Дляцитирования: *Инжутов И.С., Мезенцев В.В., Рожков А.Ф., Хованский М.Е. Напряженно-деформированное состояние шпренгельной подкрановой балки. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (3):156-164. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-3-156-164*
For citation: *Inzhutov I.S., Mezentsev V.V., RozhkovA.F., Hovanskiy M.E. The calculation of wooden constructions taking into account the creep of wood on the example of a statically indeterminate lenticular blocked truss. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44 (3):156-164. (In Russ.) DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-3-156-164*

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.074
DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-3-156-164

УЧЕТ ПОЛЗУЧЕСТИ ДРЕВЕСИНЫ В РАСЧЕТАХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ПРИМЕРЕ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМОЙ ЛИНЗООБРАЗНОЙ БЛОК-ФЕРМЫ

Инжутов И.С.[1], Мезенцев В.В.[4], Рожков А.Ф.[2], Хованский М.Е.[3]
[1-4]Сибирский Федеральный университет,
660000, г. Красноярск, Свободный проспект, 79, Россия,
[1]e-mail:i.s.i.sfu@mail.ru,[2]e-mail:89994433191@yandex.ru,
[3]e-mail:maximko222@mail.ru,[4]e-mail:Vladslav.Mezentsev@yandex.ru

Резюме. Цель*. Целью исследования является уточнение расчета деревянных конструкций, а именно использование в расчете по второй группе предельного состояния переменного модуля упругости для более точного прогноза прогибов.* ***Метод.*** *Исследование проводилось по методике учета ползучести на основе использования в расчетах переменного модуля упругости или «модуля полных деформаций», в величине которых помимо упругих, учитываются остаточные деформации, доля которых увеличивается по мере возрастания уровня напряжений в деревянных элементах.* ***Результат.*** *Произведен расчет статически неопределимой пространственной деревометаллической линзообразной блок-фермы, загруженной равномерно распределенной нагрузкой. На первом этапе конструкция была рассчитана с модулем упругости всех деревянных элементов E= 10000 МПа в соответствии со сводом правил (СП 64.13330.2011 (актуализированная редакция СНиП II-25-80).*

На втором этапе модуль упругости был заменен на переменный, то есть, подобран в зависимости от уровня напряжений в элементах с помощью интерполяции. Полученные значения прогибов проанализированы и сопоставлены с предельным значением для данной конструкции. Исследование проводилось без учета податливости узловых соединений и пороков древесины, что также может оказать существенное влияние на значение прогиба. ***Вывод.*** *Использование переменного модуля упругости в расчетах существенным образом влияет на величину прогибов (в нашем случае увеличение составило 30%). Исследование подтверждает необходимость учета ползучести древесины и уточнения расчетов деревянных конструкций. Данная аппроксимирующая зависимость при разных уровнях влажности древесины позволит производить расчеты деревянных конструкций на более высоком теоретическом уровне.*

Ключевые слова: *ползучесть древесины, расчет деревянных конструкций, большепролетные конструкции, длительный модуль упругости, прогиб*

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

THE CALCULATION OF WOODEN CONSTRUCTIONS TAKING INTO ACCOUNT THE CREEP OF WOOD ON THE EXAMPLE OF A STATICALLY INDETERMINATE LENTICULAR BLOCKED TRUSS

Ivan S. Inzhutov[1], Vladislav V.Mezentsev[4], Alexander F. Rozhkov[2], Maxim E.Khovansky[3]
[1-4]Siberian Federal University,
[1-4]79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia,
[1]e-mail: i.s.i.sfu@mail.ru, [2]e-mail:89994433191@yandex.ru,
[3]e-mail:maximko222@mail.ru, [4]e-mail:Vladslav.Mezentsev@yandex.ru

Abstract Objectives *The aim of the study is to refine the calculation of wooden constructions, in particular, to use variable elastic modulus for the calculation of the second group of the limiting state in order to predict the deformations more accurately.* ***Methods*** *The study is carried out using the method of creep consideration based on the use of either variable elastic modulus or the "modulus of total deformations" for the calculations. These moduli, besides the elastic, account for residual deformations, while the fraction of the latter increases with increasing stress levels in the wooden elements.* ***Results*** *The calculation of statically indeterminate spatial timber-metallic lenticular block-truss loaded with a uniformly distributed load is carried out. At the first stage, the construction was calculated using the elastic modulus of all wooden elements E = 10000 MPa in accordance with the set of rules (SP 64.13330.2011 (updated version of SNiP II-25-80). At the second stage, the elastic modulus was replaced by variable, i.e., matched to the level of stresses in the elements by means of interpolation. The obtained deflection values are analysed and compared to the construction limiting value. The study was conducted without taking into account the flexibility of node connections and defects of the wood, which can also have a significant effect on the deflection value.* ***Conclusion*** *The use of a variable elastic modulus for calculations significantly influences the magnitude of deformations (in our case, deflections are increased by 30%). The study confirms the need to take into account the creep of wood and refine the calculations of wooden structures. Such approximating dependence at different moisture levels of wood will allow the calculation of wooden structures to be performed at a higher theoretical level.*

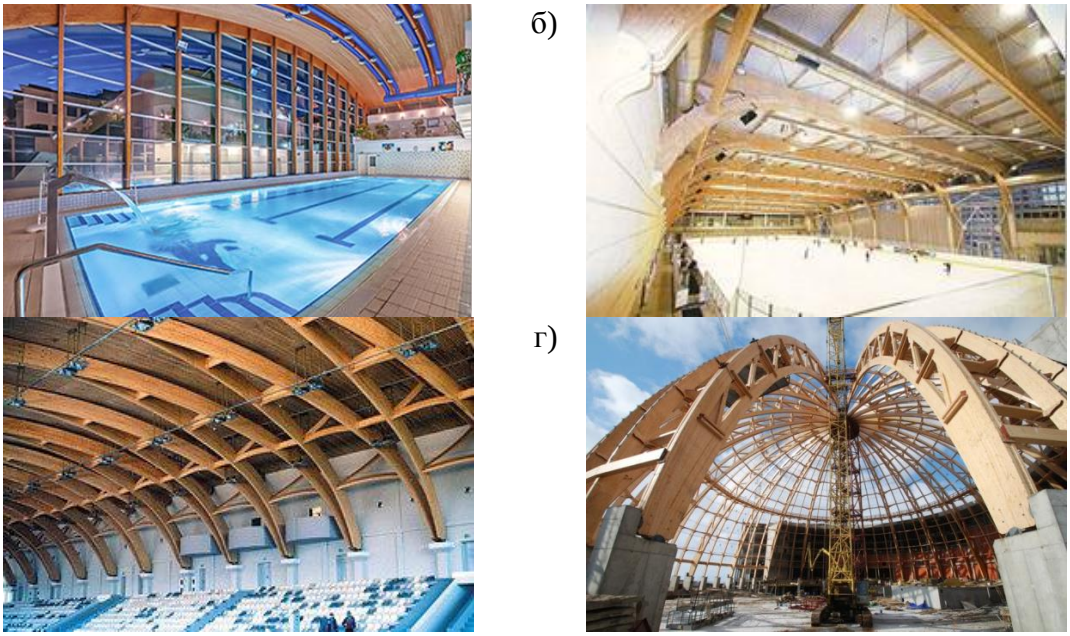
Keywords: *wood creep, calculation of wooden constructions, large-span constructions, long-term elastic modulus, deflection*

Введение. В настоящее время в России все больше наращиваются объемы строительства сооружений с большепролетными покрытиями на основе древесины. Основная область применения большепролетных клееных деревянных конструкций (БКДК) сегодня – здания спортивно-зрелищного назначения (ледовые арены, конноспортивные манежи, аквапарки, бассейны, спортивные комплексы и т.д.) (рис.1).

За последние годы построены десятки спортивных сооружений с применением БКДК, пролет которых составляет до 100 м. С ростом пролета их преимущество в сравнении с традиционными плоскостными конструкциями из других материалов существенно возрастает. Это обусловлено малым объемным весом клееных деревянных конструкций, повышенной огнестойкостью, высокой химической стойкостью и малой теплопроводностью.

Применение БКДК, помимо конструктивных качеств, связано с созданием благоприятного микроклимата во внутреннем пространстве, возможностью реализации разнообразных архитектурных форм, а также архитектурной выразительностью.

а) б)



в) г)

Рис.1. Примеры применения большепролетных клееных деревянных конструкций в России
Fig.1. Examples of the use of large-span glued wooden structures in Russia
а) Трехшарнирные арки спорткомплекса пансионата «Буран» (Сергиево-Посадский р-н, Московская обл.);
б) Бесшарнирные сборные большепролетные рамы с подкосами Дворца спорта «Янтарь» (р-н Строгино, г. Москва)
в) Пересекающиеся арки пролетом 42 м спортивного манежа «Подмосковье» (г. Щелково, Московская обл.)
г) Каркас ребристого купола аквапарка Piterland (г. Санкт-Петербург)

Особый интерес представляют пространственные деревянные конструкции, занимающие ведущее положение среди легких строительных конструкций.

К основным преимуществам пространственных деревянных конструкций над плоскими конструкциями можно отнести: ремонтопригодность; легкость; перераспределение усилий (в трех направлениях); способность выполнять одновременно несущую и ограждающую функции; имеют многообразные формы для различного функционального назначения.

В инженерной практике широкое использование получили деревометаллические блок-фермы.

В основу их формообразования заложен принцип блокировки плоскостных конструкций элементами ограждения, некоторым образом реализующий идею сплачивания по ширине поперечного сечения (а не по его высоте, как в плоскостных конструкциях).

В результате этого основным конструктивным элементом блочных конструкций являются крупноразмерные плиты с деревянными каркасами и обшивками из фанеры, плоских или профилированных металлических или асбестоцементных листов. Благодаря такому укрупнению элементов, по сравнению с традиционными плоскостными конструкциями, в блочных конструкциях обеспечивается возможность использования пиломатериалов с небольшими размерами поперечных сечений, а также ускорение возведения зданий.

Вследствие блокировки оказывается возможным вовлечь в совместную работу все элементы конструкции, обеспечив ее некоторую пространственность и рациональность расходования материалов.

Исследованиями и опытно-конструкторскими разработками в данной области занимались такие ученые, как Н.П. Абовский, Л.В. Енджиевский, И.С. Инжутов, П.А. Дмитриев, С.В. Деордиев, В.И. Жаданов, Р.Б. Орлович, и др.

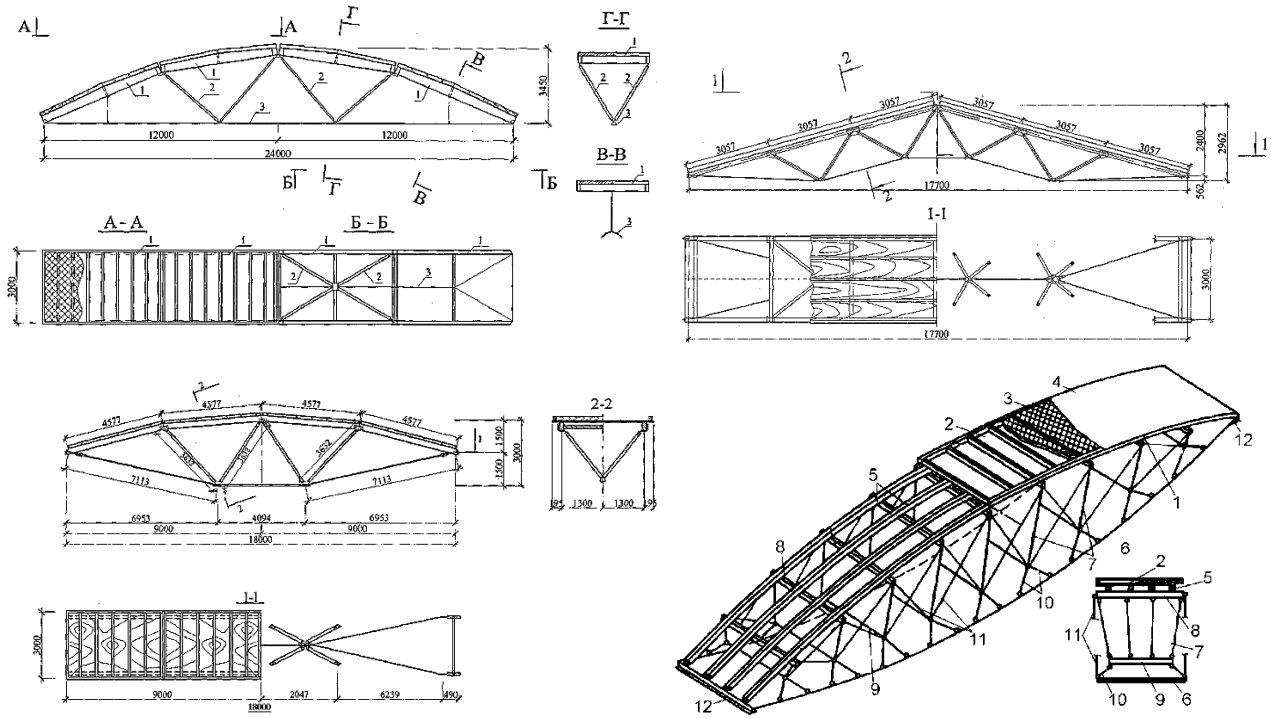


Рис. 2.Примеры конструкторских разработок блочных конструкций покрытий (блок-ферм)
Fig. 2. Examples of design developments of block constructions of coatings (block farms)

Ведущими научно-исследовательскими институтами, проектными и учебными заведениями проводились теоретические и экспериментальные исследования различных комбинированных на основе древесины пространственных конструкций покрытий.

Однако существуют объективные причины, сдерживающее более широкое применение БКДК в строительной индустрии.

К этим причинам можно отнести недостаточную оценку ползучести древесины при проектировании, следствием чего является неточный прогноз прогибов изгибаемых деревянных элементов при действии длительной нагрузки.

Известно, что в процессе эксплуатации происходит изменение физико-механических свойств древесины. Эта проблема достаточно подробно изучена в трудах К.П. Пятикрестовского, В.И. Травуша, Е.Н. Серова, Д.К. Арленинова и др. [4,6,8-17]. Но до сих пор малоизученным остается вопрос влияния уровня напряжений на рост ползучести древесины, а также отсутствует конкретная методика по расчету в нормативной литературе.

Постановка задачи. Целью данного исследования является уточнение расчета деревянных конструкций, а именно использование в расчете по второй группе предельного состояния переменного модуля упругости для более точного прогноза прогибов.

Модуль упругости или модуль Юнга – величина, характеризующая сопротивление материала растяжению/сжатию при упругой деформации, или свойство объекта деформироваться вдоль оси действия силы. Выражается из закона Гука и определяется, как отношение напряжения к деформации сжатия (удлинения)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \qquad (1)$$

В современной нормативной литературе по проектированию деревянных конструкций [7] рекомендуется при расчетах по второй группе предельного состояния применять E = 10000 МПа; по первой группе – E = 300R, т.е. 3900 МПа.

Такой разброс в значениях модуля упругости обусловлен тем, что при использовании «модуля деформаций» (3900 МПа) в расчетах по обеим группам предельного состояния деревянные конструкции становятся неконкурентными металлическим и железобетонным. В теории расчета железобетонных конструкций [5] имеется направление, учитывающее реологические свойства бетона в линейной, но неравновесной постановке, т.е. с учетом запаздывания деформаций, влияния режима и длительности загружения.

Согласно данному направлению ползучесть бетона может учитываться в линейных расчетах с помощью замены начального модуля упругости бетона некоторым, уменьшающимся во времени вследствие ползучести, т.е. «модулем деформации» бетона. Такой подход учета реологических свойств материала при определении деформативности изгибаемых и сжато-изгибаемых элементов в линейной постановке вполне приемлем при расчете деревянных конструкций.

Методы исследования. Основываясь на этом в работах [1-3] предложена методика учета ползучести, в которой, используя линейно-степенную зависимость между напряжением и относительными деформациями, а также экспериментальные данные по оценке ползучести древесины, при напряжениях, не превышающих расчетное сопротивление в работе на сжатие и изгиб, рекомендуется для расчета деревянных конструкций, в первую очередь статически неопределимых стержневых систем, использовать переменный модуль упругости, а точнее «*модуль полных деформаций*», в величине которых помимо упругих учитываются остаточные деформации, доля которых увеличивается по мере возрастания уровня напряжений в деревянных элементах. В таблице 1 приведена зависимость переменного модуля упругости от уровня напряжений в деревянных элементах.

Таблица 1.Зависимость переменного модуля упругости от уровня напряжений [2]
Table 1. Dependence of the variable modulus of elasticity on the stress level [2]

Напряжения, МПа	≤ 5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0
E, МПа	10000	9200	8300	7400	6500	5600	5000	4400	3900

В работе [2] приведен пример расчета статически определимой балки с учетом ползучести, нагруженной двумя сосредоточенными силами.

Обсуждение результатов. Нами в качестве примера приведен расчет статически неопределимой пространственной деревометаллической линзообразной блок-фермы, загруженной равномерно распределенной нагрузкой. Расчет производился с применением программного комплекса SCAD 21.1. Проекция блок-фермы представлена на рис. 3

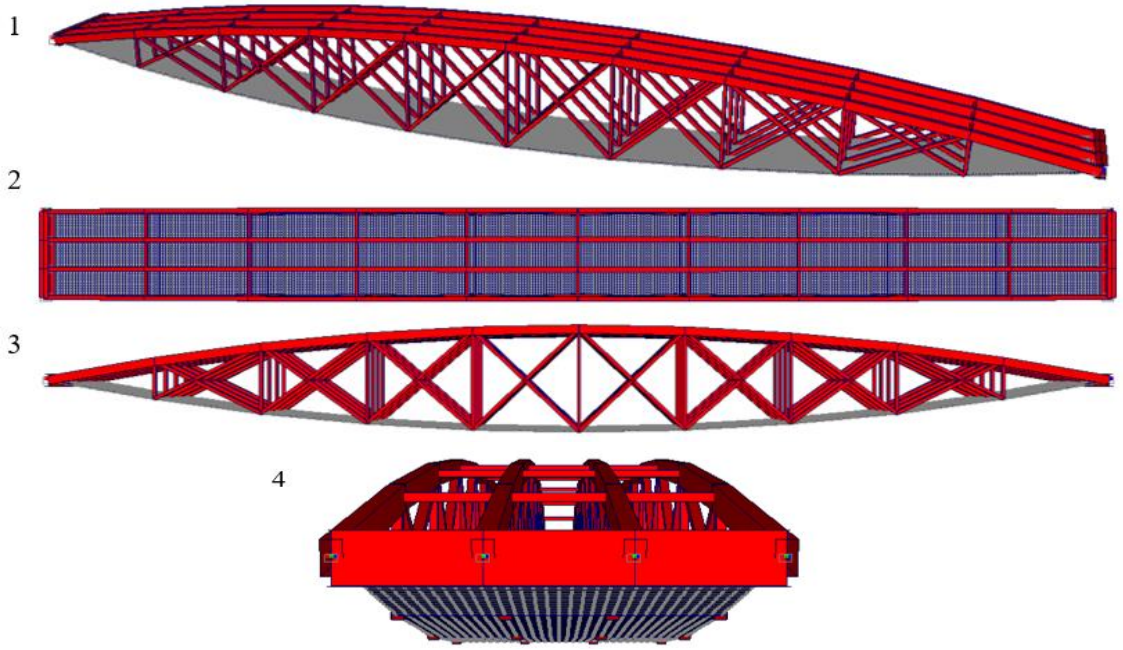


Рис.3. Проекции блок-фермы
1 – диаметрия; 2 – вид сверху; 3 – вид спереди; 4 – вид сбоку
Fig.3. Block farm projections
1 - the diameter; 2 is a plan view; 3 is a front view; 4 is a side view

Нижний пояс (затяжка) – стальная пластина толщиной 0,7 мм (тип элемента 44 – 4-х угольный КЭ оболочки); верхний – клееный брус 150х150 мм, стойки и раскосы – из цельной

древесины сечением 75 и 35 мм соответственно (тип элементов 5 – пространственный стержень). Пролет блок-фермы – 36 м.

Расчетная схема блок-фермы представлена на рис. 4.

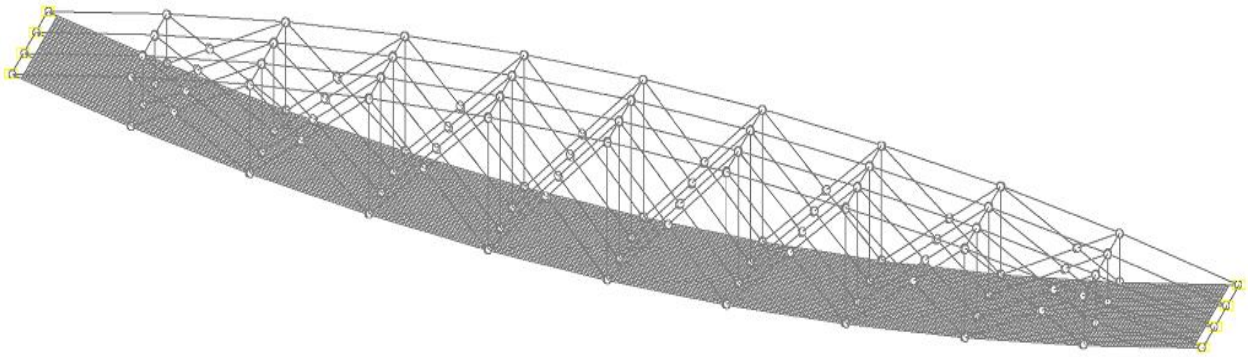


Рис.4.Расчетная схема линзообразной блок-фермы
Fig.4. Calculation scheme of lenticular block-truss

На первом этапе конструкция была рассчитана с модулем упругости всех деревянных элементов E = 10000 МПа в соответствие с СП [7]. При расчете конструкции на статическую нагрузку максимальный прогиб в середине пролета составил 63 мм, что меньше предельного

$$f = l/300 = 36000/300 = 120 \text{ мм}. \quad (2)$$

На рис.5 представлены изополя и изолинии перемещений по оси Z.

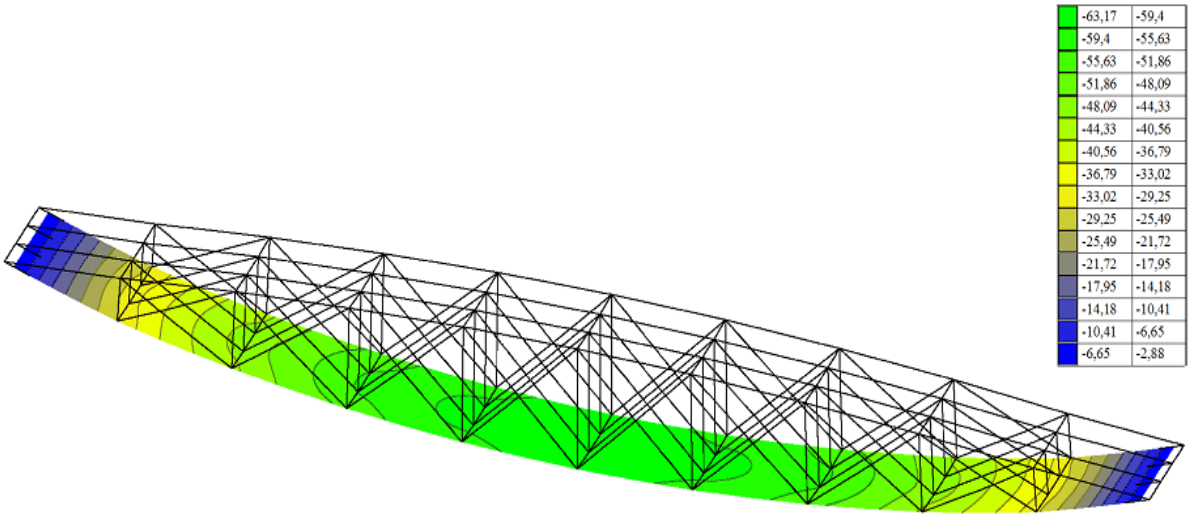


Рис. 5. Изополя и изолинии перемещений по оси Z, мм
Fig. 5. Isopoles and isolines of displacements along the Z axis, mm

На втором этапе модуль упругости был заменен на переменный, то есть, подобран в соответствие с таблицей 1 в зависимости от уровня напряжений в элементах с помощью интерполяции. Для верхнего сжато-изгибаемого пояса, напряжение в котором близко к расчетному сопротивлению и равно 12,15 МПа, переменный модуль упругости составил 4325 МПа; в стойках – 8532 МПа; в раскосах – 9291 МПа.

С учетом этих изменений прогиб конструкции в середине пролета изменился на 27 мм и составил 90 мм. На рис. 6 представлены изополя и изолинии перемещений по оси Z.

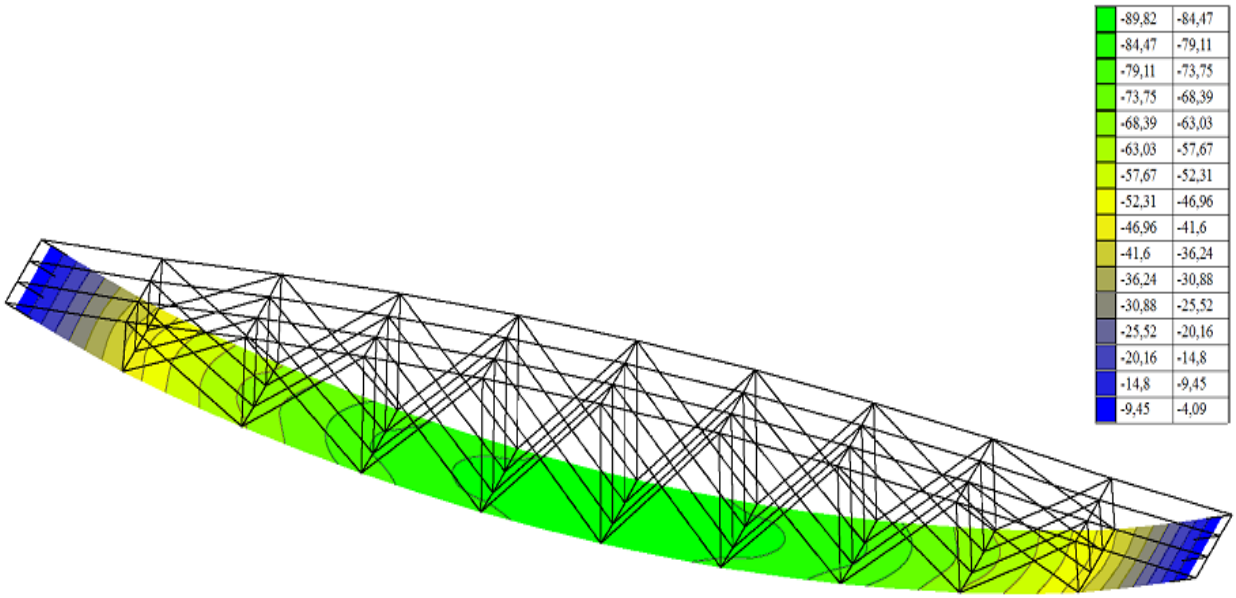


Рис. 6.Изополя и изолинии перемещений по оси Z, мм
Fig. 6. Isopoles and isolines of displacements along the Z axis, mm

На рис. 7 представлена гистограмма для сопоставления результатов расчетов по второй группе предельного состояния: с нормативным и переменным модулем упругости.

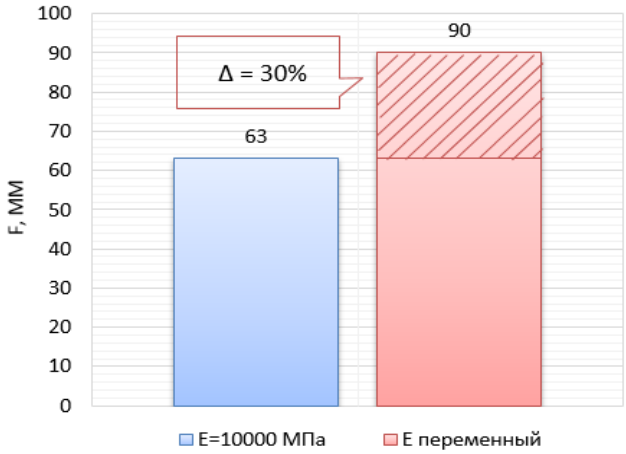


Рис. 7. Сопоставление полученных результатов
Fig.7. Comparison of the results obtained

Анализируя представленную гистограмму, можно сделать вывод, что использование переменного модуля упругости в расчетах существенным образом влияет на величину прогибов (в нашем случае увеличение составило 30%).

Вывод. Результаты проведенного исследования подтверждают необходимость учета ползучести древесины и уточнения расчетов деревянных конструкций.

Аппроксимирующая зависимость при разных уровнях влажности древесины позволит производить расчеты деревянных конструкций на более высоком теоретическом уровне.

Полученный прогиб конструкции не превысил предельного значения. Однако в нашем исследовании не учитывается податливость узловых соединений, пороки древесины, что также окажет существенное влияние на значение прогиба. Поэтому в дальнейшем нами будет предусмотрено устройство управления напряженно-деформированным состоянием данной конструкции.

Библиографический список:

1. Арленинов Д.К., Арленинов П.Д. Переменный модуль упругости древесины. Вестник МГСУ, 2011,2(1), 150-152.
2. Арленинов Д.К. Инженерный метод учета ползучести древесины при определении прогибов. Вестник МГСУ, 2011,2(1), 147-149.
3. Арленинов Д.К., Беккер Д.А. Влияние уровня напряжений на ползучесть древесины при изгибе. Лесной журнал, 2015,(6), 128-137.
4. Пятикрестовский К.П., Травуш В.И. О программировании нелинейного метода расчета деревянных конструкций.Academia. Архитектура и строительство, 2015,(2), 117-121.
5. Бондаренко В.М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона. Харьков: Издательство Харьковского университета, 1968. 323 с.
6. Рожков А.Ф. Управляемые блок-секции с предварительно напряженными деревянными элементами. Дисс. канд. техн. наук. Красноярск, 2006. 191 с.
7. СП 64.13330.2011 (актуализированная редакция СНиП II-25-80) «Деревянные конструкции» (утвержден приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 28 декабря 2010 г. № 826) // ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, ОАОНИЦ «Строительство», 20.05.2011.
8. Javier Estévez. Timberspatial trussesusinghollowbars // Internationales Holzbau-Forum 11 –Germany, 2011.
9. Peter R. Smith The behaviour of traditional timber roof framing in domestic buildings // Architectural Science Review – Australia, 2011.
10. Milan Šmak, Jan Barnat. Dowelled joints in timber structures. Experiment–design–realization // Wood Research – Slovakia, 2016.
11. Kaziolas D.N., Zygomalas I., G.E. Stavroulakis& C.C. Baniotopoulos. LCA of timber and steel buildings with fuzzy variables uncertainty quantification // European Journal of Environmental and Civil Engineering – UK, 2016.
12. Saulius Kavaliauskas ,Audronis Kazimieras Kvedaras&Kestutis Gurkšnys. Evaluation of long-term behaviour of composite timber-concrete structures according to EC // UkioTechnologinisirEkonominisVystymas – Lithuania, 2010.
13. Huifeng Yang, Dongdong Ju, Weiqing Liu, Weidong Lu, Prestressed glulam beams reinforced with CFRP bars // Construction and Building Materials, 2016.
14. Akyildiz M.H. Screw-nail withdrawal and bonding strength of paulownia (Paulownia tomentosaSteud.) wood. // Journal of Wood Science – Japan, 2014.
15. Ryuya Takanashi, Kei Sawata, Yoshihisa Sasaki, Akio Koizumi. Withdrawal strength of nailed joints with decay degradation of wood and nail corrosion // Journal of Wood Science – Japan, 2016.
16. Barcik S., Gasparik, M., Horejs. P. Influence of Thermal Modification on Nail Withdrawal Strength of Spruce Wood // Bioresources – USA, 2014.
17. Smith Tobias. Post-tensioned Timber Frames with Supplemental Damping Devices // University of Canterbury – New Zealand, 2014.

References:

1. Arleninov D.K., Arleninov P.D. Peremennyy modul' uprugosti drevesiny. Vestnik MGSU. 2011; 2(1):150-152. [Arleninov D.K., Arleninov P.D. Variable elasticity moduli of wood. Scientific and Engineering Journal for Construction and Architecture. 2011; 2(1):150-152. (In Russ.)]
2. Arleninov D.K. Inzhenernyy metod ucheta polzuchesti drevesiny pri opredelenii progibov. Vestnik MGSU. 2011; 2(1):147-149. [Arleninov D.K. Engineering method of accounting for creep of wood in determining deflections. Scientific and Engineering Journal for Construction and Architecture. 2011;2(1):147-149. (In Russ.)]
3. Arleninov D.K., Bekker D.A. Vliyanie urovnya napryazheniy na polzuchest' drevesiny pri izgibe. Lesnoy zhurnal. 2015; 6:128-137. [Arleninov D.K., Bekker D.A. The influence of the stress level on the creep of wood during bending. Forestry journal. 2015; 6:128-137. (In Russ.)]
4. Pyatikrestovskiy K.P., Travush V.I. O programmirovanii nelineynogo metoda rascheta derevyannykh konstruktsiy. Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. 2015; 2:117-121. [Pyatikrestovskiy K.P., Travush V.I. About programming of nonlinear method of calculation of wooden constructions. Academia. Architecture and Construction. 2015; 2:117-121. (In Russ.)]
5. Bondarenko V.M. Nekotorye voprosy nelineynoy teorii zhelezobetona. Khar'kov: Izdatel'stvo Khar'kovskogo universiteta; 1968. 323 s. [Bondarenko V.M. Some questions of the nonlinear theory of reinforced concrete. Khar'kov: Publishing house of Khar’kov University; 1968. 323 p. (In Russ.)]
6. Rozhkov A.F. Upravlyaemye blok-sektsii s predvaritel'no napryazhennymi derevyannymi elementami. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kand. tekhn. nauk. Krasnoyarsk. 2006. 191 s. [Rozhkov A.F. Managing of block sections with prestressed wooden elements. Published Candidaie of Technical Sciences thesis. Krasnoyarsk. 2006. 191 p. (In Russ.)]
7. SP 64.13330.2011 (aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-25-80) “Derevyannye konstruktsii” (utverzhden prikazom Ministerstva regional'nogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii (Minregion Rossii) ot 28 dekabrya 2010 g. № 826). TsNIISK im. V.A. Kucherenko, OAONITs “Stroitel'stvo”, 20.05.2011. [SP 64.13330.2011 (updated version

of SNiP II-25-80) “Wooden constructions” (approved by the order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation (Ministry of Regional Development of Russia) on December 28, 2010 No. 826). CNIISK named after V.A. Kucherenko, OAONITs“Stroitel'stvo”, 20.05.2011. (In Russ.)]

8. Estévez J. Timberspatial trussesusinghollowbars. InternationalesHolzBau-Forum 11. Germany, 2011. P.1-13. URL: http://www.forum-holzbau.com/pdf/ihf11_estevez.pdf
9. Smith P.R. The behaviour of traditional timber roof framing in domestic buildings. Architectural Science Review. 1973; 16(3):152-154.
10. Šmak M., Barnat J. Dowelled joints in timber structures. Experiment–design–realization. Wood Research.2016; 61(4):651-662.
11. Kaziolas D.N., Zygomalas I., Stavroulakis G.E. & Baniotopoulos C.C. LCA of timber and steel buildings with fuzzy variables uncertainty quantification. European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2017; 21(9):1128-1150.
12. KavaliauskasS., KvedarasA.K.&GurkšnysK. Evaluation of long-term behaviour of composite timber-concrete structures according to EC. Ukio Technologinis ir Ekonominis Vystymas. 2005; 11(4):292-296.
13. Huifeng Yang, Dongdong Ju, Weiqing Liu, Weidong Lu. Prestressed glulam beams reinforced with CFRP bars. Construction and Building Materials. 2016; 109:73-83.
14. Akyildiz M.H. Screw-nail withdrawal and bonding strength of paulownia (Paulownia tomentosaSteud.) wood. Journal of Wood Science. 2014; 60(3):201-206.
15. Takanashi R., Sawata K., Sasaki Y., KoizumiA. Withdrawal strength of nailed joints with decay degradation of wood and nail corrosion. Journal of Wood Science. 2017; 63(2):192-198.
16. Barcik S., Gasparik M., Horejs P. Influence of Thermal Modification on Nail Withdrawal Strength of Spruce Wood. BioResources. 2014; 9(4):5963-5975.
17. Smith T. Post-tensioned Timber Frames with Supplemental Damping Devices. Christchurch: University of Canterbury; 2014.

Сведения об авторах:

Инжутов Иван Семенович – доктор технических наук, профессор, кафедра строительных конструкций и управляемых систем.

Мезенцев Владислав Вадимович - магистрант

Рожков Александр Федорович - кандидат технических наук, доцент, кафедра строительных конструкций и управляемых систем.

Хованский Максим Евгеньевич - магистрант.

Information about the authors:

Ivan S. Inzhutov - Dr. Sci., (Technical) Prof., Department of Building Constructions and Controlled Systems.

Vladislav V.Mezentsev - Master's student.

Alexander F.Rozhkov - Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Building Constructions and Controlled Systems.

Maxim E. Khovansky - Master's student.

Конфликт интересов.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Поступила в редакцию 17.08.2017.
Принята в печать21.09.2017.

Conflict of interest.
The authors declare no conflict of interest.
Received 17.08.2017.
Accepted for publication 21.09.2017.