

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО СВЯЗУЮЩЕГО В ТЕКСТИЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

DETERMINATION OF THE DEPTH OF PENETRATION OF A POLYMERIC BINDING IN TEXTILE MATERIAL IN THE FORMATION OF LAYERED COMPOSITES

УДК 677.027

Н.Н. Ясинская*, А.О. Кульнев

Витебский государственный технологический университет

<https://doi.org/10.24411/2079-7958-2018-13510>

N. Yasinskaya*, A. Kulnev

Vitebsk State Technological University

РЕФЕРАТ

ПРОПИТКА, ТЕКСТИЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, СЛОИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ, КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТАЯ СТРУКТУРА, ПОЛИМЕРНЫЕ СВЯЗУЮЩИЕ

Авторами проведены теоретические исследования процессов пропитки текстильных материалов полимерными связующими при формировании слоистых композиционных текстильных материалов. Получены математические модели, позволяющие определять глубину проникновения полимерного связующего в текстильный материал при соединении с полотном основы под действием прижимных валов, а также прогнозировать прочность адгезионного соединения слоистых текстильных композитов. Определена зависимость коэффициента проницаемости от пористости тканого полотна крепового переплетения на базе полотняного из химических нитей при постоянном значении вязкости полимерного связующего, а также распределение порового давления полимерного связующего по толщине текстильного материала.

ABSTRACT

IMPREGNATION, TEXTILE MATERIALS, LAYERED MATERIALS, CAPILLARY-POROUS STRUCTURE, POLYMERIC BINDERS

Theoretical and experimental studies of the processes of impregnation of textile materials with polymeric binders during the formation of layered composite materials were carried out. Mathematical models have been obtained that allow determining the thickness of the polymer binder on the surface of a textile fabric when joined to the base fabric under the action of pressure rolls. As a result of experimental studies, it was found that for layered textile materials with a top layer of woven fabric the optimum value of the polymer binder film thickness is $0,03-0,06 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Also, experimentally obtained values of the effective pore radius into which the polymer binder penetrates for textile materials used in the formation of layered (composite) textile materials, is in the range of 20–100 microns.

ВВЕДЕНИЕ

Слоистыми композиционными текстильными материалами называют такие материалы, структура которых состоит из набора чередующихся компонентов – слоев, хотя бы один из которых текстильный, жестко связанных между собой по всей поверхности [1].

Прогрессивным способом формирования слоистой текстильной структуры является клеевой, который позволяет соединять разнородные

компоненты, получать двухслойные и многослойные материалы, используемые в производстве обуви, одежды, текстильных настенных и напольных покрытий [2, 3, 4].

При формировании слоистых текстильных композитов клеевым способом полимерное связующее наносится на полотно основы контактной пропиткой с последующим соединением под давлением прижимных валов текстильного материала (волокно, нити, пряжа, ткань) с не-

* E-mail: yasinskaynn@rambler.ru (N. Yasinskaya)

тканым полотном (бумага, флизелин) [5]. Важнейшим физико-химическим явлением, сопровождающим технологический процесс, является адгезия, а показателем, характеризующим качество слоистого материала – прочность адгезионного соединения. Прочность адгезионного соединения зависит от свойств пряжи (нити), глубины проникновения полимерного связующего в текстильное полотно и определяется по формуле (1)

$$P = \frac{B \cdot R_g}{L} \cdot (2r^2 \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right) - 2(r-h)\sqrt{2rh-h^2} + R^2 \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right) - (R-h)\sqrt{2Rh-h^2}) \text{ где } R = \frac{l^2}{16r}; \quad (1)$$

где B – количество волокон приповерхностного слоя, $1/\text{мм}^2$; R_g – разрывная нагрузка волокна, H ; L – ширина слоистого текстильного материала, мм ; r – радиус нити (пряжи), мм ; h – глубина проникновения полимерного связующего, мм ; l – расстояние между нитями основы, мм .

Целью данной работы является получение математической модели, позволяющей определять глубину проникновения полимерного связующего в текстильный материал при соединении с полотном основы под действием прижимных валов, а также прогнозировать прочность адгезионного соединения слоистых текстильных композитов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Глубина проникновения полимерного связующего в соединяемые компоненты слоистого текстильного материала зависит от природы и физико-химических свойств полимерного связующего, текстильного материала и материала основы (бумага, флизелин), от условий формирования слоистой структуры (давление, температура, продолжительность) и других.

В качестве объекта исследований выбран слоистый материал, состоящий из декоративного слоя – льняная ткань поверхностной плотности 220 г/м^2 , полотна основы – бумага поверхностной плотности 100 г/м^2 , соединенных клеевым способом.

После равномерного нанесения полимерного связующего на нетканый материал происходит его соединение с тканым полотном под давлением прижимных валов. Так как полимерное связующее (водный раствор или дисперсия) практически несжимаемо, поэтому проникает в пористую структуру соединяемых слоев. В результате экспериментального исследования характера разрушения адгезионного соединения [1, 3, 6] слоистых текстильных материалов установлено, что полимерное связующее проникает в текстильное полотно, что объясняется его значительно большей пористостью по сравнению с нетканым материалом, глубина проникновения полимерного связующего h в тканое полотно много больше глубины проникновения в нетканый материал.

Для прогнозирования прочности образующегося адгезионного соединения и возможности регулирования глубины проникновения полимерного связующего в текстильный материал необходимо проанализировать кинетику пропитки тканого полотна контактным способом.

При использовании для пропитки текстильного материала внешнего давления капиллярный эффект не оказывает существенного влияния на процесс, и пропитка происходит уже по другим законам [7, 8].

Движения полимерного связующего в капиллярно-пористом материале с учетом действия внешнего давления возможно исследовать с использованием классической теории фильтрации [9, 10]. Несмотря на то, что закон Дарси был открыт для случайных малосжимающих пористых сред, многочисленными экспериментами подтверждена его применимость для волокнисто-пористых структур, к которым относятся тканые полотна из натуральных и химических волокон.

Однако текстильный материал (тканое полотно), имеющий капиллярно-пористую структуру, при соединении с нетканым полотном (бумагой) деформируется под действием усилия прижимных валов (рисунок 1). При деформации тканого полотна изменяется его пористость. Полимерное связующее проникает в структуру текстильного материала восходящим потоком. Поэтому в случае совместного действия на тканое полотно деформационных и фильтрационных нагрузок

воспользуемся теорией фильтрационной консолидации (уплотнения), изложенной в работах В. А. Флорина [11]. Сущность теории консолидации применительно к двухфазной системе «текстильный материал – полимерное связующее» заключается в распределении действующей на текстильный материал нагрузки, создаваемой прижимными валами между твердой и жидкой фазами.

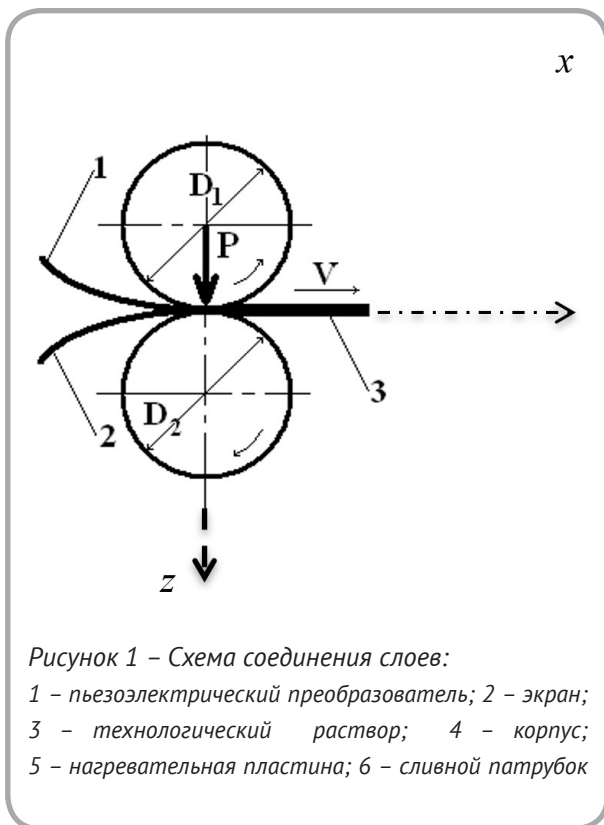


Рисунок 1 – Схема соединения слоев:
 1 – пьезоэлектрический преобразователь; 2 – экран;
 3 – технологический раствор; 4 – корпус;
 5 – нагревательная пластина; 6 – сливной патрубок

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛУБИНЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО СВЯЗУЮЩЕГО В ТЕКСТИЛЬНОЕ ПОЛОТНО

В процессе уплотнения текстильного материала под действием внешней нагрузки (давления прижимных валов) в порах с полимерным связующим возникает поровое давление. Поровое давление получается наибольшим в случае полного насыщения пор связующим, при наличии в порах защемленного воздуха поровое давление оказывается ослабленным.

Согласно теории фильтрационной консолидации запишем следующие основные соотношения:

– уравнение равновесия:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\sigma - P_R \cdot P_{CB}) = 0; \quad (2)$$

– уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left\{ P_R V_p + (1 - P_R) \frac{\partial u}{\partial \tau} \right\} = 0; \quad (3)$$

– закон Гука – Био:

$$\sigma = f \frac{\partial u}{\partial \tau} - (1 - P_R) \cdot P_{CB}; \quad (4)$$

– закон Дарси – Герсеванова:

$$V_p - \frac{\partial u}{\partial \tau} = - \frac{k_f}{P_R} \frac{\partial P_{CB}}{\partial z}; \quad (5)$$

где z – пространственная координата, перпендикулярная соединяемым слоям (текстильный материал – нетканое полотно); P_{CB} – поровое давление в полимерном связующем; P_R – пористость текстильного материала; V_p – средняя скорость полимерного связующего в порах в направлении z ; $P_R V_p$ – скорость фильтрации (расход полимерного связующего через единицу площади в единицу времени); u – перемещение текстильного материала в направлении сжатия z ; σ – нормальные напряжения в текстильном материале; k_f – коэффициент фильтрации полимерного связующего в текстильном материале:

$$k_f = \frac{P_R \cdot d^2}{\eta} \cdot \alpha, \quad (6)$$

где d – средний диаметр пор (капилляров); η – вязкость полимерного связующего; α – коэффициент геометрической формы пор.

Преобразуя уравнения (2)–(5) согласно [11],

получим нелинейное уравнение пропитки текстильного материала с учетом внешнего давления прижимных валов:

$$\frac{\partial P_{CB}}{\partial \tau} = \frac{1}{h[P_{CB} - P(\tau)]} \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial P_{CB}}{\partial z} + P(\tau), \quad (7)$$

где $P(\tau) = P_{cb}(0, \tau)$ – давление прижимных валов в момент времени τ ; $h(P_{cb})$ – функция, обратная $\sigma(\tau)$.

Пространственная координата пропитки z принимает значения от 0 до δ (толщина пропитанного текстильного материала). Толщина пропитанного текстильного материала является функцией продолжительности процесса пропитки $\delta = \delta(\tau)$ и по мере проникновения полимерного связующего в текстильный материал увеличивается во времени. Таким образом, необходимо определить скорость изменения границы пропитки, изменяющейся во времени – краевая задача Стефана. Решение задачи состоит в вычислении концентрационного профиля и определении положения межфазных границ в различные моменты времени.

1. При $z = 0$ поровое давление в полимерном связующем равно давлению прижимных валов:

$$P_{CB}(0, \tau) = P(\tau). \quad (8)$$

2. При $z = \delta$ движение границы можно описать следующими равенствами:

$$\begin{aligned} V(\delta, \tau) &= k \frac{\partial \delta}{\partial \tau}, \\ P_{CB}(\delta, \tau) &= \sigma_{CB}(\delta), \end{aligned} \quad (9)$$

где k – коэффициент поглощения полимерного связующего текстильным материалом; $\sigma_{cb}(\delta)$ – функция, учитывающая смачивающую способность связующего.

Предполагается, что поровое давление на минимальном участке длины распределено по линейному закону:

$$\begin{aligned} P_{CB}(z, 0) &= P(0) - \frac{z}{\delta} [P_{CB}(0) + \\ &+ \sigma_{CB}(\delta)], \quad z = 0, \delta(0). \end{aligned} \quad (10)$$

При соединении нетканого полотна с текстильным материалом происходит диффузия полимерного связующего в текстильный материал, возникает градиент концентрации $\partial c / \partial z$. В случае водных дисперсий и растворов полимеров вода проникает в текстильный материал с большей скоростью, чем более вязкое вещество связующего. То есть наблюдается диффузия молекул воды через вещество полимерного связующего. Согласно закону Фика, скорость диффузии v_d пропорциональна количеству вещества (градиенту концентраций), диффундирующего через сечение, перпендикулярное потоку диффузии, за единицу времени:

$$v_d = -D \frac{\partial c}{\partial z}, \quad (11)$$

где D – коэффициент диффузии, $m^2 c^{-1}$.

Дифференцируя (11) по z , получим:

$$\frac{\partial v_d}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial z} D \frac{\partial c}{\partial z}. \quad (12)$$

Из уравнения неразрывности полимерного связующего с учетом (12):

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + \frac{\partial v_d}{\partial z} = 0.$$

Получим:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} D \frac{\partial c}{\partial z}. \quad (13)$$

При движении полимерного связующего в капиллярах и порах текстильного материала со средней скоростью \vec{v} (производная, взятая в зависимости от системы координат, движущейся

в пространстве), вместо частной производной $\partial c/\partial \tau$ используем субстанциональную производную, которая определяется соотношением:

$$\frac{D(c)}{D(\tau)} = \frac{\partial c}{\partial \tau} + \vec{v} \frac{\partial c}{\partial z} . \quad (14)$$

Тогда, подставляя (14) в уравнение (13), получим

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + \vec{v} \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} D \frac{\partial c}{\partial z} .$$

Для решения дифференциального уравнения (14) краевые условия запишутся

$$c(z, 0) = c_0 - \frac{c_0 z}{\delta} . \quad (15)$$

где c_0 – концентрация полимерного связующего в начальный момент времени, равная его расходу, на границе, разделяющей пропитанный связующим и сухой текстильный материал $z = \delta(\tau)$

$$c[\delta(\tau), \tau] = 0 .$$

Учитывая баланс расходов вещества полимерного связующего и воды в текстильном материале за время τ при условии, что концентрация воды ($c(\theta, \tau)$) в слое полимерного связующего толщиной $h(\tau)$ на поверхности текстильного материала распределена равномерно, уравнение, связывающее толщину полимерного связующего, зависящую от расхода $h_0 = h(\theta)$, и концентрацию на поверхности текстильного материала $c_0 = c(\theta, \theta)$ с градиентом концентрации и давления:

$$\left[h_0 + \int_0^\tau k \frac{\partial}{\partial z} P(\theta, \tau) d\tau \right] \cdot c(\theta, \tau) = h_0 c_0 + \int_0^\tau \left[k \frac{\partial}{\partial z} P(\theta, \tau) + P_{св} \frac{\partial}{\partial z} c(\theta, \tau) \right] d\tau . \quad (16)$$

Толщина слоя полимерного связующего на поверхности текстильного материала в момент времени τ

$$h(\tau) = h_0 + \int_0^\tau k \frac{\partial}{\partial z} P(\theta, \tau) d\tau , \quad (17)$$

где h_0 – толщина наносимого полимерного связующего, м; k – коэффициент проницаемости, м².

Коэффициент проницаемости связан с коэффициентом фильтрации следующим соотношением:

$$\frac{k}{\eta} = \frac{k_f}{\rho} , \quad (18)$$

где ρ – плотность полимерного связующего, кг/м³; k_f – коэффициент фильтрации

$$k_f = \frac{P_R \cdot d^2}{\eta} \cdot \alpha .$$

Коэффициент проницаемости зависит от пористости текстильного материала, диаметра пор и вязкости полимерного связующего. Для расчета коэффициента проницаемости использовались полученные нами ранее значения эффективного радиуса пор, который находится в диапазоне 20–100 мкм. [12]. Зависимость коэффициента проницаемости от пористости тканого полотна при постоянном значении вязкости полимерного связующего $\eta = 2,2 \cdot 10^{-3}$ Па с представлена на рисунке 2.

Для определения распределения порового давления по толщине текстильного материала при неустановившемся движении полимерного связующего $\partial/\partial z P(\theta, \tau)$ используем решение классической задачи движения несжимаемой жидкости в упруго-деформируемом материале [11]

$$P(z, \tau) = P(\theta) \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{z}{2\sqrt{\chi \cdot \tau}} \right] , \quad (19)$$

где χ – коэффициент пьезопроводности, харак-

теризующий скорость перераспределения давления по толщине текстильного материала, м²/с.

Коэффициент пьезопроводности определяется по формуле, предложенной В. Н. Щелкачевым:

$$\chi = \frac{k}{\eta(P_R \cdot \beta_{CB} + \beta_B)}, \quad (20)$$

где β_{CB} , β_B – соответственно, коэффициенты объемного сжатия полимерного связующего и волокнистого материала. $\beta_{CB} = 35,8 \div 49,51 \cdot 10^{-11}$

$1/\text{Па}$, $\beta_B = 0,6 \div 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ 1/Па}$.

Численные решения уравнений (16) и (19) с использованием системы компьютерной алгебры Maple позволяют определить распределение порового давления полимерного связующего по толщине текстильного материала (рисунок 3), а также толщину образующейся пленки (рисунок 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученное уравнение (17) позволяет определить глубину проникновения полимерного связующего при соединении тек-

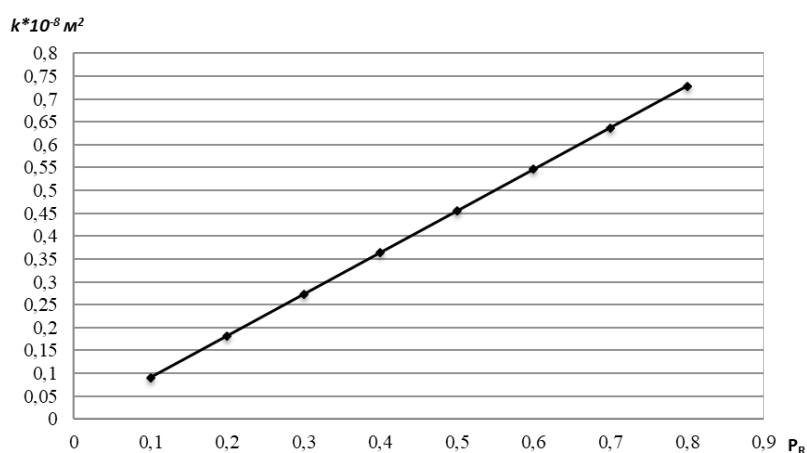


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента проницаемости от пористости тканого полотна

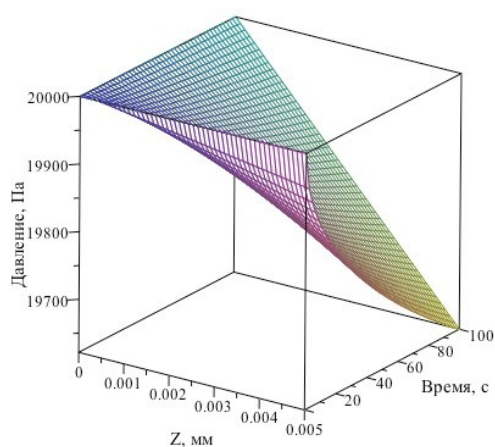


Рисунок 3 – Распределение порового давления полимерного связующего по толщине текстильного материала

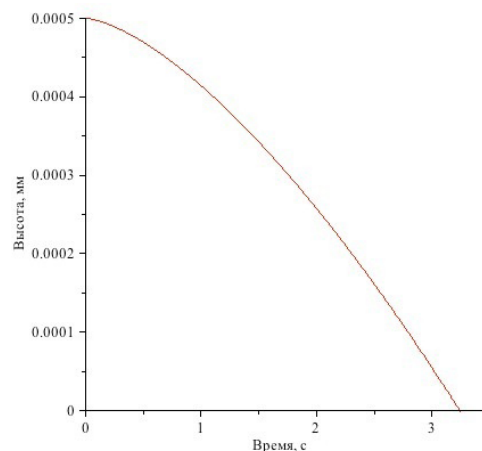
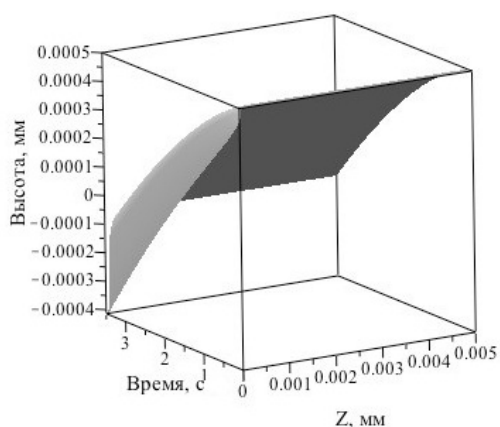


Рисунок 4 – Зависимость толщины полимерного связующего на поверхности текстильного полотна от продолжительности соединения слоев

стильного материала с полотном нетканой основы под действием прижимных валов в момент времени t , а также прогнозировать прочность адгезионного соединения слоистых текстильных композитов (1). Определена зависимость коэффициента проницаемости от пористости тканого полотна крепового переплетения на базе по-

лотняного из химических нитей при постоянном значении вязкости полимерного связующего, с использованием системы компьютерной алгебры Maple получено распределение изменения толщины полимерного связующего на поверхности текстильного полотна за время t .

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ясинская, Н. Н., Ольшанский, В. И., Коган, А. Г. (2015), Композиционные текстильные материалы, Витебск, 299 с.
2. Калиновская, И. Н., Ясинская, Н. Н. (2005), Создание льносодержащих текстильных настенных покрытий, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2005, № 7, С. 9–13.
3. Мурычева, В. В., Ясинская, Н. Н. (2014), Анализ структуры тканой основы композиционного материала. *Химические волокна*. 2014, № 4, С. 42–45.
4. Чукасова-Ильющкина, Е. В., Ясинская, Н. Н., Коган, А. Г. (2010), Перспективность техноло-

REFERENCES

1. Yasinskaja, N. N., Ol'shanskij, V. I., Kogan, A. G. (2015), *Kompozicionnye tekstil'nye materialy* [Composite Textile Materials], Vitebsk, 299 p.
2. Kalinovskaja, I. N., Yasinskaja, N. N. (2005), Creation of flax-containing textile wall coverings [Sozdanie l'nosoderzhashhih tekstil'nyh nastennyh pokrytij], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta – Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2005, № 7, pp. 9–13.
3. Murycheva, V. V., Yasinskaja, N. N. (2014), Analysis of the structure of the woven base composite material [Analiz struktury tkanogo bazovogo kompozicionnogo materiala], *Himicheskie volokna – Chemical fiber*. 2014, № 4, pp. 42–45.

- гий с использованием текстильных вторичных материальных ресурсов, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2010, № 18, С. 105–109.
5. Мацкевич, Е. В., Ольшанский, В. И., Дмитракович, Н. М. (2015), Исследование процесса переноса клеевого состава на пленку валковым способом, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2015, №18, С. 79–85.
 6. Мартынов, В. А., Пасечник, К. А., Власов, А. Ю. (2016), Определение скорости пропитки низковязким органическим связующим углеродной армирующей ткани сатинового плетения, *Вестник Томского государственного университета*, 2016, №1(39), С. 82–89.
 7. Чукасова-Ильюшкина, Е. В., Ясинская, Н. Н. (2007), Исследование процесса формирования комбинированных текстильных материалов, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2007, № 12, С. 50–53.
 8. Душин, М. И. Донецкий, К. И. Караваев, Р. Ю. Коротков, И. А. (2017), Некоторые особенности жидкостного формования полимерных композиционных материалов, ТРУДЫ ВИАМ, № 2, С. 54–64.
 9. Баренблатт, Г. И., Ентов, В. М., Рыжик, В. М. (1984), Движение жидкостей и газов в природных пластах, Недра, 211 с.
 10. Афанасьев, А. Е., Пухова, О. В., Волков, А. В. (2004), Моделирование пропитки коллоидных капиллярно-пористых тел при различной кислотности дисперсной среды, *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2004, № 6 С. 154–157.
 11. Флорин, В. А. (1961), Основы механики грунтов, Т. 2, Москва, Госстройиздат, 543 с.
 12. Бизюк, А. Н., Жерносек, С. В., Ольшанский, В. И., Чукасова-Ильшужкина, Е. В., Ясинская, Н. Н., Коган, А. Г. (2010), Perspective of technologies using textile secondary material resources [Perspektivnost' tehnologij s ispol'zovaniem tekstil'nyh vtorichnyh material'nyh resursov], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta – Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2010, № 1 18, pp. 105–109.
 5. Mackevich, E. V., Ol'shanskij, V. I., Dmitrakovich, N. M. (2015), Investigation of the process of transfer of the adhesive composition to the film by the roller method [Issledovanie processa perenosa kleevogo sostava na plenku valkovym sposobom], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta – Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2015, № 18, pp. 79–85.
 6. Martynov, V. A., Pasechnik, K. A., Vlasov, A. Ju. (2016), Determination of the rate of impregnation with low-viscosity organic binder of carbon reinforcing fabric satin weaving [Opredelenie skorosti propitki nizkovjazkim organicheskim svjazujushhim uglerodnoj armirujushhej tkani satinovogo pletenija], *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta – Vestnik of Tomsk State University*, 2016, № 1(39), pp. 82–89.
 7. Chukasova-Il'jushkina, E. V., Yasinskaja, N. N. (2007), The study of the formation of combined textile materials [Issledovanie processa formirovanija kombinirovannyh tekstil'nyh materialov], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta – Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2007, № 12, pp. 50–53.
 8. Dushin, M. I., Doneckij, K. I., Karavaev, R. Ju., Korotkov, I. A. (2017), Some features of the liquid molding polymer composites [Nekotorye osobennosti zhidkostnogo formovanija polimernyh kompozicionnyh materialov], ТРУДЫ ВИАМ – ВИАМ-WORKS, № 2, pp. 54–64.
 9. Barenblatt, G. I., Entov, V. M., Ryzhik, V. M. (1984),

Ясинская, Н. Н. (2014), Исследование пропитки текстильных материалов в поле СВЧ-излучения, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2014, № 26, С. 21–28.

Dvizhenie zhidkostej i gazov v prirodnyh plastah [Movement of liquids and gases in natural formations], Nedra, 211 p.

10. Afanas'ev, A. E., Puhova, O. V., Volkov, A. V. (2004), Simulation of impregnation of colloidal capillary-porous bodies with different acidity of the dispersed medium [Modelirovanie propitki kolloidnyh kapilljarno-poristyh tel pri razlichnoj kislotnosti dispersnoj sredy], *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' – Mining Information and Analytical Bulletin*, 2004, № 6 pp. 154–157.
11. Florin, V. A. (1961), *Osnovy mehaniki gruntov* [Fundamentals of soil mechanics], vol. 2, Moscow, Gosstroizdat, 543 p.
12. Bizjuk, A. N., Zhernosek, S. V., Ol'shanskij, V. I., Yasinskaja, N. N. (2014), The study of the impregnation of textile materials in the field of microwave radiation [Issledovanie propitki tekstil'nyh materialov v pole SVCh-izlucheniya], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta – Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2014, № 26, pp. 21–28.

Статья поступила в редакцию 10. 10. 2018 г.