177-192. DOI:10.7463/1013.0618788
9. Leonov V.V., Zharenov I.S. Osobennosti proektirovaniia krupnogabaritnykh kosmicheskikh zerkal'nykh konsentratrov solnechnogo izlucheniia [Features of the design of large-size space mirror solar concentrators]. *Sbornik trudov shestoi Rossiiskoi natsional'noi konferentsii po teploobmenu*, 2014, pp. 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*, 2004, no. 34, pp. 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*, 2006, vol. 37, pp.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, vol. 51, no. 5, pp. 629-636.
13. Pestrenin V.M., Pestrenina I.V., Rusakov S.V., Kondyurin A.V., Korepanova A.V. Packaging and deployment of large shell structures by internal pressure loading. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2016, no. 4, pp. 273-286. DOI 10.15593/perm.mech/2016.4.18
14. Mal'tsev M.S., Svistkov A.L., Evlampieva S.E. Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniia goriachego otverzheniia dlia izgotovleniia naduvnoi konstruktssii na okolozemnoi orbite [Study of the possibility of using hot curing for the production of an inflatable structure in near-earth orbit]. *XKh Zimniaia shkola po mekhanike splotnykh sred. Tezisy dokladov*, 2017, pp. 209.
15. Kondyurin A.V., Nechitaïlo G.S. Kompozitsionnyi material dlia naduvnykh konstruktssii, fotootverzhdaishchiisia v usloviakh orbital'nogo kosmicheskogo poleta [Composite material for inflatable structures, photocurable in conditions of orbital space flight]. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2009, no. 3 (56), pp. 182-190.
16. Kondyurin A.V., Komar L.A., Svistkov A.L. Modelirovanie otverzheniia kompozitsionnogo materiala v usloviakh otkrytogo kosmosa [Simulation of curing of composite material in open space conditions]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktssii*, 2009, vol. 15, no. 4, pp. 512-526.
17. Vlasov A.Iu., Pasechnik K.A., Martynov V.A. Razrabotka tekhnologii chastichnogo otverzheniia tonkostennykh obolochek pri sozdaniï konstruktssii iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Development of technology for partial curing of thin-walled casings when creating structures from polymer composite materials]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva*, 2015, vol. 16, no. 4, pp. 918-923.
18. Chernin I.Z., Smekhov F.M., Zherdev Iu.V. Epoksidnye polimery i kompozitsii [Epoxy polymers and compositions], *Moscow, Khimiia*, 1982, 232 p.
19. Mitzel E., Koenig J. Epoxy resins and composites. *Berlin*, 1986, vol. 2, 73 p.
20. Dmitriev O.S., Zhyvenkova A.A., Dmitriev A.O. Thermochemical analysis of the cure process of thick polymer composite structures for industrial applications. *Advanced materials and technologies*, 2016, no. 2, pp. 53-60.
21. Litvinov V.B. Kinetika otverzheniia epoksidnykh sviazuiushchikh i mikrostruktura polimernykh matrits v ugleplastikakh na ikh osnove [Kinetics of curing epoxy binders and microstructure of polymer matrices in carbon plastics based on them]. *Materialovedenie*, 2011, no. 7, pp. 15-20.
22. Taranenko E.V, Kandyrin L.B. Reologicheskie svoïstva i reokinetika otverzheniia modifitsirovannykh termoreaktivnykh oligomerov [Rheological properties and rheokinetics of curing of modified thermoset oligomers]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta tonkikh khimicheskikh tekhnologii imeni M.V. Lomonosova*, 2008, vol. 3, no. 1, pp. 79-85.
23. Kulichikhin S.G., Reutov A.S., Surova M.S., Osipova E.V., Malkin A.Ia. Issledovanie nachal'nykh stadii otverzheniia DIFA viskozimetriceskim metodom [Investigation of the initial stages of curing DIFA viscosimetrically]. *Plastmassy*, 1988, no. 5, pp. 43-44.
24. Tarasov V.A., Beliaikov E.V. Matematicheskoe modelirovanie protsessa neizotermicheskogo otverzheniia polimernykh kompozitnykh konstruktssii [Mathematical modeling of the process of non-isothermal curing of polymer composite structures]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriia: Mashinostroenie*, 2011, no. 1, pp. 113-120.
25. Antiufeeva N.V., Aleksashin V.M., Stoliankov Iu.V. Opredelenie stepeni otverzheniia PKM metodami termicheskogo analiza [Determination of the degree of hardening of PCM by thermal analysis methods]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 3 (36), pp. 79-83.
26. Antiufeeva N.V., Aleksashin V.M., Pavlov M.R., Stoliankov Iu.V. Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniia ugleplastikov v usloviakh arkticheskogo klimata [Study of the possibility of using carbon plastics in the Arctic climate]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2016, no. 4 (45), pp. 86-94.
27. Mal'tsev M.S., Svistkov A.L., Terpugov V.N., Komar L.A. Isparenie molekul otverditelia v reaktsii polimerizatsii epoksidnoi smoly [Evaporation of hardener molecules in the polymerization of epoxy resin]. *Matematika i mezhdistsiplinarnye issledovaniia. Sb. dokladov vsrossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem*, 2016, pp. 88-91.
28. Rusakov S.V. Vliianie unosa veshchestva na protsess otverzheniia epoksidnoi smoly v usloviakh otkrytogo kosmosa [The effect of substance entrainment on the curing process of epoxy resin in open space conditions]. *Moscow, Izdatel'stvo Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2014, pp. 567-569.
29. Kondyurin A. Direct Curing of Polymer Construction Material in Simulated Earth's Moon Surface Environment. *Journal of spacecraft and rockets*, 2011, vol. 48(2), pp. 378-384.
30. Kondyurin, A Lauke, B Vogel, R Photopolymerisation of composite material in simulated free space environment at low Earth orbital flight. *European polymer journal*, 2006, vol. 42(10), pp. 2703-2714. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2006.04.018
31. Gilev V.G., Rusakov S.V. Eksperimental'noe issledovanie davleniia razvertyvaniia tsilindricheskoi obolochki kompozitnogo materiala v protsesse polimerizatsii [Experimental investigation of the deployment pressure of a cylindrical shell of a composite material during the polymerization]. *Moscow, Institut prikladnoi mekhaniki, Sbornik trudov Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii «Mekhanika kompozitnykh materialov i konstruktssii, slozhnykh i geterogennykh sred»*, 2017, pp.63-66.