

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА ПРОПИТЫВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РЕФЛЕКТОРОВ ЗЕРКАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АНТЕНН ИЗ УГЛЕПЛАСТИКОВ

Пье Пху Маунг  
Г.В. Малышева

pyaephyo@mail.ru  
malyin@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Проведены расчеты коэффициента проницаемости, значений объема и пористости элементарной ячейки тканого наполнителя. Рассмотрены два типа структур углеродной ткани: стандартная, у которой комплексная нить имеет форму цилиндра, и плоская, нить которой имеет прямоугольную форму. Объект исследований — рефлектор зеркальной космической антенны, отличительной особенностью которого является наличие поверхностей двойной кривизны. Моделирование кинетики процесса пропитывания рефлектора для тканых структур двух типов проведено с использованием программного обеспечения RAM-RTM. Исследовано влияние сетевого угла на продолжительность процесса пропитывания. По разработанным режимам изготовлены образцы рефлекторов и выполнена оценка их качества. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов

### Ключевые слова

*Вакуумная инфузия, время пропитывания, сетевой угол, рефлектор, моделирование, технология*

Поступила в редакцию 05.02.2016  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

---

Углепластики находят все большее распространение благодаря комплексу уникальных деформационно-прочностных и теплофизических свойств [1–4]. В условиях массового производства изделия из углепластиков, как правило, получают с использованием препреговых технологий [5], а в условиях единичного производства — технологии вакуумной инфузии [6, 7].

Рефлектор зеркальной космической антенны изготавливается в условиях единичного производства, и поэтому самым экономически эффективным методом служит технология вакуумной инфузии, которая состоит из следующих основных операций: раскрой ткани, подготовка оснастки, выкладка ткани на оснастку с учетом заданной схемы армирования, производство вакуумного мешка, связующего, пропитывание, удаление вакуумного мешка.

При разработке технологических режимов изготовления изделий методом вакуумной инфузии требуется определить место установки канала для подачи связующего. Если изделие имеет симметричную форму типа рефлектора, то связующее подают в его центр. Если изделие несимметричной формы, то подача может быть выполнена с любой стороны изделия. Скорость процесса пропитывания и содержание связующего в конечном изделии зависят от его реологиче-

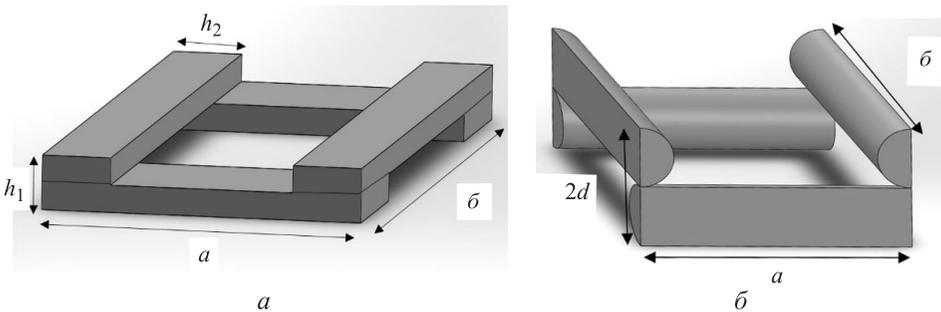
ских свойств и структуры ткани, которые и определяют характеристики проницаемости.

Проницаемость тканых наполнителей зависит от многих факторов: строения текстильных материалов, типа плетения и геометрических характеристик нитей.

Цель настоящей работы — определить структуру наполнителя, при которой обеспечивается максимальная скорость процесса пропитывания.

В качестве объектов исследования в работе использована углеродная ткань (до и после плочения, что позволило изменить диаметр монофиламента комплексной нити) и эпоксидное связующее горячего отверждения.

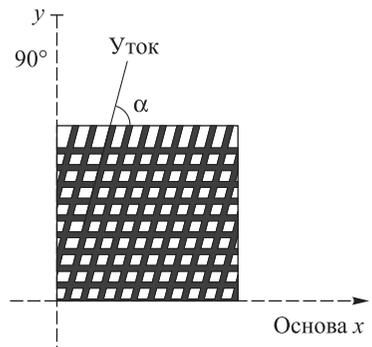
**Теоретическое обоснование.** Структура тканого наполнителя рассматривалась в соответствии с теорией П.Л. Чебышева, согласно которой два семейства линий, пересекающихся на поверхности, образуют сеть. Каждая ячейка такой сетки представляет собой четырехугольник (рис. 1, а). В настоящей работе рассмотрены два типа плоченых тканей марок «Аспро» А60 и А80, а также одна обычная углеродная ткань марки *Hexcel*. Сечение волокон плоченых тканей квадратное, сечение стандартных тканей — круглое (рис. 1, б).



**Рис. 1.** Модель элементарной ячейки структуры текстильной ткани:  
 а — плоченая ткань; б — обычная ткань

Если поверхность оснастки, на которую выкладывают ткань, имеет криволинейную форму, то изменяются сетевые углы внутри каждой ячейки. Сетевым углом любой текстильной ткани (рис. 2) представляет собой угол между нитями основы и утка. Максимальное значение сетевого угла составляет  $\alpha = 90^\circ$ , минимальное — зависит от деформационных характеристик нитей ткани. Как правило, изменение сетевого угла происходит в диапазоне  $30^\circ \dots 90^\circ$ .

Пористость ткани  $\Pi$  зависит от объема  $V$  элементарной ячейки и объема  $V_f$  волокна в элементарной ячейке:



**Рис. 2.** Схема изменения сетевого угла при выкладке ткани на поверхность двойной кривизны

$$\Pi = 1 - \frac{V_f}{V}. \quad (1)$$

В недеформированном состоянии исходный, т. е. начальный объем элементарной ячейки для площади ткани равен

$$V_{\text{нач}} = abh_1, \quad (2)$$

где  $a, b, h_1$  — геометрические характеристики элементарной ячейки ткани.

При выкладке тканей на криволинейную поверхность ее плотность в разных точках вследствие изменения сетевого угла также будет различна. Объем элементарной ячейки в деформированном состоянии

$$V_{\text{деф}} = abh_1 \sin \alpha. \quad (3)$$

Теоретическая минимальная остаточная пористость  $\Pi_{\text{мин}}$  составляет 0,09.

Объем волокна в элементарной ячейке при деформировании не изменяется:

$$V_{f \text{ деф}} = V_{f \text{ нач}} = \frac{h_2 h_1}{2} (a + b) (1 - \Pi_{\text{мин}}). \quad (4)$$

В соответствии с уравнением (1) начальную пористость  $\Pi_{\text{нач}}$  ткани до ее выкладки на криволинейную поверхность (в недеформированном состоянии) и пористость  $\Pi_{\text{деф}}$  после выкладки (в деформированном состоянии) можно представить так:

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{нач}} &= \frac{V_{f \text{ нач}}}{V_{\text{нач}}}; \\ \Pi_{\text{деф}} &= \frac{V_{f \text{ деф}}}{V_{\text{деф}}}; \\ \frac{\Pi_{\text{деф}}}{\Pi_{\text{нач}}} &= \frac{ab - \frac{h_2}{2}(a+b)(1-\Pi_{\text{мин}})}{ab - h_2/2(a+b)(1-\Pi_{\text{мин}})}. \end{aligned} \quad (5)$$

Проницаемость структуры ткани характеризуется наличием свободного объема между нитями основы и утка (именно этот объем в процессе пропитывания будет занимать связующее). Коэффициент проницаемости меняется при изменении сетевого угла в процессе выкладки ткани на криволинейную поверхность. В настоящей работе рассмотрены ткани, имеющие симметричную структуру по основе и утку, поэтому коэффициенты проницаемости  $K_1$  (по основе) и  $K_2$  (по утку) равны (рис. 3).

Методика определения коэффициентов проницаемости представлена в работах [8–10]:

$$K_{\text{деф}} = \left[ \frac{ab - \frac{h_2}{2}(a+b)(1-\Pi_{\min})}{\sin \alpha} \right]^3 \times \sin^2 \alpha K_{\text{нач}}; \quad (6)$$

$$K_{1,2} = K_{\text{деф}} \sqrt{\frac{1 + \cos \alpha}{1 - \cos \alpha}}, \quad (7)$$

где  $K_{1,2}$  — значения коэффициента проницаемости;  $K_{\text{деф}}$  и  $K_{\text{нач}}$  — коэффициенты проницаемости ткани в исходном, т. е. недеформированном состоянии и после.



Рис. 3. Внешний вид ткани с равными значениями коэффициентов проницаемости  $K_1 = K_2$

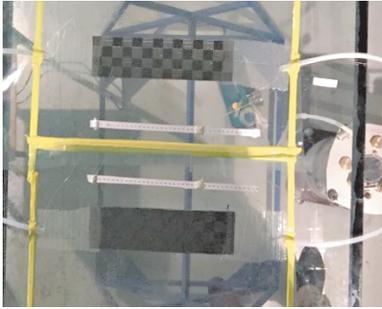


Рис. 4. Образцы для экспериментального определения  $K_{\text{нач}}$

**Экспериментальная часть.** Для получения значений  $K_{\text{нач}}$  использовали методику, подробно рассмотренную в [9–11]. Образцы исследуемой ткани размером  $600 \times 60$  мм (рис. 4) выкладывали на поверхность оснастки и далее пропитывали методом вакуумной инфузии, но вместо связующего использовали машинное масло с вязкостью  $0,12 \text{ Па} \cdot \text{с}$  и определяли время пропитывания. Значения коэффициента проницаемости недеформированной ткани определяли по закону Дарси:

$$K_{\text{нач}} = \frac{\Pi \mu x^2}{2 \Delta p \tau}, \quad (8)$$

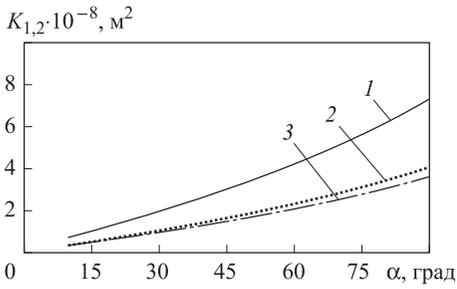
где  $\Pi$  — пористость ткани;  $\mu$  — вязкость связующего;  $x$  — длина образца;  $\Delta p$  — перепад давления;  $\tau$  — время пропитывания.

Полученные результаты приведены в таблице. Для рассматриваемой элементарной ячейки значения  $a = b$  и  $h_1 = 0,3a$ , и поэтому значения коэффициентов проницаемости в направлении основы и утка равны (см. таблицу).

**Значения коэффициентов проницаемости и пористости**

Тип ткани	Коэффициент	
	проницаемости $K_{\text{нач}}$ , м <sup>2</sup>	пористости $\Pi$
Углеткань марки <i>Hexcel</i>	0,57	$7,5 \cdot 10^{-8}$
«Аспро» А60	0,47	$4,25 \cdot 10^{-8}$
«Аспро» А80	0,45	$3,5 \cdot 10^{-8}$

Используя полученные результаты, по уравнению (6) определяем зависимость коэффициента проницаемости от сетевого угла. Из полученных экспериментальных данных следует, что значения коэффициента проницаемости пло-

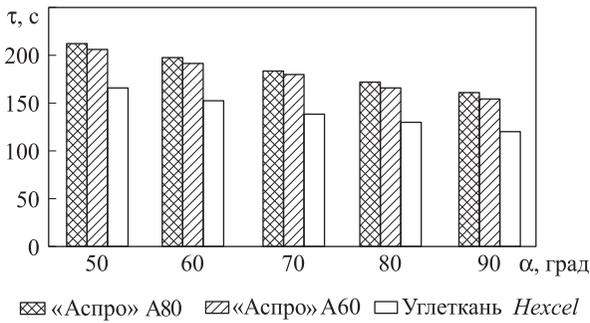


**Рис. 5.** Зависимости коэффициента проницаемости  $K_{1,2}$  от сетевого угла  $\alpha$  при выкладке ткани на криволинейную поверхность:

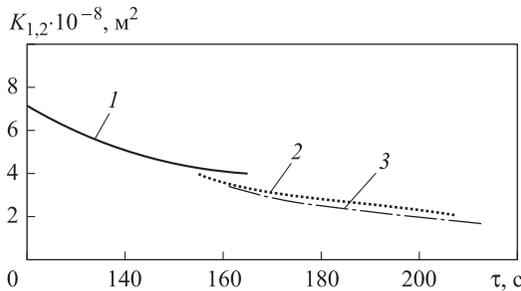
1 — углеродная ткань марки *Hexcel*;  
2 — «Аспро» А60; 3 — «Аспро» А80

щенной ткани (рис. 5) существенно меньше, чем значения коэффициента проницаемости ткани с круглым сечением волокон.

Полученные значения коэффициентов проницаемости были использованы в расчетах при моделировании кинетики процесса пропитывания с использованием программы RAM-RTM. Для моделирования поверхность рефлектора была разбита на 6829 треугольных конечных элементов. При расчетах были заданы следующие исходные данные: вязкость связующего 0,3 Па · с; рабочее давление 1 атм. Полученные результаты моделирования приведены на рис. 6–8.

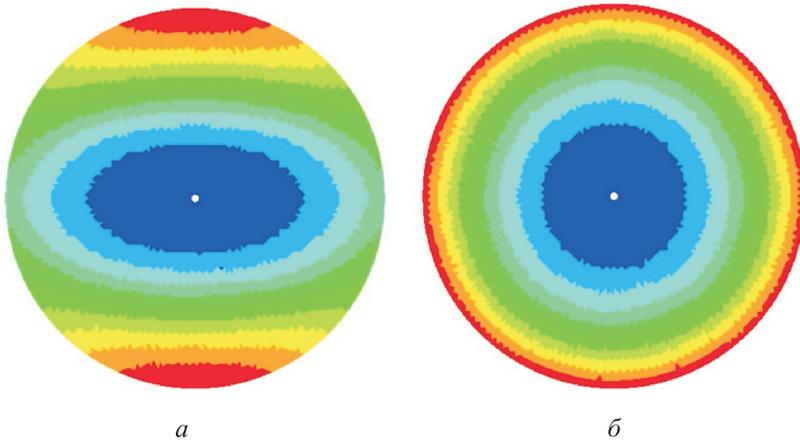


**Рис. 6.** Зависимости времени пропитывания  $\tau$  от сетевого угла  $\alpha$  для углеродных тканей



**Рис. 7.** Зависимости времени пропитывания  $\tau$  от коэффициента проницаемости  $K_{1,2}$  (1–3 — см. рис. 5)

Полученные значения сетевых углов и времени процесса пропитывания были использованы для разработки технологических режимов пропитывания. Для рассматриваемого изделия (рефлектора) при вязкости связующего 0,3 Па · с и его радиальной подаче (из центра, см. рис. 5) время пропитывания обычной

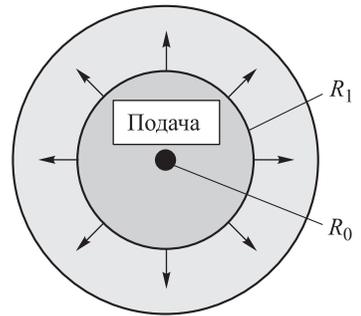


**Рис. 8.** Моделирование процесса пропитывания для ткани «Аспро» А60 в зависимости от кривизны поверхности:

*a* — поверхность двойной кривизны; *б* — плоский образец

ткани (см. рис. 1, *б*) составляет 180 с, площадью ткани (см. рис. 1, *а*) — 227 с; значения сетевого угла при выкладке обычной ткани (см. рис. 1, *б*) на поверхность оснастки изменяются от 90° в центре до 77° по краям; значения сетевого угла при выкладке площадью ткани (см. рис. 1, *а*) изменяются от 90° в центре до 68° по краям.

Для изготовления рефлектора, который имеет поверхность двойной кривизны, было использовано радиальное пропитывание ткани (рис. 9). Диаметр исследуемых образцов тканей составил 550 мм; каждый образец состоял из четырех слоев ткани с углами выкладки 0/±45°/90°; вязкость используемого эпоксидного связующего составляла 0,3 Па · с;



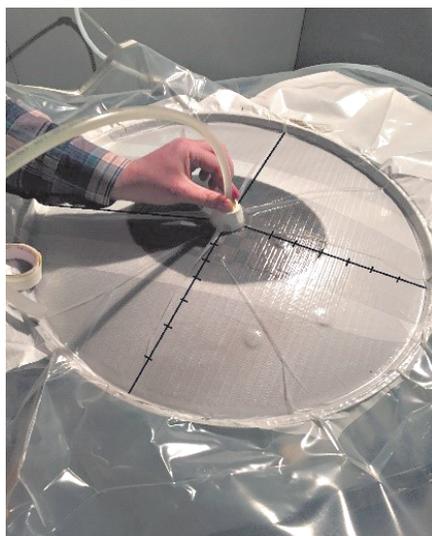
**Рис. 9.** Радиальное пропитывание

$$R^2(\tau) = \frac{2\Delta p\tau}{\Pi\mu \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)} k; \tag{9}$$

$$K_e = \frac{\Pi\mu R_{01}^2}{4\Delta p\tau} \left( \left(\frac{R_1}{R_0}\right)^2 \left( 2\ln\left(\frac{R_1}{R_0}\right) - 1 \right) + 1 \right); \tag{10}$$

$$K_e = \sqrt{K_1 K_2},$$

где  $\tau$  — время пропитывания;  $R$  — радиус потока;  $R_0$  — радиус места подачи связующего;  $K_e$  — эквивалентная проницаемость. Рассчитанное время пропитывания при изготовлении рефлектора из обычной ткани составляло 187 с, а для плоских тканей (рис. 10) — 235 с; погрешность расчета составляла не более 4 %.



**Рис. 10.** Процесс пропитывания рефлектора с поверхностью двойной кривизны

**Выводы.** В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований установлено, что при выкладке тканей на криволинейную поверхность происходит деформация сетевого угла. Для обычных и плетеных тканей это значение изменяется от  $90^\circ$  до  $68^\circ$ . При уменьшении сетевого угла коэффициент пропускной способности также уменьшается, что приводит к увеличению времени пропитывания. Сравнение тканей двух типов (плетеных и неплетеных) показало, что стандартные (неплетеные ткани, имеющие круглое сечение нитей) пропитываются быстрее, чем плетеные (с прямоугольным сечением волокна). Определено время пропитывания, которое составило 180 с для обычной ткани и 227 с для плетеных. Погрешность определения времени процесса пропитывания между теоретическими и экспериментальными значениями не превышала 4 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Резник С.В. Актуальные проблемы проектирования, производства и испытания ракетно-космических конструкций // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 3(15). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-3-638  
URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/638.html>
2. Исследование наномодифицированных полимерных композиционных материалов методом спектроскопии комбинационного рассеяния / Ю.М. Миронов, Ю.В. Храповицкая, М.О. Макеев, В.А. Нелюб, А.С. Бородулин // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 12.  
URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/282012.html>
3. Беляков Е.В., Тарасов В.А., Боярская Р.В. Выбор режимов формования композитных конструкций ракетно-космической техники // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 5. С. 37–43.

4. Исследование качества поверхностей углеродных волокон / Ю.М. Миронов, В.А. Нелюб, А.С. Бородулин, И.В. Чуднов, И.А. Буянов, И.А. Александров, А.Н. Муранов // Инженерный вестник. Электронный научно-технический журнал (МГТУ им. Н.Э. Баумана). 2012. № 11. URL: <http://engsi.ru/doc/506275.html>
5. Исследование поверхностей разрушения углепластиков, изготовленных по расплавной и растворной технологиям / И.А. Александров, Г.В. Малышева, В.А. Нелюб, И.А. Буянов, И.В. Чуднов, А.С. Бородулин // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 3. С. 7–12.
6. Бородулин А.С., Малышева Г.В., Романова И.К. Оптимизация реологических свойств связующих, используемых при формовании изделий из стеклопластиков методом вакуумной инфузии // Клеи. Герметики. Технологии. 2015. № 3. С. 40–44.
7. Малышева Г.В., Романова И.К. Оптимизация выбора параметров, характеризующих состояние объекта, при решении задач надежности // Ремонт, восстановление, модернизация. 2015. № 6. С. 33–38.
8. Carter E.J., Fell A.W., Summerscales J. A simplified model to calculate the permeability tensor of an anisotropic fibre bed // Composite manufacturing. 1995. No. 6. P. 228-33.
9. Van der Weeen F. Algorithms for draping fabrics on doubly curved surfaces // Int. J. Numer Methods Engng. 1991. No. 31. P. 1415-26.
10. Chan A.W., Hwang S.T. Anisotropic in plane permeability of fabric media // Polymer engineering science. 1991. No. 31 (6). P. 1233-9.
11. Endruweit A., Ermanni P. The in plane permeability of sheared textiles. Experimental observations and a predictive conversion model // Composites Part A: applied science and manufacturing. 2013. 264 p.

**Пье Пху Маунг** — аспирант кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

**Малышева Галина Владленовна** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Пье Пху Маунг, Малышева Г.В. Моделирование кинетики процесса пропитывания при производстве рефлекторов зеркальных космических антенн из углепластиков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 5. С. 38–47.

DOI: 10.18698/0236-3941-2016-5-38-47

**MODELING OF THE KINETICS OF IMPREGNATION PROCESS  
IN THE PRODUCTION OF REINFORCED CARBON-FIBER REFLECTORS  
FOR SPACE ANTENNAS**

**Pyi Phyو Maung  
G.V. Malysheva**

**pyaephyo@mail.ru  
malyin@mail.ru**

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

**Abstract**

Our work provides the calculations for the permeability coefficient, values of the volume and porosity of a unit cell of a woven fabric before and after deformation based on the geometrical parameters. We investigated two types of carbon woven fabric structures: standard and spread tow. Standard type has a cross sectional shape of a cylinder. Spread tow type has a rectangular cross sectional shape. The object of the research is the space antenna reflector; its distinctive feature is the presence of the surface of double curvature. We used RAM-RTM software to model the kinetics of the process of impregnation of the reflector for the two types of carbon fabric unit cell structures. This work also investigated the influence of the grid angle between warp and welt of the unit cell on the duration of impregnation process. The results showed that decreasing the angle between warp and welt of the unit cell lead to the decrease in the permeability values. Based on the results of calculations we produced the samples of the reflectors and assessed their quality. This paper compares the theoretical and experimental results. The comparison of the two textile structures (standard and spread tow) showed that the standard textiles with circular cross section were impregnated faster than spread tows, which have a rectangular cross section

**Keywords**

*Vacuum infusion, impregnation time, grid angle, reflector, modeling*

**REFERENCES**

- [1] Reznik S.V. Topical problems of rocket-space composite structures designing, production and testing. *Jelekt. nauchno-tekh. izd. "Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovacii"* [El. Sc.-Tech. Publ. "Eng. J.: Science and Innovation"], 2013, iss. 3(15). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-3-638 Available at: <http://engjournal.ru/eng/catalog/machin/rocket/638.html>
- [2] Mironov Yu.M., Khrapovitskaya Yu.V., Makeev M.O., Nelyub V.A., Borodulin A.S. Raman spectroscopy of nanomodified polymer composite materials exposed to mechanical load. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science & Education of the Bauman MSTU. Electronic Journal], 2011, no. 12. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/en/doc/282012.html>
- [3] Belyakov E.V., Tarasov V.A., Boyarskaya R.V. Selection of formation modes for composite structures of rocket and space technology. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Mashinost.* [Proc. of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2012, no. 5, pp. 37–43 (in Russ.).
- [4] Mironov Yu.M., Nelyub V.A., Borodulin A.S., Chudnov I.V., Buyanov I.A., Aleksandrov I.A., Muranov A.N. Study of the carbon fiber surface quality. *Inzhenernyy vestnik. Jelekt. nauchno-tekh. zhurn.* [Engineering Bulletin. El. Publ. (MGTU im. N.E. Baumana)], 2012, no. 11. Available at: <http://engsi.ru/doc/506275.html>
- [5] Aleksandrov I.A., Malysheva G.V., Nelyub V.A., Buyanov I.A., Chudnov I.V., Borodulin A.S. Fracture surface studies of carbon-filled plastics made by melting and dissolving tech-

nologies. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik* (All the Materials. Encyclopaedic Reference Book), 2012, no. 3, pp. 7–12 (in Russ.).

[6] Borodulin A.S., Malysheva G.V., Romanova I.K. Rheological property optimization of binders used for molding of glass-reinforced plastic products by vacuum infusion technique. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants], 2015, no. 3, pp. 40–44 (in Russ.).

[7] Malysheva G.V., Romanova I.K. Choice optimization of parameters characterizing of object state in case of solution of reliability problems. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], 2015, no. 6, pp. 33–38 (in Russ.).

[8] Carter E.J., Fell A.W., Summerscales J. A simplified model to calculate the permeability tensor of an anisotropic fibre bed. *Composite Manufacturing*, 1995, no. 6, p. 228-33.

[9] Van der Ween F. Algorithms for draping fabrics on doubly curved surfaces. *Int. J. Numer Methods Engng*, 1991, no. 31, p. 1415–26.

[10] Chan A.W., Hwang S.T. Anisotropic in plane permeability of fabric media. *Polymer engineering Science*, 1991, no. 31(6), p. 1233–9.

[11] Endruweit A., Ermanni P. The in plane permeability of sheared textiles. Experimental observations and a predictive conversion model. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 2013. 264 p.

**Pyi Phyo Maung** — post-graduate student of Space-Rocket Composite Designs Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Malysheva G.V.** — Dr. Sci. (Eng.), Professor of Space-Rocket Composite Designs Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Pyi Phyo Maung, Malysheva G.V. Modeling of the Kinetics of Impregnation Process in the Production of Reinforced Carbon-Fiber Reflectors for Space Antennas. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 5, pp. 38–47. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-5-38-47