

УДК 004.942

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-69-78](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-69-78)

EDN: HUYCFE

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТОВ СОЕДИНЕНИЙ АНИЗОТРОПНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н.В. КОЛЕСНИКОВ✉

М.В. АРИСКИН, канд. техн. наук

Д.О. МАРТЫШКИН

А.В. МЕРКУШОВ

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, ул. Германа Титова, д. 28, г. Пенза, 440028,  
Российская Федерация

## Аннотация

*Введение.* Современные методы проектирования и расчета строительных конструкций часто ограничиваются упругой стадией работы материалов. Для анализа напряженно-деформированного состояния соединений необходимо учитывать свойства материала, а также его работу под нагрузкой, включая как упругие, так и нелинейные стадии. Значительный интерес представляют анизотропные материалы, такие как древесина. Теоретическое и практическое исследование работы деревянных образцов представлено в данной работе.

*Целью* данной работы является выполнение натуральных испытаний и численное моделирование для анализа напряженно-деформированного состояния и совершенствования расчетов анизотропных конструкционных материалов.

*Материалы и методы.* Выполнены натурные испытания деревянных образцов из сосны второго сорта на сжатие вдоль волокон с фиксацией вертикальных напряжений сжатия и деформаций. Испытания выполнены на гидравлическом прессе с максимальной нагрузкой 50 т. Для фиксации деформаций и напряжений использовалось тензометрическое оборудование. На основе данных натуральных испытаний выполнено численное моделирование образцов в программных комплексах ЛИРА-САПР и ANSYS.

*Результаты.* Согласно результатам натуральных испытаний, упругая стадия работы древесины при сжатии находится в диапазоне до 90 кН, после чего наблюдается переход к пластической деформации. Выполнено численное моделирование образцов в программных комплексах ЛИРА-САПР и ANSYS, которое показало сходимость результатов. Однако программный комплекс ANSYS позволяет более детально моделировать и рассчитывать соединения и конструкции. Сравнение распределений вертикальных напряжений сжатия  $\sigma_v$ , полученных в результате натуральных испытаний и численного моделирования в программном комплексе ANSYS, показало сходимость результатов (невязка не превышает 5%). Это подтверждает эффективность использования данного программного комплекса для моделирования соединений анизотропных материалов.

*Выводы.* Результаты натуральных испытаний и численного моделирования показали эффективность применения программного комплекса ANSYS для расчета сложных соединений анизотропных конструкционных материалов. Сходимость результатов достигнута для упругой стадии. Для моделирования пластической стадии необходимы дополнительные исследования.

**Ключевые слова:** анизотропные материалы, соединение, моделирование, программный комплекс ANSYS

**Для цитирования:** Колесников Н.В., Арискин М.В., Мартышкин Д.О., Меркушов А.В. Совершенствование расчетов соединений анизотропных конструкционных материалов. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;41(2):69–78. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-69-78](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-69-78)

## Вклад авторов

Колесников Н.В. – сбор и анализ результатов натуральных испытаний, выполнение расчетов, написание текста научной статьи.

Арискин М.В. – постановка задач научной работы, анализ результатов научной работы.  
Мартышкин Д.О., Меркушов А.В. – выполнение натурных испытаний и анализ полученных данных.

#### **Финансирование**

Исследование не имело спонсорской поддержки.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 13.11.2023

Поступила после рецензирования 16.04.2024

Принята к публикации 18.04.2024

## **IMPROVED CALCULATIONS OF JOINTS IN ANISOTROPIC STRUCTURAL MATERIALS**

N.V. KOLESNIKOV✉

M.V. ARISKIN, Cand. Sci. (Engineering)

D.O. MARTYSHKIN

A.V. MERKUSHOV

*Penza State University of Architecture and Construction, German Titov str., 28, Penza, 440028, Russian Federation*

### **Abstract**

*Introduction.* Contemporary methods for the design and calculation of building structures are often limited to the elastic stage of the material work. In order to analyze the stress-strain state of joints, it is necessary to take into account the properties of the material, as well as its operation under the load, including both elastic and non-linear stages. In this case, anisotropic materials, e.g. wood, represent a particular interest. Therefore, the paper presents a theoretical and practical study of the work, performed by wooden samples.

*Aim.* To perform tests and numerical simulations for analyzing the stress-strain state and improve the calculations of anisotropic structural materials.

*Materials and methods.* Compression tests of wooden samples, made of second-grade pine, were carried out along the fibers with fixed vertical compression stresses and strains. The tests were performed using a hydraulic press with a maximum load of 50 t. Strain gauge equipment was used to record strains and stresses. Based on the data of compression tests, the numerical simulation of the samples in the LIRA-SAPR and ANSYS software packages was performed.

*Results.* According to the test results, the elastic stage of the compressed wood ranges up to 90 kN, followed by a transition to the plastic deformation. The performed numerical simulation of the samples in the LIRA-SAPR and ANSYS software packages demonstrated the convergence of the results. However, the ANSYS software package allows for a more detailed simulation and calculation of joints and structures. The comparison of distributions of vertical compression stresses  $\sigma_y$ , obtained in tests and ANSYS software package numerical simulation, proved the convergence of the results (discrepancy of less than 5 %). This confirms the effectiveness of using this software package for simulating the joints of anisotropic materials.

*Conclusions.* The results of tests and numerical simulation showed the effectiveness of using the ANSYS software package to calculate complex joints of anisotropic structural materials. The convergence of the results is established for the elastic stage. An additional study is required to simulate the plastic stage.

**Keywords:** anisotropic materials, joint, simulation, ANSYS software package

**For citation:** Kolesnikov N.V., Ariskin M.V., Martyshkin D.O., Merkushov A.V. Improved calculations of joints in anisotropic structural materials. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;41(2):69–78. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-69-78](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-69-78)

#### **Authors contribution statement**

Kolesnikov N.V. – collection and analysis of test results, calculations, manuscript writing.

Ariskin M.V. – setting the tasks of the scientific work, analysis of results.

Martyshkin D.O., Merkushov A.V. – conduct of tests and analysis of the obtained data.

#### **Funding**

No funding support was obtained for the research.

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

*Received 13.11.2023*

*Revised 16.04.2024*

*Accepted 18.04.2024*

## **Введение**

Благодаря развитию научно-технического прогресса, усовершенствованию мощности и производительности электронно-вычислительных машин (ЭВМ), а также развитию и доступности расчетных программных комплексов стало доступно моделирование сложных соединений анизотропных конструкционных материалов. Наиболее распространенным является создание объемных конечно-элементных моделей конструкций и соединений в программных комплексах (ПК) ЛИРА-САПР и ANSYS [1–3].

Для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) соединения при нагружении необходимо рассматривать упругие и нелинейные стадии работы материала. В современной практике строительства расчет соединений и конструкций производится в упругой стадии без учета пластических деформаций.

Далее на основе натурных испытаний и численного моделирования рассмотрим стадии работы материала.

## **Экспериментальная часть**

Для определения данных стадий необходимо провести натурные испытания образцов. Для этого были изготовлены деревянные бруски с размерами  $50 \times 50 \times 200$  (h) мм из сосны второго сорта.

Испытания производились на гидравлическом прессе П-500 (рис. 1а). Нагружение образцов производилось непрерывно со скоростью 2 кН/мин. Для равномерного распределения нагрузки на торец образца устанавливалась дополнительная оснастка (рис. 1а). Для определения нормальных напряжений сжатия на поверхность образцов наклеены тензорезисторы, подключенные к комплекту для тензометрии (рис. 1б). Испытания проводились до полного разрушения образцов (рис. 1в).

Специфика оборудования предполагает собой нагружение образца до величины 5 кН, после чего нагружение производится непрерывно, с изначально заданной скоростью. Фиксация



**а (a)** **б (b)** **в (c)**  
**Рис. 1.** Испытание деревянных образцов на сжатие: *а* – образец в прессе П-500; *б* – общий вид образца; *в* – общий вид разрушения образца

**Fig. 1.** Compression tests of wooden samples: *a* – sample in the P-500 press; *b* – general view of the sample; *c* – general view of the sample destruction

напряжения производилась после приложения нагрузки в 5 кН, что необходимо учитывать при построении графиков нормальных напряжений, полученных при численном моделировании.

Графики относительных деформаций образцов представлены на рис. 2, согласно которому упругая стадия работы материала находится в диапазоне до 90 кН, в связи с чем напряжения сжатия образцов рассматриваем в упругой стадии.

Далее рассмотрим методику создания объемных конечно-элементных моделей в программных комплексах ANSYS и ЛИРА-САПР.

В ПК ANSYS образец замоделирован как объемное тело (solid), которому были заданы свойства древесины, учитывающие ортотропию материала. Нижняя грань образца зафиксирована через граничные условия опоры типа fixed support (жесткое защемление) (рис. 3а). У верхней грани образца замоделирована стальная пластина, на которую приложена вертикальная нагрузка, по аналогии с натурными испытаниями. Контакт между поверхностями

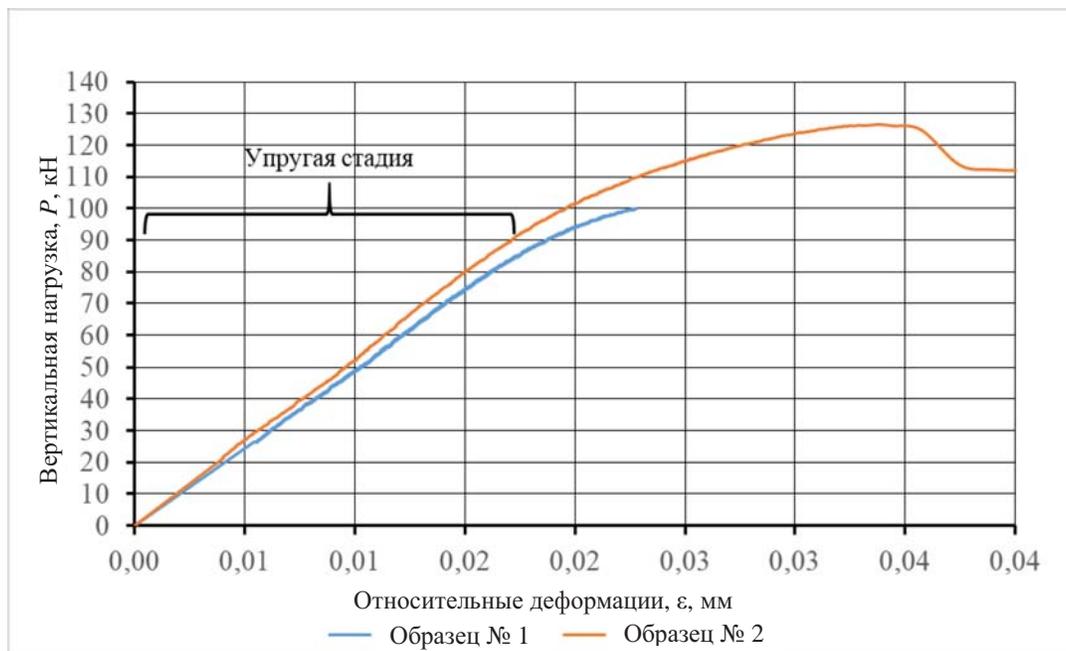


Рис. 2. Относительные деформации образца  
 Fig. 2. Sample strain

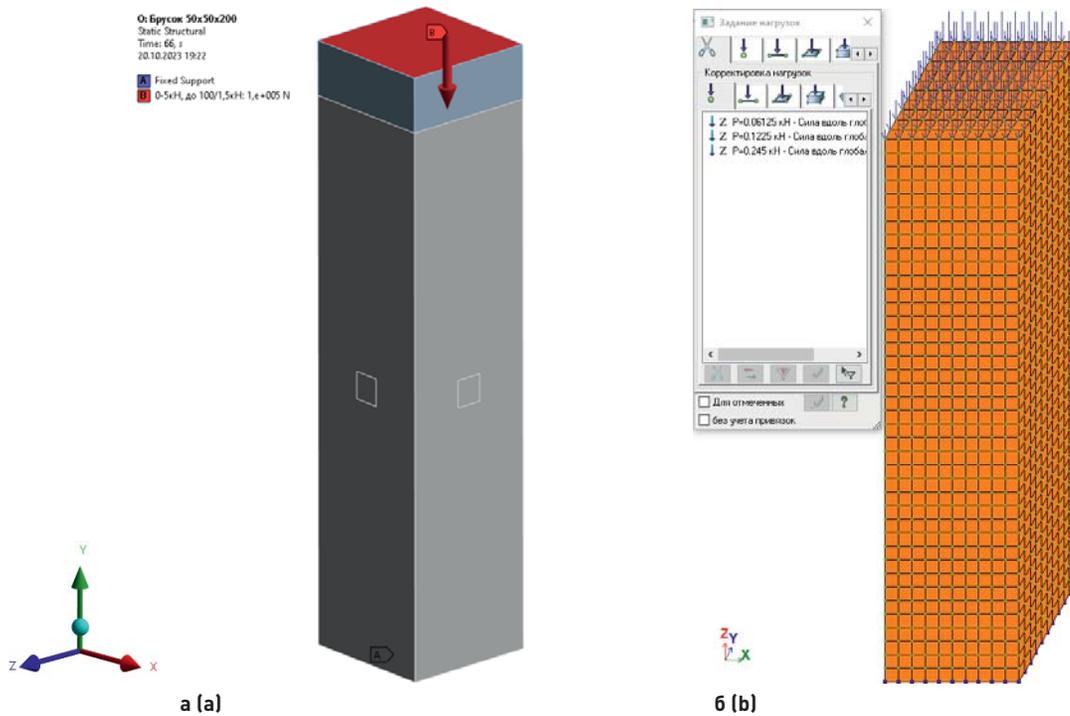


Рис. 3. Объемная конечно-элементная модель образца в ПК ANSYS (а) и ЛИРА-САПР (б)  
 Fig. 3. Volumetric finite element model of the sample in the ANSYS SP (a) and LIRA-SAPR SP (b)

древесины и стали определен как bonded (моделирование жесткого клеевого соединения). Следует отметить, что всплесками напряжения в углах образца можно пренебречь (рис. 3а), так как в реальном образце напряжения возникают равномерно по всему объему тела.

В ПК ЛИРА-САПР брусок замоделирован объемными конечными элементами КЭ 36, которому присвоены характеристики древесины, учитывающие ортотропию материала в местной системе координат. В узлах нижней грани образца заданы связи, ограничивающие перемещения вдоль оси  $z$ , и связи по трем углам, дополнительно ограничивающие перемещения по осям  $x$ ,  $y$  и  $x_y$  (рис. 3б). Нагрузка приложена к узлам верхней грани через систему условных единиц, учитывающих грузовую площадь каждого узла, для исключения деформации верхних углов образца.

Для достижения сходимости результатов натуральных испытаний и численного моделирования образцов были введены корректирующие коэффициенты, учитывающие реальный модуль упругости материала, также для сопоставления результатов был определен коэффициент чувствительности тензорезисторов.

Для оценки результатов испытаний и моделирования было проведено определение фактического модуля упругости древесины на основе испытаний на четырехточечный изгиб брусков размерами  $30 \times 30 \times 200$  мм (рис. 4). Проведенные испытания образцов показали значения определяемых характеристик, близкие к значениям, приведенным в СП 64.13330.2017 [4]. На этом основании при моделировании и расчете принимались табличные значения расчетных характеристик древесины сосны второго сорта.

Далее представлены результаты расчета в ПК ANSYS и ЛИРА-САПР: перемещения и напряжения сжатия (рис. 5–7).



Рис. 4. Испытание деревянных образцов на четырехточечный изгиб

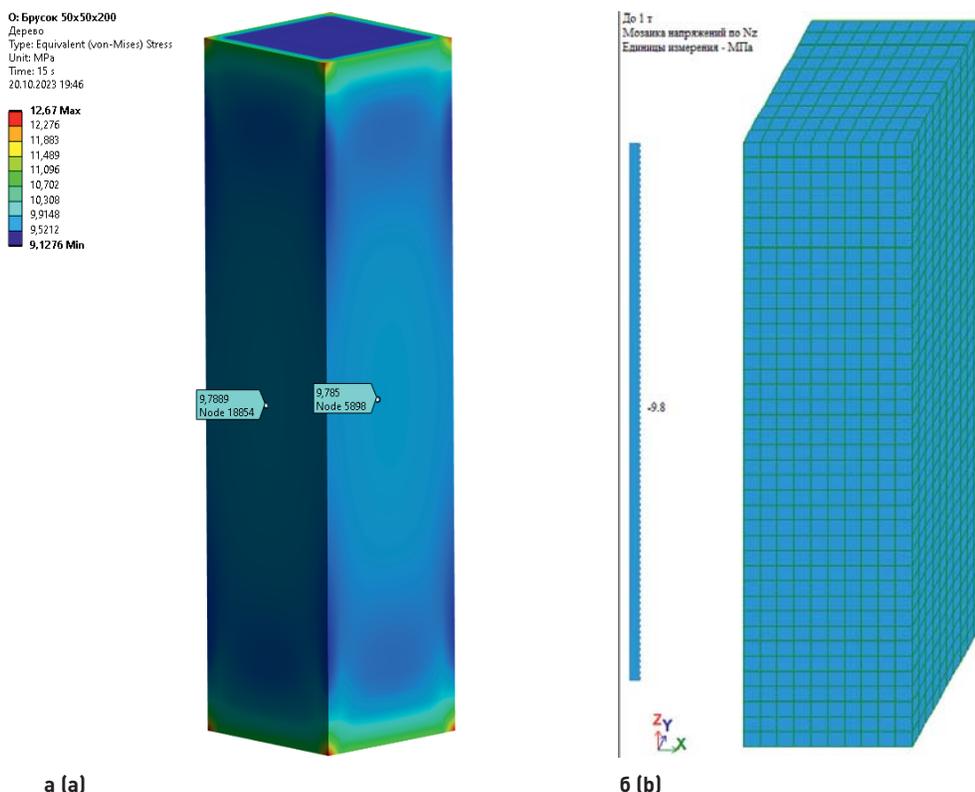
Fig. 4. Four point bend testing of wooden samples

По результатам численного моделирования образцов (рис. 5–7) установлена сходимость полученных данных (погрешность не превышает 5%) при нагружении образцов сосредоточенной нагрузкой 25–30 кН. Для дальнейшего изучения соединений конструкций и материалов мы будем использовать программный комплекс ANSYS. Этот комплекс имеет обширную базу данных, которая позволяет выполнять моделирование различных клеевых соединений, учитывать трение материала, возможность ступенчатого и длительного нагружения.

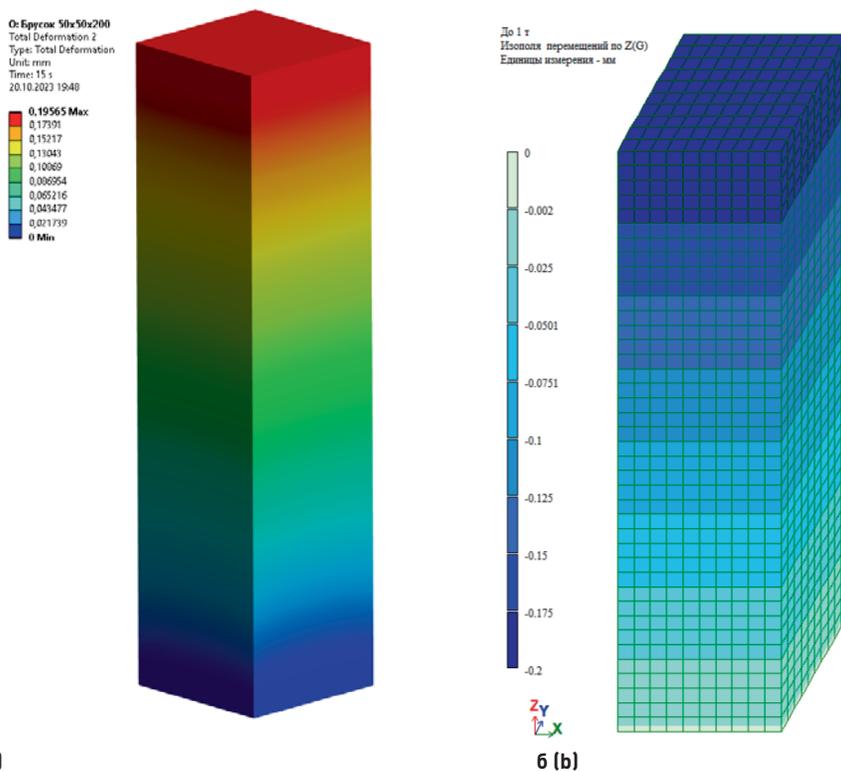
На основе результатов натуральных испытаний и компьютерного моделирования образцов построены графики распределения вертикальных напряжений сжатия  $\sigma_y$  (рис. 7). Как отмечено ранее, специфика оборудования предполагает собой нагружение образца до величины 5 кН, что отобразено на рис. 7.

Согласно рис. 7, установлена сходимость результатов натуральных испытаний и компьютерного моделирования (погрешность не превышает 5%), что подтверждает правильность создания объемной конечно-элементной модели образцов.

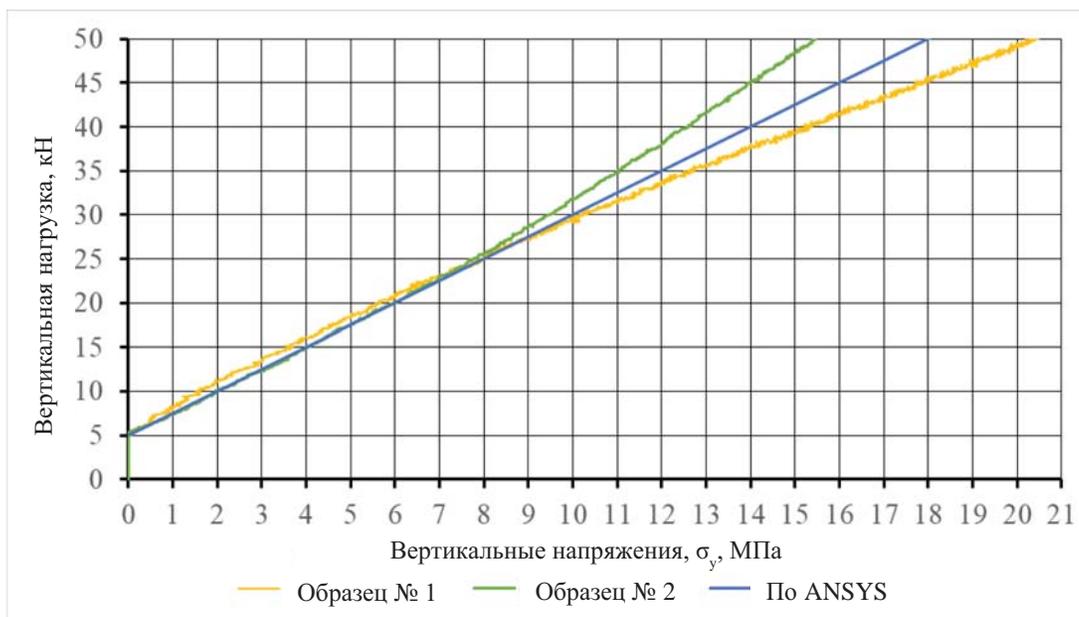
Для моделирования пластической работы материала и соединения необходимы дополнительные исследования, введение дополнительных коэффициентов, задание дополнительных контактных связей, то есть моделирование образцов с применением теории разрушения. На данной стадии моделирования соединения конструкций рассматриваются в упругой стадии работы материала.



**Рис. 5.** Вертикальные напряжения сжатия при нагрузке 25 кН в ПК ANSYS (а) и ЛИРА-САПР (б)  
**Fig. 5.** Vertical compression stresses at a load of 25 kN in the ANSYS SP (a) and LIRA-SAPR SP (b)



**Рис. 6.** Вертикальные перемещения при нагрузке 25кН в ПК ANSYS (а) и ЛИРА-САПР (б)  
**Fig. 6.** Vertical movements at a load of 25kN in the ANSYS SP (a) and LIRA-SAPR SP (б)



## Заключение

Результаты исследования подтвердили эффективность применения программного комплекса ANSYS для моделирования сложных соединений анизотропных конструкционных материалов. Это подтверждается сходимостью данных, полученных в ходе натуральных испытаний деревянных брусков из сосны второго сорта, и данных, полученных в ходе компьютерного моделирования.

Важно отметить, что эта сходимость была достигнута для упругой стадии работы материала, моделирование пластической стадии требует дальнейших исследований.

Моделирование соединений анизотропных конструкционных материалов с учетом их особенностей не только позволяет сократить расходы на создание и тестирование образцов, но и открывает возможности для оптимизации процесса проектирования. На этапе моделирования можно корректировать геометрию элементов, свойства материалов, режим испытания, выявлять и устранять недочеты конструкции, что в конечном итоге приводит к более эффективному использованию ресурсов.

## Список литературы

1. Данилов В.М., Ерофеев А.В., Горохов Т.И. Возможности программного комплекса ANSYS для решения научно-практических задач в строительстве. В: Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы (Поиск 2021). Сб. материалов Национальной (с международным участием) молодежной науч.-техн. конф. Иваново: ИВГПУ; 2021, с. 182–185.
2. Мартыненко Т.М., Пронкевич С.А., Мартыненко И.М., Максимович В.А. Анализ прочности узловых соединений при различных исполнениях конструкции на основе моделирования в среде ANSYS. В: Механика исследования и инновации. Междунар. сб. науч. ст. Вып. 15. Гомель; 2022, с. 147–151.
3. Козлов Д.В., Муйземнек А.Ю., Гуськов М.С. Варианты упрощения модели расчета композиционного материала в программном комплексе ANSYS. В: Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы. Сб. ст. по материалам VIII Всероссийской межвузовской науч.-практ. конф. Пенза: ПГУ; 2021, с. 362–363.
4. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80 [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/456082589>.
5. Шемякин Е.И., Тутурин С.В., Короткина М.Р. Разрушение древесины при сжати. Вестник МГУЛ – Лесной Вестник. 2005;(3):56–70.
6. Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. 2-е изд. Москва: ЛЕНАНД; 2010.

## References

1. Danilov V.M., Erofeev A.V., Gorokhov T.I. Possibilities of the ANSYS software complex for solving scientific and practical problems in construction. In: Young scientists - development of the national technological initiative [Search 2021]. Collection of materials of the National (with international participation) Youth Scientific and Technical Conference. Ivanovo: Ivanovo State Polytechnic University (ISPU); 2021, pp. 182–185. (In Russian).
2. Martynenko T.M., Pronkevich S.A., Martynenko I.M., Maksimovich V.A. Analysis of the strength of nodal joints in various design designs based on modeling in the ANSYS environment. In: Mechanics of research and innovation. International collection of scientific articles. Issue 15. Gomel; 2022, pp. 147–151. (In Russian).
3. Kozlov D.V., Muzyemnek A.Yu., Guskov M.S. Options for simplifying the calculation model of composite material in the ANSYS software package. In: Information technologies in science and education. Problems

and prospects. Collection of articles based on the materials of the VIII All-Russian Interuniversity Scientific and Practical Conference. Penza: PSU; 2021, pp. 362–363. (In Russian).

4. SP 64.13330.2017. Timber structures. Updated version of SNiP II-25-80 [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/456082589> (In Russian).

5. *Shemyakin E.I., Tuturin S.V., Korotkina M.R.* Destruction of wood during compression. Vestnik MGUL – Lesnoy vestnik. 2005;(3):56–70. (In Russian).

6. *Morozov E.M., Muyzemnek A.Yu., Shadsky A.S.* ANSYS in the hands: The mechanics of destruction. 2nd ed. Moscow: LENAND; 2010. (In Russian).

## Информация об авторах / Information about the authors

**Никита Викторович Колесников**✉, аспирант кафедры строительных конструкций, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

e-mail: ko1esnikov.1998@list.ru

**Nikita V. Kolesnikov**✉, Postgraduate Student, Department of Building Structures, Penza State University of Architecture and Construction, Penza

e-mail: ko1esnikov.1998@list.ru

**Максим Васильевич Арискин**, канд. техн. наук, доцент кафедры строительных конструкций, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

e-mail: m.v.ariskin@mail.ru

**Maxim V. Ariskin**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Building Structures, Penza State University of Architecture and Construction, Penza

e-mail: m.v.ariskin@mail.ru

**Даниил Олегович Мартышкин**, аспирант кафедры строительных конструкций, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

e-mail: historical95@mail.ru

**Daniil O. Martyshkin**, Postgraduate Student, Department of Building Structures, Penza State University of Architecture and Construction, Penza

e-mail: historical95@mail.ru

**Антон Викторович Меркушов**, аспирант кафедры строительных конструкций, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

e-mail: merkushov.av@mail.ru

**Anton V. Merkushov**, Postgraduate Student, Department of Building Structures, Penza State University of Architecture and Construction, Penza

e-mail: merkushov.av@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author