

УДК 674.8:630

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДРЕВЕСИНЫ, ПОДВЕРЖЕННОЙ ДЕЙСТВИЮ АГРЕССИВНЫХ СРЕД В КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ

Стородубцева Т.Н.

*ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия»,
Воронеж, e-mail: tamara-tns@yandex.ru*

Разработаны две взаимодополняющих модели и проведен анализ напряженного и деформированного состояний в кубе из древесностекловолоконного композиционного материала, учитывающие физический смысл процессов, происходящих в нем с момента начала отверждения олигомера до возможного всестороннего увлажнения. Это позволило вывести формулы для подсчета усадочных деформаций и напряжений. Получены значения главных напряжений и упругих относительных деформаций в кубике из древесины, под действием температуры саморазогрева полимерного раствора в результате экзотермических реакций полимеризации компонентов фурфуrolацетонного мономера, его усадки и набухания при всестороннем увлажнении и, в особенности, стесненного набухания древесного заполнителя, в который диффузионно и при адсорбции из полимера проникает вода. Формулы могут быть использованы при расчете шпал по первому и второму предельным состояниям, в том числе при определении толщины полимерной оболочки из стекловолоконного композиционного материала, защищающей ее от действия воды.

Ключевые слова: напряжения, деформации, древесина, композиционный материал

STRESS-STATE MODELING OF WOOD EXPOSED TO AGGRESSIVE ENVIRONMENTS IN COMPOSITE MATERIAL

Storodubtseva T.N.

*FSBEI HPE «Voronezh State Academy of Forestry and Technologies»,
Voronezh, e-mail: tamara-tns@yandex.ru*

Two complementary models of composite fibre-wood cubes were worked out. Stressed and stained state analysis taking into account physical processes in the cube from the starting moment of its hardening to the point of complete possible moistening was carried out. This work made possible the development of shrinkage and stress deformation formulas. The values of the main tensions appearing in the wooden cube as well as the values of elastic relative deformations caused by self-heating temperatures of polymer solution were received. The tensions and deformations are caused by the exothermic reactions of furfurolаcetic monomer components polymerization alongside with the shrinkage and swelling of the cube in the process of its complete humidification, in particular, its strained swelling due to both water diffusion and water absorption from the polymer. Given formulas can be applied for railroad ties calculations for the first and second limiting conditions; for example, for the thickness identification of the glass-fibre composite water protecting cover.

Keywords: tension, deformation, wood, composite material

Спроектированные составы древесностекловолоконного композиционного материала (ДСВКМ) для железнодорожных шпал, расчет которых был основан на обеспечении прочности и жесткости при различных видах механических нагрузок – кратковременных, длительно действующих и динамических, – остался малоизученным и неучтенными в нем целый ряд физических воздействий – это температура, усадка, набухание под действием воды и их сочетания. Сложными и совершенно не изученными являются напряженное и деформированное состояния в окрестности произвольной точки объема элемента конструкции из ДСВКМ, возникающие в нем под действием вышеназванных факторов.

В работах В.В. Патурова [1], а затем А.П. Прошина и В.И. Соломатова [2] отмечается, что в процессе отверждения крупногабаритных полимербетонных изделий, к которым могут быть отнесены и изделия транспортного строительства, возникают

значительные температурные и временные усадочные напряжения, приводящие в некоторых случаях к нарушению их монолитности. Положение усугубляется тем, что такие изделия предназначены для использования в условиях воздействия различных агрессивных сред и, в первую очередь, воды.

Рассмотрение свойств основных укрупненных структурообразующих компонентов, примененных для создания древесностекловолоконного композиционного материала (ДСВКМ), а именно древесины и полимерного раствора на смоле фурфуrolацетонного мономера (ФАМ), а также опыт получения его первых составов показал, что возникает необходимость искать новые пути к решению проблем, связанных с удовлетворением конструкционных и технологических требований к этому материалу. К ним могут быть отнесены следующие: древесина, являющаяся природным композитом, очень чутко реагирует на воду, проникающую в нее различными путями,

особенно если она высушена, как это имеет место при использовании ее в качестве армирующего заполнителя ДСВКМ; водопоглощение композиционных материалов на основе отходов древесины осуществляется за счет диффундирования молекул воды в пространство между участками и звеньями сжатых макромолекул полимера, в результате чего возникает пластифицирующий эффект, снижающий их прочность и жесткость; растворение компонентов связующего и уменьшение сил адгезии в контактной зоне полимер-наполнитель.

В связи с изложенным, в качестве одной из основных задач исследований явился анализ этих состояний в кубе из ДСВКМ под действием температуры саморазогрева полимерного раствора в результате экзотермических реакций полимеризации компонентов мономера ФАМ, его усадки и набухания при всестороннем увлажнении и, в особенности, стесненного набухания древесного заполнителя, в который диффузионно и при адсорбции из полимера проникает вода.

Полимерные отвержденные мастики и растворы на фурфурацетоновом олигомере ФАМ так же, как и древесина, склонны к набуханию, при этом в композиционном материале возникают влажностные напряжения, неодинаковые по величине и знаку – сжимающие и растягивающие.

Также очень актуальна проблема гидрофобизации при использовании изделий специального назначения, применяемого в элементах верхнего строения пути, например, шпал (железнодорожные, трамвайные пути и метрополитен) и защите их от агрессивных сред. В связи с этим была решена задача обоснованного выбора гидрофобизатора и условий модифицирования этим гидрофобизатором [3]. Была разработана специальная защита поверхности полимерной оболочки от проникновения воды к древесному заполнителю, а также защита от нее самой древесины, предохраняя ее тем самым от набухания и гниения. Исследование водопоглощения древесины в течение 30 сут показало, что при поверхностной обработке древесины отработанным машинным маслом и дивинилстирольным термоэластопластом, водопоглощение уменьшается, и при длительном пребывании в воде надежность защиты обеспечивается – водопоглощение имеет невысокие значения. Следовательно, наиболее устойчивый эффект гидрофобизации древесины удается достичь при образовании ковалентных связей пропитки с обрабатываемым материалом.

Сложным и совершенно не изученным являлись объемное напряженное и деформированное состояния, возникающие в из-

делях из этого материала под действием вышеназванных факторов. Единственной возможностью получить численные значения напряжений и деформаций явилось использование методов сопротивления материалов и теории упругости, позволивших решать подобные задачи.

Процесс водонасыщения можно объяснить следующим образом: вода может проникать в СВКМ по капиллярам как между полимерсвязующим веществом и нитевидной стеклоарматурой, так и по самой арматуре. В этом случае адгезионные связи различного вида должны ослабевать, что и приводит к снижению характеристик прочности и, в особенности, жесткости.

В результате диффузии молекулы воды проникают в объем полимерного материала между звеньями его молекул и, заполняя свободные промежутки, раздвигают эти звенья, а затем молекулы и надмолекулярные агрегаты, увеличивая расстояния между ними. Таким образом, увеличивается объем набухающего полимера и его масса. Процесс набухания прекращается после полного заполнения межмолекулярного пространства водой.

Поскольку вода диффундирует с небольшой скоростью и неравномерно распределяется по толщине материала, в нем возникают напряжения даже в том случае, если деформация не ограничивается жесткими внешними связями. Наружные слои материала стремятся расшириться и тянут за собой внутренние «сухие» слои, которые сопротивляются этому растяжению, ограничивая деформацию растяжения.

В связи с этим по сечению, перпендикулярному фронту диффундирующей жидкости, в материале возникают влажностные напряжения, неодинаковые по величине и знаку. Набухшие внешние слои окажутся сжатыми, а внутренние – растянутыми. Эпюры распределения влажностных напряжений меняются во времени, т.к. из-за пластифицирующего действия воды меняется модуль упругости отвержденного полимерного раствора.

После 720 ч пребывания в воде сжимающие напряжения равны 2,6...3,1 МПа, а растягивающие в средней части сечения составляют 25...30% сжимающих, т.е. 0,65...1,0 МПа [1].

Несмотря на то, что разработанные составы ДСВКМ обеспечивают прочность и жесткость изделий из них при различных видах механических нагрузок – кратковременных, длительно действующих и динамических, остался малоизученным и неучтенным целый ряд физических воздействий – это температура, усадка, набухание под действием воды и их сочетания. Вместе с тем роль этих воздействий в возможном нарушении моно-

литности структуры ДСВКМ может оказаться первичной и определяющей, а механические нагрузки лишь ускоряют начавшийся процесс разрушения [4].

Изложенное вызвало необходимость поставить в качестве одной из основных задач исследований анализ этих состояний в ДСВКМ под действием температуры саморазогрева полимерного раствора в результате экзотермических реакций полимеризации и поликонденсации компонентов мономера ФАМ, его усадки и набухания при всестороннем увлажнении и, в особенности, стесненного набухания древесного заполнителя, в который диффузионно и при адсорбции из полимера проникает вода.

Напряженное и деформированное состояние у произвольной точки «О» в объеме деревянного кубика является объемным, но сам кубик не является главным, как и его грани не являются главными площадками, т.к. на них действуют и нормальные, и касательные напряжения. Поэтому с использованием специальной программы для ЭВМ были получены значения главных напряжений и главных относительных деформаций для наиболее опасного его варианта – с положительными нормальными напряжениями по направлению нормалей «а», «r» и «t».

В результате проведенного анализа напряженного состояния образца были найдены компоненты тензора напряжений, инварианты, произведен поиск корней полинома (r_i) с использованием определителя «М» т.е. найдены значения главных напряжений с учетом того, что $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, МПа, найдено положение главных площадок через определение направляющих косинусов главных напряжений σ_3 , σ_2 и σ_1 .

Далее выполнен анализ деформированного состояния в точке «О» и найдены компоненты тензора деформаций: главные относительные деформации для осей $a-t$, $t-r$ и $a-r$.

Приведенные расчеты показали, что наибольшее главное напряжение, равное $\sigma_1 = 10,13$ МПа, меньше, чем предел прочности СВКМ при растяжении ($\sigma_{\text{по.пч}}^p = 1,9$ МПа), но несколько выше предела пропорциональности ($\sigma_{\text{по.пч}}^p = 9,7$ МПа). Но наибольшую опасность представляет собой величина главной относительной деформации по направлению между осями «t»–«r», равная $10 \cdot 10^{-3}$, которая превышает даже максимальную относительную деформацию при трещинообразовании, равную $6,6 \cdot 10^{-3}$, т.е. действие воды ухудшило напряженное и деформированное состояние внутри куба из ДСВКМ, ставшее опасным.

Рассмотрим варианты взаимодействия арматуры и матриц при усадке. В работе Л. Скупина [5] рассматривается процесс

усадки полимерной матрицы с заключенным в ней стекловолокном, причем принимается, что имеют место упругие деформации растяжений смолы и сжатия волокна, это первый подход. Конечно, в чистом виде он мог бы быть использован для выявления величин деформаций и напряжений при усадке матрицы ДСВКМ – СВКМ. Далее – рассматривается условие равновесия растягивающих усилий в стекловолокне и касательных – на границах раздела стекловолокно – полимерная матрица [4]. Это может быть использовано для учета поведения стекловолокна в матрице под нагрузкой. Но нас, в первую очередь, в связи с задачами исследования, интересовала совместная работа как бы укрупненных компонентов ДСВКМ – полимерной оболочки (ПО) из СВКМ и крупного древесного заполнителя (Д). Такой подход особенно важен для нового варианта ДСВКМ, где для армирования используется необработанная древесина в виде досок, сшитых гвоздями в несущий каркас.

На рис. 1 представлен вариант модели деформирования и распределения внутренних усилий в кубе из ДСВКМ под действием внутренних активных усадочных усилий в полимерной оболочке из СВКМ – $N_{\text{по}}$ и реактивных – по граням деревянного кубика – $N_{\text{д}}$. Они являются равнодействующими элементарных усилий, $dN_{\text{по}}$ и $dN_{\text{д}}$ в полимерной оболочке и деревянном кубике, действующих перпендикулярно плоскостям упругой симметрии древесины – tor , aor и aot по направлениям нормалей к ним – a , r , t (рис. 1, а, б и в); $d\epsilon_y$, $d\epsilon_{\text{по}}$, $d\epsilon_{\text{д}}$ – соответственно приращения усадки, относительных (на единицу длины) упругих деформаций растяжения полимерной оболочки и сжатия древесины.

При выводе формул, позволивших вычислить деформации и напряжения при усадке полимерной оболочки СВКМ с учетом влияния температуры, было принято, что внутренними уравновешивающими друг друга силами являются силы $N_{\text{по}}$ и $N_{\text{д}}$. Это позволило его упростить и получить численные значения деформаций и напряжений при температуре материала 60 и 20°C. Однако мы сочли возможным применить и другой дополнительный вариант распределения внутренних усилий куба из ДСВКМ, вводя усилия сдвига – $T_{\text{сд}}^a$, которые при отверждении мономера ФАМ начинают возникать по его вертикальным по направлению «а», «г» и «t» граням в зоне раздела СВКМ–древесина в результате образования адгезионных связей различной природы (рис. 2). Было установлено В.В. Патуроевым [1], что усадочные деформации запаздывают и отстают по времени от температурных.

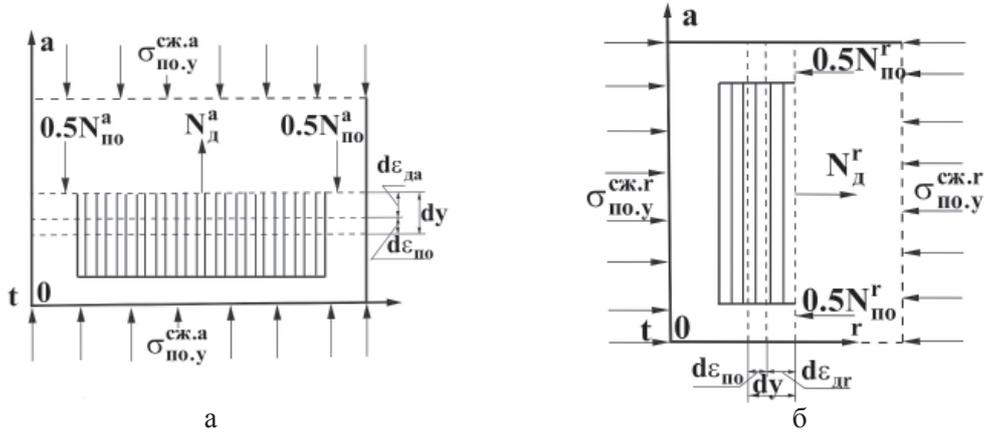


Рис. 1. Вариант модели деформирования и распределения внутренних усилий в кубе из ДСВКМ в процессе усадки

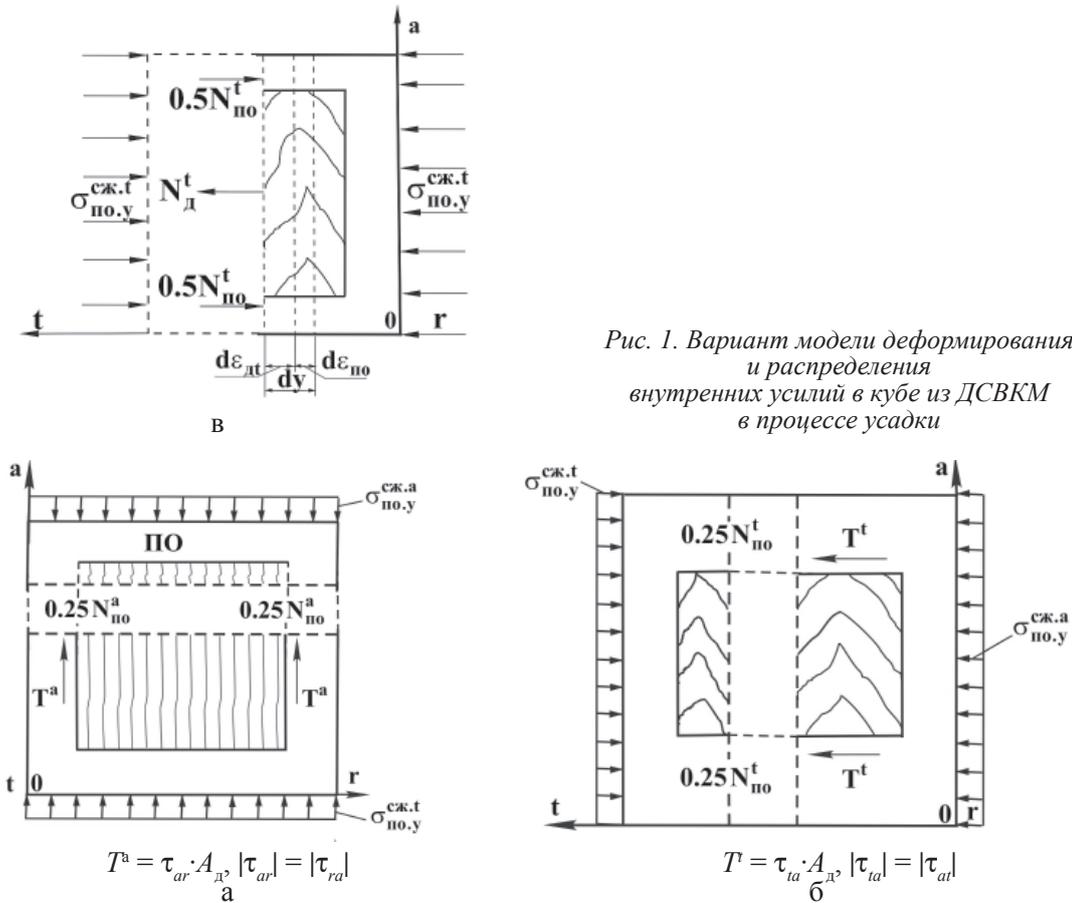


Рис. 2. Вариант распределения внутренних усилий в кубе из ДСВКМ при усадке полимерной оболочки с учетом возможного возникновения усилий сдвига по граням деревянного образца

Отсюда следуют весьма важные следствия: во-первых, при высоких температурах экзотермического саморазогрева температурные деформации и соответствующие им внутренние напряжения могут привести к нарушению монолитности изделий; во-вторых, несовпадение во времени температурных и усадочных напряжений позволяет определять их раздельно. Такой подход в сочетании с первым, на наш взгляд, более точно будет характеризовать физический смысл процессов, происходящих в кубе из ДСВКМ при его охлаждении и завершении реакций поликонденсации и полимеризации компонентов мономера ФАМ. Реактивные усилия сдвига по четырем граням каждого направления – «а», «r» и «t» деревянного кубика можно принять равными. Тогда условия равновесия внутренних сил по вертикальным (по направлению «а») и горизонтальным (по направлению «r» и «t») будут выглядеть так (рис. 2, а).

$$4T_d^a = N_{\text{по.у}}^{\text{сж.а}} \quad \text{или} \quad 4T_d^r = N_{\text{по.у}}^{\text{сж.д}}$$

$$\text{или} \quad 4T_d^t = N_{\text{по.у}}^{\text{сж.т}} \quad (1)$$

Переходя к напряжениям по направлению нормали «а», получим:

$$4\tau_d^{a,r} \cdot A_d = \sigma_{\text{по}}^{\text{сж.а}} \cdot A_{\text{по}} \quad \text{и т.д.}, \quad (2)$$

откуда касательные напряжения, действующие вдоль вертикальных граней куба, будут равны:

$$\tau_d^{a,r} = \sigma_{\text{по}}^{\text{сж.а}} \cdot A_{\text{по}} / 4A_d =$$

$$= 10,3 \cdot 28,75 / 4 \cdot 20,25 = 3,86 \text{ МПа}$$

или, округляя

$$\tau_d^{ar} = 4 \text{ МПа} < \tau_{\text{д.н}}^{\text{сж.а}} = 4,3 \text{ МПа}$$

(рис. 2, б и в), или при принятых размерах деревянного кубика,

$$\tau_d^a = 0,36 \cdot \sigma_{\text{по.у}}^{\text{сж.а}} \quad (3)$$

Если учесть, что нормативное напряжение сдвига – $\tau_n^{\text{сд}}$ по контакту древесина–полимерраствор (Д-ПР) равно 12,0 МПа, по контакту ПР-ПР – 7,5 МПа, $\tau_n^{\text{сж.а}}$ по контакту Д-ПР – 7,0 МПа, а $\tau_{\text{д.н}}^{\text{сж.а}}$ по контакту Д-Д – 4,3 МПа при влажности 30%, то наиболее опасным представляется последний вариант, если температура изделия равна 20°C [4].

Однако, как следует из наших исследований, если адгезионные связи между древесиной и полимерным раствором возникнут достаточно быстро, а температура его саморазогрева при отверждении достигнет 80°C, то предел прочности при скалывании будет равен всего 3,0 МПа, что может

привести к расколу древесного заполнителя и следующим за этим непредвиденным последствиям, которые могут повлиять на монолитность структуры ДСВКМ.

Усадочные внутренние напряжения, возникающие в процессе формирования полимерных материалов и развивающиеся во времени в процессе их последующей эксплуатации, – один из важнейших критериев, определяющих длительную прочность этих материалов [1].

Появление в полимерных композитах усадочных внутренних напряжений связано с фазовым переходом олигомера из жидкого в твердое состояние и незавершенностью релаксационных процессов. Обуславливаются они несколькими факторами, в том числе: – усадочными явлениями в результате сближения молекул олигомера в процессе полимеризации (поликонденсации); образованием жестких надмолекулярных структур полимера и их высокой адгезионной связью с частицами наполнителей; усадкой в процессе потери летучих компонентов.

Выводы

Предложено применить в качестве модели деформирования и распределения внутренних усилий у произвольной точки «О» в объеме куба из ДСВКМ и условие их равновесия в процессе усадки, а именно активных усадочных в оболочке из СВКМ и реактивных – по граням кубика из древесины, перпендикулярных этому усилию, первый вариант описанного процесса, как наиболее опасный.

Таким образом, с применением ЭВМ получены аналитические выражения, позволяющие подсчитывать главные напряжения и относительные деформации, учитывающие прочностные и упругие характеристики двух основных компонентов ДСВКМ – СВКМ и древесины, определить основную причину появления микро- и макротрещин, а затем разрушение структуры этого материала – это низкую деформативность отвержденного полимерного связующего. Предложенный метод соответствует современным требованиям компьютерного материаловедения.

В результате напряженного и деформированного состояния было выявлено, что наибольшее главное напряжение, равно $\sigma_1 = 10,13 \text{ МПа}$, меньше, чем предел прочности СВКМ при растяжении ($\sigma_{\text{по.пч}}^p = 1 \text{ 9 МПа}$), но несколько выше предела пропорциональности ($\sigma_{\text{по.пл}}^p = 9,7 \text{ МПа}$). Но наибольшую опасность представляет собой величина главной относительной деформации по направлению между осями «t»–«r», равная $10 \cdot 10^{-3}$, которая превышает

даже максимальные относительные деформации при трещинообразовании, равная $6,6 \cdot 10^{-3}$, т.е. действие воды ухудшило напряженное и деформированное состояние внутри куба из ДСВКМ. Так как аналогичная деформация без учета действия воды составляла 0,48%, то это означает, что, как и следовало ожидать, ее действие повысило значения деформаций СВКМ в 1,4 раза.

Такой подход позволил вывести в упругой постановке задачи формулы для подсчета усадочных деформаций и напряжений по направлениям нормалей «а», «r» и «t» при температуре 20 и 60°C, а затем вычислить соответствующие относительные упругие деформации.

Эти исследования необходимо было выполнить, что позволило обеспечить монолитность ДСВКМ в изделиях транспортно-го строительства, в данном случае – шпалах.

Список литературы

1. Патуров В.В. Полимербетоны: моногр. // НИИ бетона и железобетона. – М.: Стройиздат, 1987. – 286 с.
2. Прошин А.П. Тепловыделение при отверждении полимерных композитов / А.П. Прошин, В.И. Соломатов // Изв. вузов. – Строительство. – 1985. – № 12. – С. 49–53.
3. Применение гидрофобизирующих и модифицирующих составов для пропитки древесного армирующего заполнителя / Т.Н. Стородубцева, В.И. Харчевников, А.И. Томилин, К.В. Батуринов // Лесотехнический журнал. – 2012. – № 2. – С. 36–46.
4. Стородубцева Т.Н. Обеспечение трещиностойкости композиционного материала на основе древесины для железнодорожных шпал при отверждении и всестороннем ув-

лажнении: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж. гос. лесотехн. акад. – Воронеж, 1999. – 20 с.

5. Скупин Л. Полимерные растворы и пластбетоны: пер. с чеш. – М.: ГСИ, 1968. – 176 с.

References

1. Paturoev V.V. Polymer concrete: monograph / Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete. Moscow: Stroiizdat 1987. 286 p.
2. Proshin A.P. Heat dissipation in curing polymer composites / A.P. Proshin, V.I. Solomatov // Math. universities – Construction, 1985, no. 12. pp. 49–53.
3. Storodubtseva T.N., Kharchevnikov V.I., Tomilin A.I., Baturin K.V. The use of hydrophobic and modifying compounds for impregnation of wood reinforcing filler. Journal of Forestry, 2012. no. 2. pp. 36–46.
4. Storodubtseva T.N. Providing crack composite material based on wood for railway sleepers and full curing moisture: Author. dis. ... Candidate. tech. Science / Storodubtseva T.N.; Voronezh. State. lesotehn. Acad. Voronezh, 1999. 20 p.
5. Skupin L. polymer solutions and plastbetony / L. Skupin. – Trans. with Czech. Moscow: ICG, 1968. 176 p.

Рецензенты:

Сушков С.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия, г. Воронеж;

Афоничев Д.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электротехники и автоматики ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный аграрный университет имени Императора Петра I», г. Воронеж.

Работа поступила в редакцию 15.01.2013.