

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОГО ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ НА СВОЙСТВА ДРЕВЕСНО-ЦЕМЕНТНОГО МАТЕРИАЛА

В.И. ЗАПРУДНОВ, *проф., МГУЛ, д-р техн. наук*⁽¹⁾

zaprudnov@mgul.ac.ru

⁽¹⁾ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет леса»
141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1

Сравнение эффективных свойств древесно-цементных материалов, полученных в результате теоретических и экспериментальных исследований, показывает, что экспериментальные значения лежат ниже расчетных. Это расхождение обусловлено тем, что древесно-цементные композиты содержат большое количество пор, которые существенно уменьшают его жесткостные и прочностные характеристики. Определение эффективных свойств композиционных материалов на основе органического заполнителя и цементного вяжущего, ослабленного порами, проводится в два этапа. На первом этапе определяют макроскопические постоянные пористого цементного вяжущего, рассматривая поры как некоторый компонент с нулевыми модулями упругости. На втором этапе определяются макроскопические постоянные древесно-цементного материала по известным свойствам пористого цементного вяжущего и органического заполнителя. По мере увеличения концентрации заполнителя в композиционном материале упругие характеристики последнего снижаются, и тем сильнее, чем выше пористость цементного камня. Это снижение обусловлено большей разницей величин упругих показателей цементного камня и заполнителя. Подобные закономерности проявляются и в древесно-минеральных композитах с зернистым заполнителем, однако при использовании волокнистого заполнителя наблюдается различная степень влияния этих факторов на эффективные модули упругости в различных направлениях. Данные изменения наиболее отражаются на модулях упругости и сдвига, что объясняется низкими упругими показателями заполнителя в тангенциальном направлении.

Ключевые слова: эффективные свойства, древесно-цементные композиты, макроскопические постоянные.

Сравнение эффективных свойств древесно-цементных материалов, полученных в результате теоретических и экспериментальных исследований, показывает, что экспериментальные значения лежат ниже расчетных [1]. Это расхождение обусловлено тем, что древесно-цементные композиты содержат большое количество пор, которые существенно уменьшают его жесткостные и прочностные характеристики.

Определение эффективных свойств композиционных материалов на основе органического заполнителя и цементного вяжущего, ослабленного порами, проводится в два этапа. На первом этапе определяют макроскопические постоянные пористого цементного вяжущего, рассматривая поры как некоторый компонент с нулевыми модулями упругости. На втором этапе определяются макроскопические постоянные древесно-цементного материала по известным свойствам пористого цементного вяжущего и органического заполнителя.

Рассмотрим однонаправленный древесно-цементный материал с пористым изотропным вяжущим и трансверсально-изотропными частицами органического заполнителя, направленными вдоль оси x_1 (рис. 1).

Если рассматривать пористое цементное вяжущее как двухкомпонентный матричный композит с нулевой жесткостью включений, то, исходя из выражений для вычисления эффективных модулей объемного сжатия [1]

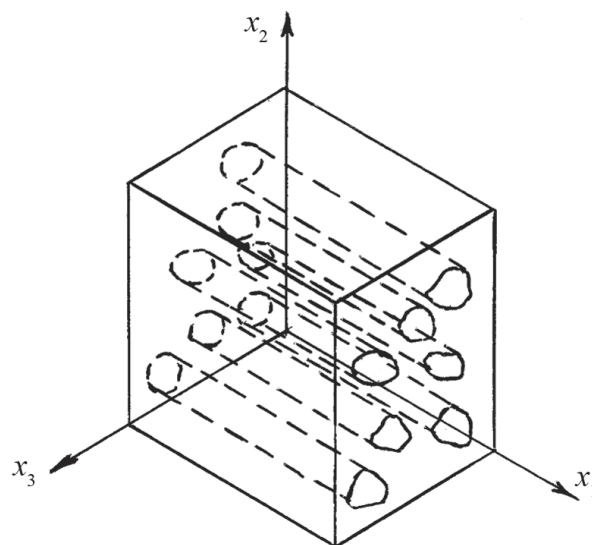


Рис. 1. Схема механической модели структуры древесно-цементного материала с однонаправленными (ориентированными) частицами

Fig. 1. Scheme of mechanical models of wood-cement material structure with unidirectional (oriented) particles

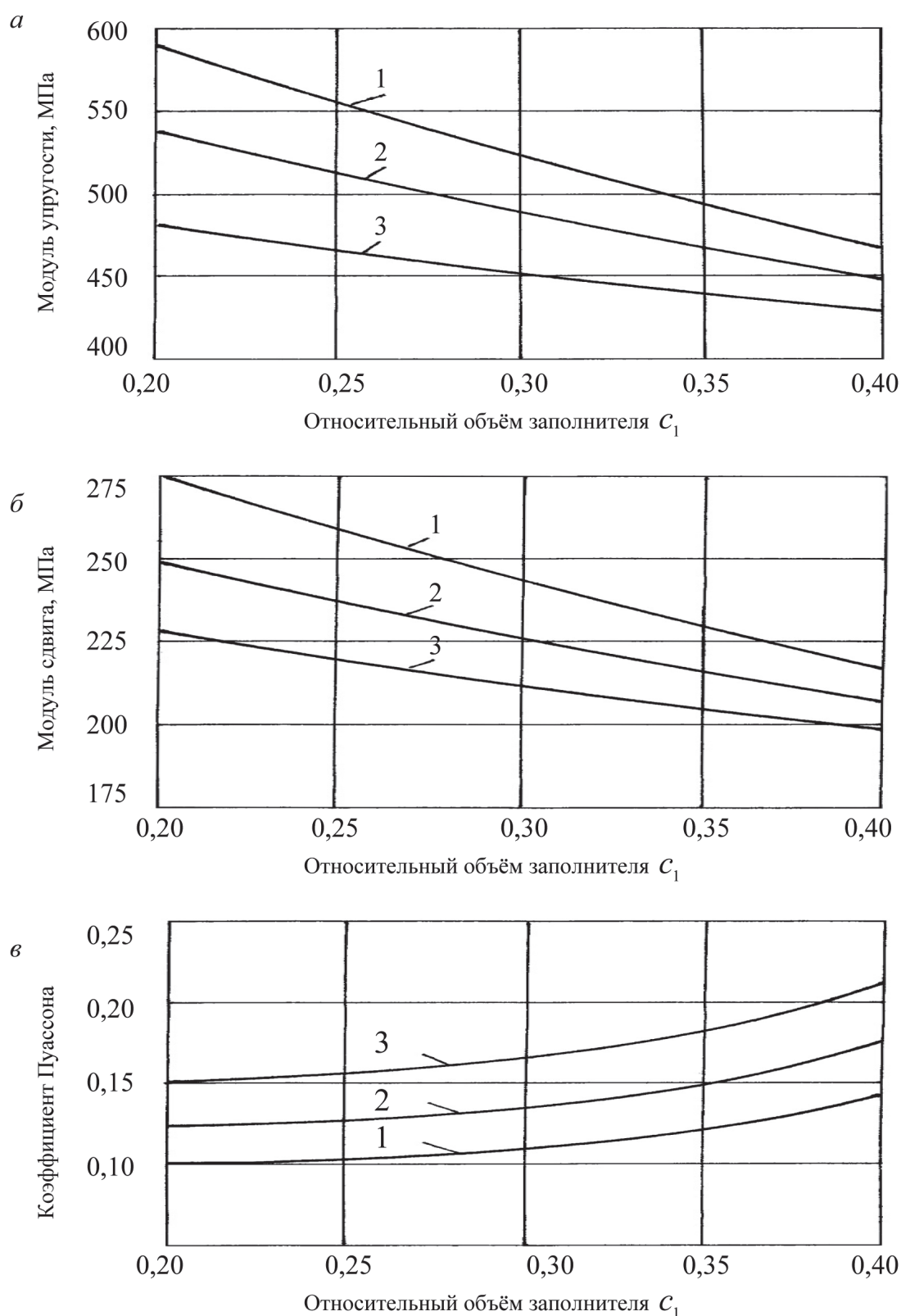


Рис. 2. Зависимость расчетных эффективных упругих постоянных: а – модуля упругости, б – модуля сдвига, в – коэффициента Пуассона древесно-цементного композита от относительного объема заполнителя C_1 при величине пористости: 1 – $p = 0,3$; 2 – $p = 0,4$; 3 – $p = 0,5$

Fig. 2. Dependence of calculated effective elastic constants: а – the modulus of elasticity, б – shear modulus, в – Poisson coefficient of wood-cement composite of the relative volume of the filler at a value C_1 porosity: 1 – $p = 0,3$; 2 – $p = 0,4$; 3 – $p = 0,5$.

$$K^* = \left(\sum_{v=1}^4 \frac{c_v}{K_v + \bar{K}} \right)^{-1} - \bar{K} \quad (1)$$

и сдвига

$$\mu^* = \left(\sum_{v=1}^4 \frac{c_v}{\mu_v + \bar{\mu}} \right)^{-1} - \bar{\mu}, \quad (2)$$

где обозначено

$$\bar{K} = \frac{4}{3} \mu_c; \quad \bar{\mu} = \frac{(9K_c + 8\mu_c)\mu}{6(K_c + 2\mu_c)}.$$

Также используем формулы для определения эффективных объемных модулей плоской деформации k^* поперечной m^* и продольной μ^* модули сдвига, продольный модуль Юнга E'^* , поперечный коэффициент Пуассона при растяжении вдоль волокон ν'^* и термические коэффициенты β_1^*, β_3^* [1]

$$\begin{aligned} k^* &= \langle k \rangle - \frac{c_1 c_2 (k^1 - k^2)^2}{c_1 k^2 + c_2 k^1 + m}; \\ m^* &= \langle m \rangle - \frac{c_1 c_2 (m^1 - m^2)^2}{c_1 m^2 + c_2 m^1 + \frac{mn}{n+2m}}; \\ \mu^* &= \langle \mu \rangle - \frac{c_1 c_2 (\mu^1 - \mu^2)^2}{c_1 \mu^2 + c_2 \mu^1 + s}; \\ E'^* &= \langle E' \rangle + \frac{4c_1 c_2 (\nu'^1 - \nu'^2)^2 k^1 k^2 m}{k^1 k^2 + \langle k \rangle m}; \\ \nu'^* &= \langle \nu \rangle + \frac{c_1 c_2 (\nu'^1 - \nu'^2)(k^1 - k^2)m}{k^1 k^2 + \langle k \rangle m}; \\ \beta_1^* &= \langle \beta_1 \rangle - \frac{c_1 c_2 (k^1 - k^2)(\beta_1^1 - \beta_1^2)}{c_1 k^2 + c_2 k^1 + m}; \\ \beta_3^* &= \langle \beta_3 \rangle - \frac{c_1 c_2 (2k^1 \nu'^1 - 2k^2 \nu'^2)(\beta_1^1 - \beta_1^2)}{c_1 k^2 + c_2 k^1 + m}; \end{aligned} \quad (3)$$

где m, n, s определяются по формулам (2.131) [1], а модули λ_{ij}^q и постоянные $k^q, m^q, \mu^q, \nu'^q, E'^q$ связаны соотношениями

$$\begin{aligned} \lambda_{11}^q &= k^q - m^q; \quad \lambda_{12}^q = k^q + m^q; \\ \lambda_{13}^q &= 2k^q \nu'^q; \\ \lambda_{33}^q &= E'^q + 4k^q (\nu'^q)^2; \quad \lambda_{44}^q = \mu^q. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $q = 1, 2, *$ соответственно для органического заполнителя, цементного вяжущего и древесно-цементного композита.

Получим зависимости эффективных модулей объемного сжатия K^* , сдвига μ^* , термического коэффициента напряжения β^* и коэффициента линейного температурного рас-

ширения α^* от пористости p для изотропного пористого цементного вяжущего

$$\begin{aligned} K^* &= \frac{4K_2 \mu_2 (1-p)^2}{4\mu_2 + (3K_2 - 4\mu_2)p}; \\ \mu^* &= \frac{(9K_2 + 8\mu_2)\mu_2 (1-p)^2}{9K_2 + 8\mu_2 - (3K_2 - 4\mu_2)p}; \\ \beta^* &= \frac{4\beta_2 \mu_2 (1-p)^2}{4\mu_2 + (3K_2 - 4\mu_2)p}; \quad \alpha^* = \alpha_2, \end{aligned} \quad (5)$$

где p – пористость цементного вяжущего;

$K^2, \mu^2, \beta^2, \alpha^2$ – модули объемного сжатия и сдвига, коэффициент термического напряжения и линейного температурного расширения затвердевшего цементного вяжущего.

Если перейти к модулям Юнга E^*, E_2 и коэффициентам Пуассона ν^*, ν_2 , то зависимости будут

$$\begin{aligned} E^* &= E_2 \frac{(1-p)^2}{1+n_2 p}; \quad \nu^* = \frac{\nu_2 + m_2 p}{1+n_2 p}; \\ n_2 &= \frac{(5\nu_2 - 1)(1-3\nu_2)}{2(7-5\nu_2)}; \\ m_2 &= \frac{(1-5\nu_2)(3-\nu_2)}{2(7-5\nu_2)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Согласно (5), эффективные термоупругие постоянные пористого изотропного цементного вяжущего определяются формулами

$$\begin{aligned} K_{2p} &= \frac{4(1-p)^2 K_2 \mu_2}{3pK_2 + 4(1-p)\mu_2}; \\ \mu_{2p} &= \frac{(1-p)^2 \mu_2 (9K_2 + 8\mu_2)}{9K_2 + 8\mu_2 - (3K_2 - 4\mu_2)p}; \\ \lambda_{2p} &= K_{2p} - \frac{2}{3} \mu_{2p}; \\ \beta_{2p} &= \frac{4(1-p)^2 \beta_2 \mu_2}{3pK_2 + 4(1-p)\mu_2}. \end{aligned} \quad (7)$$

В случае, когда частицы органического заполнителя являются трансверсально-изотропными с плоскостью изотропии $x_1 x_2$, зависимости между макронапряжениями, макродеформациями и температурой в пористом древесно-цементном материале имеют вид

$$\begin{aligned} \langle \sigma_{kl} \rangle &= \lambda_{12}^* \langle \varepsilon_{rr} \rangle \delta_{kl} + \lambda_{13}^* \langle \varepsilon_{33} \rangle \delta_{kl} + \\ &+ 2\lambda_{66}^* \langle \varepsilon_{kl} \rangle - \beta_1^* \theta \delta_{kl}; \\ \langle \sigma_{33} \rangle &= \lambda_{13}^* \langle \varepsilon_{rr} \rangle + \lambda_{33}^* \langle \varepsilon_{33} \rangle - \beta_3^* \theta; \\ \langle \sigma_{k3} \rangle &= 2\lambda_{44}^* \langle \varepsilon_{k3} \rangle; \\ (k, l, r) &= (1, 2), \end{aligned} \quad (8)$$

а эффективные постоянные определяются по формулам

$$\begin{aligned} \lambda_{11}^* + \lambda_{12}^* &= c_1 \langle \lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1 \rangle + 2c_{2p}(\lambda_{2p} + \mu_{2p}) - \\ &\quad - \frac{c_1 c_{2p} [\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1 - 2(\lambda_{2p} + \mu_{2p})]^2}{2c_1(\lambda_{2p} + \mu_{2p}) + c_{2p}(\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) + 2m}; \\ \lambda_{11}^* - \lambda_{12}^* &= c_1(\lambda_{11}^1 - \lambda_{12}^1) + 2c_{2p}\mu_{2p} - \\ &\quad - \frac{c_1 c_{2p} (\lambda_{11}^1 - \lambda_{12}^1 - 2\mu_{2p})^2}{2c_1\mu_{2p} + c_{2p}(\lambda_{11}^1 - \lambda_{12}^1) + 2l}; \\ \lambda_{13}^* &= c_1\lambda_{13}^1 + c_{2p}\lambda_{2p} - \\ &\quad - \frac{c_1 c_{2p} (\lambda_{13}^1 - \lambda_{2p}^1) [\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1 - 2(\lambda_{2p} + \mu_{2p})]}{2c_1(\lambda_{2p} + \mu_{2p}) + c_{2p}(\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) + 2m}; \\ \lambda_{33}^* &= c_1\lambda_{33}^1 + c_{2p}(\lambda_{2p} + 2\mu_{2p}) - \\ &\quad - \frac{2c_1 c_{2p} (\lambda_{13}^1 - \lambda_{2p}^1)^2}{2c_1(\lambda_{2p} + \mu_{2p}) + c_{2p}(\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) + 2m}; \\ \lambda_{44}^* &= c_1\lambda_{44}^1 + c_{2p}\mu_{2p} - \frac{c_1 c_{2p} (\lambda_{44}^1 - \mu_{2p}^1)^2}{c_1\mu_{2p} + c_{2p}\lambda_{44}^1 + s}; \\ \beta_1^* &= c_1\beta_1^1 + c_{2p}\beta_{2p} - \\ &\quad - \frac{c_1 c_{2p} [\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1 - 2(\lambda_{2p} + \mu_{2p})] (\beta_1^1 - \beta_{2p}^1)}{2c_1(\lambda_{2p} + \mu_{2p}) + c_{2p}(\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) + 2m}; \\ \beta_3^* &= c_1\beta_3^1 + c_{2p}\beta_{2p} - \\ &\quad - \frac{2c_1 c_{2p} (\lambda_{13}^1 - \lambda_{2p}^1) (\beta_1^1 - \beta_{2p}^1)}{2c_1(\lambda_{2p} + \mu_{2p}) + c_{2p}(\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) + 2m}, \quad (9) \end{aligned}$$

где c_1 , λ_{mn}^1 , β_m^1 – объемное содержание, упругие модули и коэффициенты термических напряжений частиц органического заполнителя;

c_{2p} , λ_{2p} , μ_{2p} , β_{2p} – объемное содержание и эффективные постоянные Ламе, коэффициент термического напряжения пористого цементного вяжущего, определяемые по формулам (6), причем при жесткости цементного вяжущего больше жесткости частиц органического заполнителя следует принимать

$$\begin{aligned} 2m &= c_1(\lambda_{11}^1 - \lambda_{12}^1) + 2c_{2p}\mu_{2p}; \\ 2n &= c_1(\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) + 2c_{2p}(\lambda_{2p} + \mu_{2p}); \\ s &= c_1\lambda_{44}^1 + 2c_{2p}\mu_{2p}; \quad l = \frac{nm}{n + 2m}. \quad (10) \end{aligned}$$

На основе полученных формул были исследованы зависимости упругих постоянных пористого древесно-цементного матери-

ала от объемного содержания частиц заполнителя c_1 для различных значений пористости цементного вяжущего p . Численный анализ был проведен для древесно-цементных композитных материалов на основе древесного заполнителя с

$E_1 = 6,0$ ГПа; $\mu_1 = 2,2$ ГПа; $\nu_1 = 0,35$ (11)
цементного камня с

$E_2 = 40,0$ ГПа; $\nu_2 = 0,2$. (12)

Объемное содержание компонентов в древесно-цементном композите изменялось в интервалах

$0,3 \leq p \leq 0,5$, $0,2 \leq c_1 \leq 0,4$. (13)

На рис. 2 приведены зависимости модулей Юнга E^* , модулей сдвига μ^* коэффициентов Пуассона ν^* от относительного объемного содержания частиц заполнителя c_1 в композите для различных значений пористости цементного вяжущего p ($1 - p = 0,3$; $2 - p = 0,4$; $3 - p = 0,5$).

Анализ графиков, представленных на рис. 2, показывает, что по мере увеличения концентрации заполнителя в композиционном материале упругие характеристики последнего снижаются, и тем сильнее, чем выше пористость цементного камня. Это снижение обусловлено большей разницей величин упругих показателей цементного камня и заполнителя.

Подобные закономерности проявляются и в древесно-минеральных композитах с зернистым заполнителем, однако при использовании волокнистого заполнителя наблюдается различная степень влияния этих факторов на эффективные модули упругости в различных направлениях. Данные изменения наиболее отражаются на модулях упругости E^* и сдвига μ^* , что объясняется низкими упругими показателями заполнителя в тангенциальном направлении.

Библиографический список

1. Запруднов, В.И. Трехслойные конструкции с древесно-цементными теплоизоляционными слоями / В.И. Запруднов. – М.: МГУЛ, 2006. – 322 с.
2. Запруднов, В.И. Зависимость упругих постоянных древесно-цементного материала от объемного содержания компонентов / В.И. Запруднов // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2015. – № 1. – Том 19. – С. 21 – 24.
3. Запруднов, В.И. Эффективные свойства древесно-цементных композитов / В.И. Запруднов // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2013. – № 5(97). – С. 203–205.

4. Запруднов, В.И. Методы расчета и прогнозирования прочности и деформации древесно-минерального композита / В.И. Запруднов, А.С. Щербаков // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2012. – № 4(87). – С. 97–99.
5. Ванин, Г.А. Статистическая теория волокнистых сред / Г.А. Ванин // Механика композит. материалов. – 1982. – № 6. – С. 1043–1050.
6. Хорошун, Л.П. Прогнозирование эффективных свойств пьезоактивных композитных материалов / Л.П. Хорошун, Б.П. Маслов, П.В. Лещенко. – Киев: Наук. думка, 1989. – 206 с.
7. Эшелби, Дж. Континуальная теория дислокаций / Дж. Эшелби. – М.: Изд-во иностр. лит., 1983. – 248 с.
8. Щербаков, А.С. Прочность и деформации древесно-цементного композита / А.С. Щербаков, В.И. Запруднов // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2013. – № 5(97). – С. 200–203.
9. Санаев, В.Г. Описание деформаций и микроразрушений в условиях упруговязкопластической среды / В.Г. Санаев, Б.М. Рыбин, В.И. Запруднов // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2012. – № 3(86). – С. 92–96.

INFLUENCE OF THE POROUS CEMENT ROCK ON WOOD-CEMENT MATERIAL PROPERTIES

Zaprudnov V.I., Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾

zaprudnov@mgul.ac.ru

⁽¹⁾Moscow State Forest University (MSFU) 1st Institutskaya St., 1, 141005, Mytischki, Moscow Region, Russia

The comparison of wood-cement materials' effective properties obtained as the result of theoretical and practical research show that experimental results lay lower than the theoretical ones. This difference is based on wood-cement composition materials' porosity, which sufficiently decreased their strength and stiffness performance. The determination of the effective properties of composition materials made of organic filling and the cement and weaken by pore spaces is made in two steps. At the first step, we determine the porous cement material macroscopic constants, considering the pore spaces as some component with zero elastic modulus. At the second step, we find the macroscopic constants of wood-cement material, using already known porous cement binder and organic filler properties. With the increase of filler concentration in the composite material, its elastic response decrease. More pore space in the cement rock causes more strength decrease. This can be explained by greater difference of cement and filler's elastic factors. The same rules appear also in wood-mineral composition materials based on granular filler. However, if fibrous filler is used, the different degree of impact of these factors on efficient elastic modules in various dimensions can be noticed. These changes mostly influent the elastic and transverse modulus and this can be explained by low elastic characteristics of the filler at tangential dimension.

Keywords: effective properties, wood-cement composition material, macroscopic constants.

References

1. Zaprudnov V.I. *Trekhslonnye konstruksii s drevesno-tsementnymi teploizolyatsionnymi sloyami* [Three-Ply Constructions with Wood-Cement with heat-insulating layers]. Moscow: MSFU, 2006. 322 p.
2. Zaprudnov V.I. *Zavisimost' uprugikh postoyannykh drevesno-tsementnogo materiala ot ob'emnogo sodержaniya komponentov* [Dependence of Wood-Cement material elastic constants on volumetric component share]. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik, 2015, № 1, Vol. 19, pp. 21-24.
3. Zaprudnov V.I. *Effektivnye svoystva drevesno-tsementnykh kompozitov* [Wood-Cement Composition Materials Effective Properties]. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik, 2013, № 5(97), pp. 203-205.
4. Zaprudnov V.I., Shcherbakov A.S. *Metody rascheta i prognozirovaniya prochnosti i deformatsii drevesno-mineral'nogo kompozita* [Calculation and Forecasting Methods of Strength and Deformation of Wood-Cement Composition Materials]. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik, 2012, № 4(87), pp. 97-99.
5. Vanin G.A. *Statisticheskaya teoriya voloknistykh sred* [Statistic Theory of Fibrous Structure]. Composition Materials Mechanics. 1982, № 6, pp. 1043-1050.
6. Khoroshun L.P., Maslov B.P., Leshchenko P.V. *Prognozirovaniye effektivnykh svoystv p'ezoaktivnykh kompozitnykh materialov* [Piezoelectric Composition Materials Effective Properties Forecasting]. Kiev, Scientific Mind, 1989, 206 p.
7. Eshelbi Dzh. *Kontinual'naya teoriya dislokatsiy* [Continual Dislocation Theory]. Moscow: Foreign Literature Publishing House, 1983, 248 p.
8. Shcherbakov A.S., Zaprudnov V.I. *Prochnost' i deformatsii drevesno-tsementnogo kompozita* [Strength and Deformation of Wood-Cement Composition Material]. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik, 2013, № 5(97), pp. 200-203.
9. Sanaev V.G., Rybin B.M., Zaprudnov V.I. *Opisanie deformatsiy i mikrorazrusheniy v usloviyakh uprugovязkoplasticheskoy sredy* [Description of Deformation and Micro Destruction at Elastoviscoplastic Structure]. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik, 2012, № 3(86), pp. 92-96.