УДК 624.011.1:539.32(083.75) DOI: 10.33622/0869-7019.2020.04.16-20

Влияние новых расчетных характеристик древесины на определение коэффициента продольного изгиба

Дмитрий Константинович АРЛЕНИНОВ, доктор технических наук, профессор, e-mail: dkarleninov@mail.ru

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. *Нормативная методика расчета на устойчивость деревянных стержней, в которой коэффициент продольного изгиба зависит от отношения модуля упругости к расчетному сопротивлению, реализуется в линейной постановке. Применение данного метода для расчета деревянных конструкций, обладающих ползучестью во времени, обусловлено исследованиями, проведенными в прошлом веке, в которых установлено, что это отношение для древесины постоянно, как при испытаниях кратковременной нагрузкой, так и при испытаниях длительными нагрузками. С тех пор эта характеристика для древесины, используемая в расчетах при проектировании деревянных конструкций, практически не изменялась, и метод расчета на устойчивость не терял актуальности. Но в последней редакции норм проектирования деревянных конструкций расчетные сопротивления и модули упругости для пиломатериалов, клееной древесины и нового материала из однонаправленного шпона различаются в зависимости от классов прочности, и отношение модуля упругости к расчетному сопротивлению становится переменным. Следовательно, формула вычисления коэффициента продольного изгиба для деревянных стержней с гибкостью более 70, оставленная без изменений в последней редакции норм, требует корректировки. Предлагается изменение этой формулы с учетом новых значений расчетных прочностных и деформационных характеристик для деревянных элементов из цельной и клееной древесины. Одновременно подвергается сомнению методика назначения расчетных значений модуля упругости древесины.*

Ключевые слова: *метод расчета, деревянные конструкции, устойчивость, расчетные сопротивления, модуль упругости.*

INFLUENCE OF NEW DESIGN CHARACTERISTICS OF WOOD ON DETERMINING THE LONGITUDINAL BENDING COEFFICIENT

Dmitriy K. ARLENINOV, e-mail: dkarleninov@mail.ru

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Abstract. *The standard methodology for calculating the stability of wooden rods, in which the longitudinal bending coefficient depends on the ratio of the elastic modulus to the design resistance is implemented in a linear formulation. The use of this linear method for calculating wooden structures that have a creep in time is due to studies conducted in the last century, in which it was found that this ratio for wood is constant, both during short-term loading and long-term loading. Since then, this characteristic for wood, used in calculations for the design of wooden structures, has not changed practically and the method of calculating the stability has not lost its relevance. But in the latest version of the design standards for wooden structures, the design resistances and elastic modulus for lumber, glued wood and new material made of unidirectional veneer differ depending on the strength classes, and the ratio of the elastic modulus to the design resistance becomes variable. Therefore, the formula for calculating the longitudinal bending coefficient for wooden rods with a flexibility of more than 70, left unchanged in the latest version of the norms, requires adjustment. It is proposed to change this formula taking into account the new values of the calculated strength and deformation characteristics for solid and glued wood elements. At the same time, the method of assigning calculated values of the modulus of wood elasticity is being questioned.*

Key words: *calculation method, wooden structures, stability, design resistance, elastic modulus.*

Целью настоящего исследования является актуализация методики расчета на устойчивость центрально сжатых деревянных стержней, а также расчета на устойчивость изгибаемых и сжато-изгибаемых из плоскости изгиба деревянных стержней с гибкостью более 70 в части формулы для определения коэффициента продольного изгиба. Эта формула представлена в нормах с прошлого века, когда значение отношения модуля упругости к расчетному сопротивлению было постоянным для цельной и клееной древесины и не зависело от сортов и классов прочности. В предпоследнюю и последнюю редакции СП 64.13330.2011 и СП 64.13330.2017 «СНиП II-25-80 Деревянные конструкции» были внесены изменения по значениям в первую очередь модулей упругости деревянных элементов, которые вызвали различную реакцию у специалистов [1—6]. Но, изменив эти деформационные характеристики в зависимости от классов прочности и закрепив

© АРЛЕНИНОВ Д. К., 2020

данные изменения в нормах, формулу для определения коэффициента продольного изгиба не откорректировали.

Нормативная методика расчета на устойчивость деревянных стержней с гибкостью более 70 базируется на классической теории Эйлера для упругого стержня, которая определяется критической нагрузкой $N_{кр}$, определяемой по формуле

$$N_{кр} = \pi^2 EI/l_0 2, \quad (1)$$

а критическое напряжение $\sigma_{кр}$ по формуле

$$\sigma_{кр} = N_{кр}/F = \pi^2 EI/l_0 F. \quad (2)$$

С целью упрощения выражение (2) можно преобразовать, исходя из формул для определения гибкости стержня $\lambda = l_0/r$ и радиуса инерции прямоугольного сечения $r = IF$, в следующий вид:

$$\sigma_{кр} = \pi^2 EI/F\lambda^2 r^2 = \pi^2 EI/F\lambda^2 (I/F). \quad (3)$$

Разрабатывая методику расчета на устойчивость деревянного стержня, наши предшественники справедливо считали, что во времени под нагрузкой проявляются остаточные деформации древесины, которые необходимо учитывать в расчетах. Вычислительных возможностей для реализации нелинейных расчетов в то время не было, а приближенно учесть ползучесть древесины в линейных расчетах можно путем уменьшения значения модуля упругости относительно нормативных значений, полученных при кратковременных испытаниях малых образцов в прессе. Для этого было использовано широко известное в то время отношение [7, с. 93; 8, с. 31] , которое базировалось на опытных данных:

$$E_к/R_{вр} = E/R = 312, \quad (4)$$

где $E_к$ — кратковременный модуль упругости, МПа; $R_{вр}$ — временное сопротивление, МПа; E — длительный модуль упругости, МПа; R — расчетное сопротивление древесины при сжатии вдоль волокон, МПа.

Это отношение довольно постоянно как при кратковременных, так и при длительных нагрузках, что и послужило поводом к использованию этого отношения при вычислении коэффициента продольного изгиба φ, который записывается в следующем виде:

$$\varphi = \sigma_{кр}/R_{вр} = \sigma_{кр}/R = \pi^2 E/\lambda^2 R = \pi^2 \cdot 312/\lambda^2 = 3080/\lambda^2 = A/\lambda^2. \quad (5)$$

В таком виде формула существует в нормах проектирования по настоящее время. Почему авторы прежних редакций норм не назвали E длительным модулем упругости, неизвестно, но можно предположить, что из-за терминологической некорректности: длительность и упругость не сочетаются в одном показателе. Хотя в то время в строительной механике этот термин присутствовал для оценки линейной ползучести [9, с. 251].

Поскольку нормативные значения E и R до настоящего времени практически не изменялись, то не менялась и величина числителя A в формуле (5) за исключением арифметического округления. В первых двух редакциях СНиП II-25-80 «Деревянные конструкции» числитель округлили до 3100, а в третьей редакции — до 3000, что и осталось в СП 64.13330.2017. Таким образом, при расчете на устойчивость сжатых деревянных элементов, а также при расчете на прочность и устойчивость из плоскости изгиба при гибкости стержней более 70 числитель A остается неизменным до сего времени и равняется для древесины 3000, а для фанеры — 2500.

Данная методика при расчете деревянных конструкций прошла проверку временем, поскольку не наблюдалось проблем с потерей устойчивости сжатых и внецентренно сжатых элементов в практике эксплуатации несущих конструкций зданий и сооружений. Даже создавалось впечатление, что эта методика дает излишний запас прочности. Однако в рамках актуализации СНиП II-25-80 с заменой этих норм на СП 64.13330.2011, а в дальнейшем на СП 64.13330.2017 произошло изменение методики назначения расчетных сопротивлений и модулей упругости. Помимо этого, пиломатериалы были дифференцированы на 12 классов прочности, клееные элементы — на пять классов прочности, а элементы из LVL — на три класса. В результате изменились расчетные характеристики E и R, а числитель A для древесины и фанеры остался равным соответственно 3000 и 2500. Для материала LVL числитель приравняли к числителю для фанеры, что, по меньшей мере, странно, так как этот новый материал является улучшенной версией клееных элементов с более высокими механическими характеристиками и не имеет поперечных слоев шпона.

В связи с изменением нормативных значений $E_к$ и $R_{вр}$ для древесины и слоистых материалов, дифференцированных по многим классам прочности, встает вопрос о замене в формуле коэффициента продольного изгиба постоянного числителя A на переменное отношению $\pi^2 E/R$, но при этом возникают сомнения в достоверности некоторых расчетных характеристик.

Проанализируем отношение $E_к/R_{вр}$, содержащееся в последней редакции норм, для конструкционных пиломатериалов класса С24, которое, как правило, закладывается в расчет при проектировании несущих деревянных конструкций, и отношение $E_к/R_{вр}$ для пиломатериалов соседних классов прочности С22 и С27, приведенные в прил. В (табл. В.3) СП 64.13330.2017.

Одновременно рассмотрим эти показатели для клееных элементов классов прочности К20 и К24 (табл. В.4) в том же документе.

Как показывают данные, представленные в *табл. 1*, отношение нормативных значений модуля упругости и прочности пиломатериалов в зависимости от классов прочности соответствует результатам кратковременных испытаний, проведенных в прошлом веке, и подтверждает значение $A = 300$. Прочность при изгибе близка к прочности при сжатии, и этот факт послужил основанием у наших предшественников принимать расчетные сопротивления одинаковыми.

У клееных элементов отношение $E_к/R_{вр}$ несколько выше, чем у исходных пиломатериалов, что объясняется более высоким модулем упругости. Это странно, так как, наоборот, прочность клееных элементов должна быть выше из-за рассредоточения сучков при распиловке бруса и дальнейшего склеивания, а модуль упругости должен быть примерно одинаковым с пиломатериалом. Поэтому данный вопрос требует дополнительного исследования.

Значительный разброс по величине отношения между классами прочности клееных элементов можно связать с изменчивостью характеристик древесины, когда образцы для испытаний, видимо, отбирались из разных партий поставки. Но это уже упрек исследователям, в связи с чем для уточнения взаимосвязи $E_к$ и $R_{вр}$ клееных элементов необходимо провести дополнительные исследования кратковременной нагрузкой единых образцов, вначале для определения модуля упругости при небольших нагрузках, а затем испытать эти образцы до разрушения.

Проанализируем влияние длительности действия нагрузки на отношение E/R, поскольку в соответствии с формулой (4) существует та же взаимосвязь между кратковременными и длительными показателями деформативности и прочности древесины. По формуле п. 6.1 СП 64.13330.2017 вычислим расчетные сопротивления для рассматриваемых классов пиломатериалов, клееных элементов, а также для элементов LVL сортов К35, К40 и К45. При вычислении для всех видов и классов прочности этих материалов за единицу принималось произведение коэффициентов условий работы.

1. Нормативные характеристики материалов по результатам кратковременных испытаний

Показатель	Пиломатериалы			Клееные элементы	
	С22	С24	С27	К20	К24
Временное сопротивление $R_{вр}$, МПа	–	33	36	29	37,5
Кратковременный модуль упругости $E_к$, МПа	10000	11000	11500	9000	11600
$E_к/R_{вр}$	–	333	319	321	309

2. Расчетные характеристики материалов

Показатель	Пиломатериалы			Клееные элементы	
	С22	С24	С27	К20	К24
Расчетное сопротивление R, МПа	12,1	13,2	14,85	11	13,2
Длительный модуль упругости E, МПа	6700	7400	8000	7000	9400
E/R	554	560	540	640	710

Коэффициент длительной прочности принимали равным 0,66 исходя из того, что деревянные несущие конструкции применяются в основном для зданий с режимом нагружения «В» по табл. 4 СП 64.13330.2017, а коэффициент надежности по материалу брали равным 1,2 в соответствии с табл. 6 того же СП.

Расчетные сопротивления вдоль волокон при сжатии и изгибе для пиломатериалов и клееных элементов представлены в *табл. 2*.

Для многослойного бруса из однонаправленного шпона LVL классов К35, К40, и К45 те же расчетные сопротивления составили соответственно 19,2, 22 и 24,8 МПа. При практически одинаковых показателях у пиломатериала и клееных элементов расчетное сопротивление LVL значительно превышает расчетное сопротивление древесины, а тем более фанеры, у которой слои шпона вдоль и поперек волокон чередуются между собой, что подтверждает поставленный выше вопрос о спорности значения числителя A для элементов из LVL.

Влияние длительности действия нагрузки на модуль упругости отражено в назначении «расчетного модуля упругости» в пп. 6.11 и 6.12 СП 62.13330.2017, где, на мой взгляд, термин «расчетный» было бы правильнее заменить термином «длительный».

Кроме того, предложенные две различные формулы для вычисления модуля упругости ставят пользователя норм при расчетах деревянных конструкций в тупик. Поэтому вычислим длительный модуль упругости толь-

ко по формуле п. 6.11 для пиломатериалов класса прочности С22, С24 и С27 и клееных элементов К20 и К24 *(см. табл. 2)*.

Как и при вычислении расчетных сопротивлений, произведение коэффициентов условий работы по этой формуле принимается равным единице. Коэффициент длительности нагружения «В» для нашего случая также принимается равным единице, т. е. ползучесть не учитывается, и, следовательно, у этих материалов длительный модуль упругости соответствует нормативным значениям, полученным по результатам кратковременных испытаний.

Для вычисления длительного модуля упругости элементов из LVL данные в приложении «В» отсутствуют, что не позволяет сделать соответствующие вычисления.

Полученные результаты *(см. табл. 2)* и представленные в нормах формулы для вычисления длительного модуля упругости вызывают большие сомнения, что подтверждается отсутствием данных для LVL, по следующим причинам:

- расчет деревянных стержней на устойчивость и расчет на прочность по деформируемой схеме базируются на теории продольно-поперечного изгиба, и значение модуля упругости древесины вдоль волокон должно быть единым с учетом ползучести древесины при линейных расчетах несущих конструкций;
- для наиболее распространенного режима загружения «В» при назначении длительного модуля упругости ползучесть древесины не учитывается;
- для объективного назначения длительного модуля упругости необходимы масштабные испытания образцов длительной нагрузкой, а не механическое использование коэффициентов, полученных при прочностных исследованиях древесины длительной нагрузкой.

Вывод

Отношение новых нормативных значений E/R, которые представлены в последней редакции норм СП 64.13330.2017, в 2 раза расходятся со значением этого отношения, равного 300, которое положено в основу расчета на устойчивость деревянных стержней гибкостью более 70 при вычислении коэффициента продольного изгиба. Соответственно, при этом вдвое меняется коэффициент φ, что недопустимо.

Отсюда следует: либо результаты расчетных характеристик (в первую очередь модуля упругости) неправильно определяются и необходимо проводить дополнительные исследования, либо, если авторы норм уверены в достоверности расчетных характеристик материалов (с чем сложно согласиться), в расчетные положения о вычислении коэффициента продольного изгиба необходимо внести изменения по замене постоянного числителя A на переменное значения $\pi^2 E/R$ для каждого вида материала и класса прочности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Арленинов Д. К.* О расчете деревянных конструкций по деформируемой схеме // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 1. С. 43–46.
2. *Арленинов Д. К., Арленинов П. Д.* Переменный модуль упругости древесины // Вестник МГСУ. 2011. № 1. Ч. 2. С. 150–152.
3. *Крылов С. Б., Арленинов П. Д.* Инженерный подход к решению задачи об изгибе упруго-ползучего стержня // Строительная механика и расчет сооружений. 2013. № 2. С. 9–11.
4. *Пятикрестовский К. П.* К вопросу о выборе модулей упругости при расчете деревянных конструкций на прочность, устойчивость и по деформациям // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 6. С. 7.
5. *Клименко В. З.* Расчет деревянных конструкций по деформациям и на прочность по деформируемой схеме // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 6. С. 69–73.
6. *Цепаев В. А.* Оценка модуля упругости древесины конструкций // Жилищное строительство. 2003. № 2. С. 11–13.
7. Конструкции из дерева и пластмасс / под ред. Г. Г. Карлсена. Изд. 4-е. М. : Стройиздат, 1975. 680 с.
8. Пособие по проектированию деревянных конструкций (к СНиП II-25-80). М. : Стройиздат, 1985. 214 с.
9. *Ржаницын А. Р.* Строительная механика. М. : Высшая школа, 1982. 398 с.

REFERENCES

1. Arleninov D. K. About calculation of wooden structures according to deformed scheme. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2016, no. 1, pp. 43–46. (In Russian).
2. Arleninov D. K., Arleninov P. D. Variable modulus of elasticity of wood. *Vestnik MGSU*, 2011, no. 1, part. 2, pp. 150–152. (In Russian).
3. Krylov S. B., Arleninov P. D. An engineering approach to solving the problem of bending an elastic-creeping rod. *Stroitel'naya mekhanika i raschyot sooruzhenij*, 2013, no. 2, pp. 9–11. (In Russian).
4. Pyatikrestovskij K. P. To the question of the choice of elastic moduli when calculating wooden structures for strength, stability and deformations. *Stroitel'naya me-*

khanika i raschyot sooruzhenij, 2012, no. 6, p. 7. (In Russian).

5. Klimenko V. Z. Calculation of wooden structures according to deformations and strength according to the deformable scheme. *Stroitel'naya mekhanika i raschyot sooruzhenij*, 2012, no. 6, pp. 69–73. (In Russian).
6. Tsepaev V. A. Evaluation of the modulus of elasticity of wood structures. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2003, no. 2, pp. 11–13. (In Russian).
7. *Konstrukcii iz dereva i plastmass* [Structures made of wood and plastic]. Ed. G. G. Karlsen. Moscow, Strojizdat Publ., 1975. 680 p. (In Russian).
8. *Posobie po proektirovaniyu derevyannyh konstrukcij (k SNiP 11-25-80)* [A guide to the design of wooden structures (to SNiP 11-25-80)]. Moscow, Strojizdat Publ., 1985. 214 p. (In Russian).
9. Rzhanicyn A. R. *Stroitel'naya mekhanika* [Structural mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982. 398 p. (In Russian).

Для цитирования: *Арленинов Д. К.* Влияние новых расчетных характеристик древесины на определение коэффициента продольного изгиба // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 4. С. 16–20. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.04.16-20.

For citation: Arleninov D. K. Influence of New Design Characteristics of Wood on Determining the Longitudinal Bending Coefficient. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2020, no. 4, pp. 16–20. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2020.04.16-20.