

## Триботехнические характеристики упругоподатливых контактных элементов фрикционных грузозахватных устройств для перемещения деревянных конструкций

И.А. Дужевский <sup>1a</sup>, В.И. Мелехов <sup>2b</sup>, В.В. Прохоров <sup>1c</sup>, А.В. Руденко <sup>1d</sup>, А.И. Бабкин <sup>1e</sup>,  
Н.Г. Пономарева <sup>2f</sup>

<sup>1</sup> Институт судостроения и морской арктической техники Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, ул. Капитана Воронина, 6, Северодвинск, Россия

<sup>2</sup> Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, 17, Архангельск, Россия

<sup>a</sup> i.duzhevskiy@narfu.ru, <sup>b</sup> v.melekhov@narfu.ru, <sup>c</sup> v.prokhorov@narfu.ru, <sup>d</sup> a.rudenko@narfu.ru, <sup>e</sup> a.babkin@narfu.ru

<sup>f</sup> n.ponomareva@narfu.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0009-0002-8296-3064>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0009-0002-0239-8254>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0009-0007-3547-3923>,

<sup>e</sup> <https://orcid.org/0009-0000-7977-1200>, <sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6210-5631>,

Статья поступила 02.12.2024, принята 06.02.2025

*Древесина, как конструкционный материал, применяется во многих отраслях промышленности и повседневной жизни. Постоянно увеличиваются объемы производства деревоклееных конструкций, деревянного домостроения, новых дерево-композитных материалов, панелей, дерево-стружечных плит с облицованной поверхностью, фанеры. В технологическом процессе производства клееных деревянных конструкций и изделий из древесины присутствуют операции изменения их пространственного положения. При этом большое внимание уделяется сохранности изделия при перемещении. При выполнении внешних логистических операций не всегда выполняются регламентированные требования, что может привести к появлению повреждений и дефектов на перемещаемых изделиях из древесины. Стандартные грузозахватные устройства не полностью удовлетворяют требованиям по обеспечению надежного и качественного перемещения изделий из древесины. При транспортно-логистических операциях необходимо применять специальные грузозахватные устройства с учетом реологических и анизотропных свойств древесины, что позволит обеспечить надежность и безопасность при выполнении работ. В настоящее время такие технические решения для перемещения изделий из древесины практически отсутствуют. Предложена конструкция фрикционного грузозахватного устройства, обеспечивающая надежное и качественное перемещение изделий из древесины. Проведено экспериментальное исследование процесса взаимодействия контактных элементов грузозахватных устройств из упругоподатливых материалов с изделиями из древесины в условиях переменной нагрузки с учетом реологических и анизотропных свойств древесины. Получены целевые функции зависимости коэффициента трения от варьируемых факторов для четырех пар трения упругоподатливых материалов с образцами древесины и ламинированной древесно-стружечной плитой. Впервые установлены результаты величины коэффициента трения при взаимодействии силиконовой резины с поверхностью ламинированной древесно-стружечной плиты.*

**Ключевые слова:** триботехнические характеристики контактных элементов грузозахватных устройств; грузозахватные устройства для клееных деревянных конструкций; надежное перемещение деревянных конструкций.

## Tribotechnical characteristics of elastic contact elements of friction gripping devices for moving wooden structures

I.A. Duzhevsky <sup>1a</sup>, V.I. Melekhov <sup>2b</sup>, V.V. Prokhorov <sup>1c</sup>, A.V. Rudenko <sup>1d</sup>, A.I. Babkin <sup>1e</sup>,  
N.G. Ponomareva <sup>2f</sup>

<sup>1</sup> Institute of Shipbuilding and Marine Arctic Technology of Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; 6, Captain Voronin St., Severodvinsk, Russia

<sup>2</sup> Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; 17, Severnaya Dvina Emb., Arkhangelsk, Russia

<sup>a</sup> i.duzhevskiy@narfu.ru, <sup>b</sup> v.melekhov@narfu.ru, <sup>c</sup> v.prokhorov@narfu.ru, <sup>d</sup> a.rudenko@narfu.ru, <sup>e</sup> a.babkin@narfu.ru

<sup>f</sup> n.ponomareva@narfu.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0009-0002-8296-3064>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0009-0002-0239-8254>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0009-0007-3547-3923>,

<sup>e</sup> <https://orcid.org/0009-0000-7977-1200>, <sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6210-5631>,

Received 02.12.2024, accepted 06.02.2025

Wood, as a structural material, is used in many industries and everyday life. The production volumes of glued wooden structures, wooden house construction, new wood-composite materials, panels, chipboard with a lined surface, plywood are constantly increasing. In the technological process of production of glued wooden structures and wood products, there are operations to change their spatial position. At the same time, great attention is paid to the safety of the product when moving. When performing external logistics operations, regulated requirements are not always met, which can lead to damage and defects on the transported wood products. Standard lifting devices do not fully meet the requirements for ensuring reliable and high-quality movement of wood products. During transportation and logistics operations, it is necessary to use special lifting devices taking into account the rheological and anisotropic properties of wood, which ensure reliability and safety when performing work. Currently, such technical solutions for the movement of wood products are practically absent. The design of a frictional load-grabbing device is proposed, which ensures reliable and high-quality movement of wood products. An experimental study of the interaction of contact elements of load-lifting devices made of elastic-yielding materials with wood products under variable load conditions, taking into account the rheological and anisotropic properties of wood, has been carried out. The objective functions of the dependence of the coefficient of friction on the variable factors for four pairs of friction of elastic materials with samples of wood and laminated chipboard are obtained. For the first time, the results of the coefficient of friction in the interaction of silicone rubber with the surface of a laminated chipboard have been established.

**Keywords:** tribotechnical characteristics of contact elements of lifting devices, lifting devices for glued wooden structures, reliable movement of wooden structures.

**Введение.** Древесина, как конструкционный материал, применяется во многих отраслях промышленности и повседневной жизни [1–6]. В послании президента РФ Федеральному собранию [7] отмечена необходимость строительства жилья, новых школ, спортивных объектов, что обеспечит в ближайшие 6 лет увеличение объемов производства деревоклееных конструкций, деревянного домостроения, новых деревокомпозитных материалов, панелей, дерево-стружечных плит с облицованной поверхностью, фанеры и пр.

Современные технологические процессы обработки древесины позволяют получать изделия и материалы по прочности сопоставимые с металлоконструкциями, а по некоторым характеристикам превосходящие их [8].

Преимущественное применение имеют клееные деревянные конструкции (КДК) в виде объемных конструкций, плит, панелей, щитов и пр.

Для производства мебели применяют древесно-стружечные плиты, облицованные пленками на основе термореактивных полимеров (ЛДСП) [9], которые отличаются влагостойкостью и обладают повышенными механическими и триботехническими характеристиками поверхности [10].

В технологическом процессе производства КДК и изделий из древесины присутствуют операции изменения их пространственного положения. При этом большое внимание уделяется сохранности изделия при перемещении крупногабаритных конструкций с недостаточной жесткостью. Это обеспечивается схемами строповки, кантовки, фиксации конструкции в определенном пространственном положении с учетом возникающих динамических усилий.

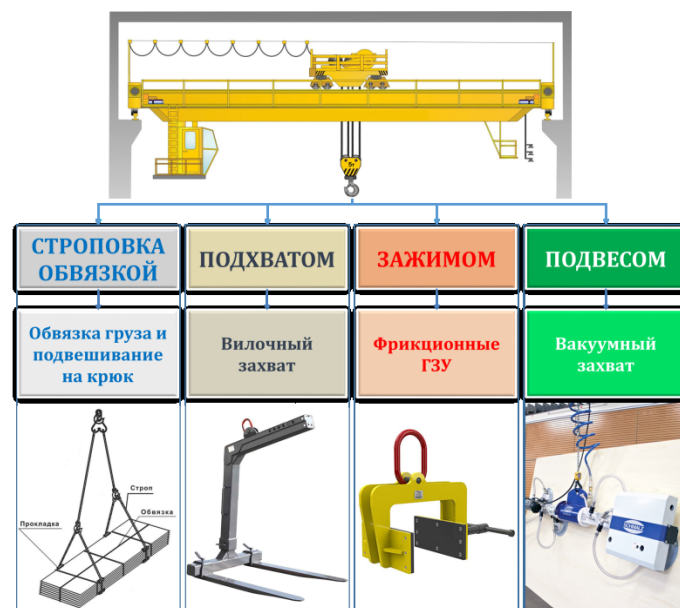
При выполнении внутризаводских операций транспортировки в соответствии с предусмотренным технологическим процессом сохранность изделия – груза обеспечивается на должном уровне. При выполнении внешних логистических операций [11] не всегда выполняются регламентированные требования, что может привести к появлению повреждений и дефектов на перемещаемых изделиях из древесины.

Древесина представляет материал с невысокой контактной прочностью поверхности [12] и требует деликатного обращения при производстве изделий, складировании продукции, транспортировке, монтаже на строительной площадке и т. п.

Поэтому применение стандартных технических решений и грузозахватных устройств (ГЗУ), предназначенных для перемещения изделий с высокой контактной прочностью поверхности (металлы, железобетон и т. п.), – строповка обвязкой, струбцинные захваты, эксцентриковые захваты и др. – может привести к повреждению изделий из древесины и не обеспечить требуемого уровня надежности и безопасности при транспортировке КДК.

В общепринятой практике перемещение КДК и изделий из древесины осуществляют с помощью грузоподъемных кранов общего назначения, оснащенных универсальным ГЗУ – крюком (рис. 1).

При перемещении изделий из древесины преимущественно производят обвязку груза мягкими стропами, после чего навешивают на крюк грузоподъемного крана и адресно перемещают. В зависимости от формы и массы перемещаемых изделий применяют специализированные ГЗУ: вилочный, фрикционный или вакуумный захват.



**Рис. 1.** Классификация способов крепления изделий из древесины при перемещении

Одним из существенных недостатков строповки обвязкой изделий из древесины является повреждение кромок груза. Перемещение груза подхватом с применением вилочного захвата затрудняет кантовку изделия и не позволяет перемещать панели, щиты и листовые материалы поштучно. Вакуумные захваты сложны по конструкции, требуют наличия сопровождающей аппаратуры, имеют ограниченную грузоподъемность, повышенные требования к контактной поверхности перемещаемых изделий, большие габариты и массу и применяются в исключительных случаях.

Фрикционные ГЗУ для перемещения изделий из древесины приведены на рис. 2.

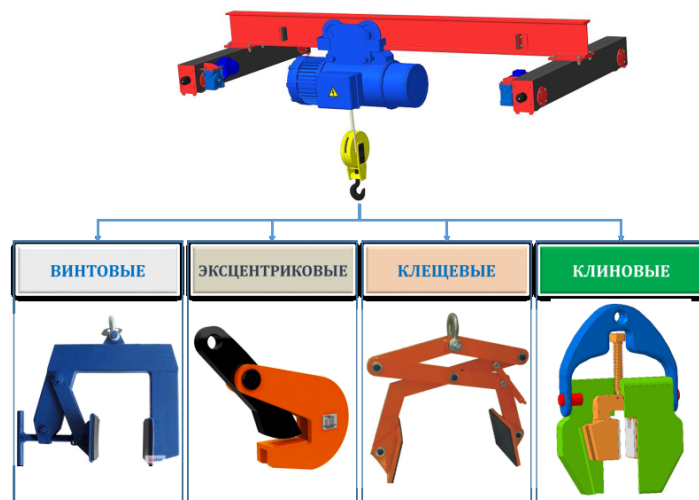
Требования к фрикционным ГЗУ для перемещения КДК:

- надежно удерживать перемещаемый груз контактными элементами (КЭ);
- автоматически ограничивать усилие зажатия груза КЭ без повреждений лицевой поверхности перемещаемого изделия;
- обеспечивать возможность пространственной ориентации груза при кантовочных операциях.

Большая часть применяемых на практике фрикционных ГЗУ не обеспечивают отмеченных требований (табл. 1).

К недостаткам винтовых фрикционных ГЗУ относятся: невысокая надежность удерживания в связи с ослабеванием усилия предварительного зажатия изделия из древесины захватом, что связано с реологическими свойствами древесины; металлоемкая и габарит-

ная конструкция захвата, обеспечивающая жесткость корпуса и усилие предварительного зажатия груза.



**Рис. 2.** Классификация фрикционных ГЗУ для перемещения изделий из древесины

Эксцентриковые захваты для перемещения изделий из древесины применяют ограниченно в связи с небольшим контактом по площади КЭ с лицевой поверхностью перемещаемого изделия. Существенным недостатком клещевых ГЗУ является то, что при встрече на пути перемещения препятствия возможно самопроизвольное освобождение и выпадение груза.

**Таблица 1.** Способы перемещения изделий из древесины

| Способ крепления груза | Вид ГЗУ                | Достоинства ГЗУ                                                                                                                                   | Недостатки ГЗУ                                                                                                                                                                                            |
|------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Строповка обвязкой     | -                      | Удобство перемещения груза пакетом в упаковке                                                                                                     | Возможно повреждение кромок груза                                                                                                                                                                         |
| Подхватом              | Вилочные захваты       | Удобство перемещения груза пакетом в упаковке (на поддонах, паллетах)                                                                             | Невозможность перемещения крупногабаритных изделий поштучно; невозможность кантовки                                                                                                                       |
| Зажимом                | Винтовые захваты       | Универсальность применения                                                                                                                        | Невысокая надежность удерживания в связи с ослабеванием усилия предварительного зажатия изделия из древесины; массивная конструкция корпуса захвата                                                       |
|                        | Эксцентриковые захваты | Универсальность применения                                                                                                                        | Повреждение контактной поверхности перемещаемого груза с невысокой контактной прочностью; ограниченный диапазон толщин перемещаемого груза                                                                |
|                        | Клещевые захваты       | Конструктивная простота и надежность в работе                                                                                                     | Самопроизвольное выпадение груза при встрече на пути перемещения препятствия                                                                                                                              |
|                        | Клиновые захваты       | Высокая надежность; не требуется контролировать усилие зажатия КЭ; минимальная вероятность повреждения контактной поверхности перемещаемого груза | Ограниченный диапазон толщин перемещаемого груза                                                                                                                                                          |
| Подвесом               | Вакуумные захваты      | Перемещение грузов поштучно; удобство кантовки                                                                                                    | Сложность конструкции, требуют наличия сопровождающей аппаратуры, ограниченная грузоподъемность, повышенные требования к контактной поверхности с захватом перемещаемых изделий, большие габариты и масса |

В результате проведенного анализа применяемой технологической оснастки для перемещения изделий из древесины установлено, что стандартные ГЗУ не полностью удовлетворяют требованиям по обеспечению надежного и качественного (без повреждения кромок) перемещения изделий из древесины, что связано с необходимостью создания и контроля ограниченного усилия прижатия КЭ, и, как следствие, возможностью повреждения лицевой поверхности изделий из древесины.

Рассмотренные варианты устройства ГЗУ не предназначены для качественного перемещения КДК и изделий из древесины. Их применение для перемещения данных видов материалов может привести к образованию дефектов (вмятин, заломов, отслоению покрытия) на контактной поверхности перемещаемого груза, что недопустимо.

Расширение производства КДК и изделий из древесины на промышленных предприятиях вызывает необходимость обоснования и создания новых технических и технологических решений при выполнении грузотранспортных операций с такими изделиями.

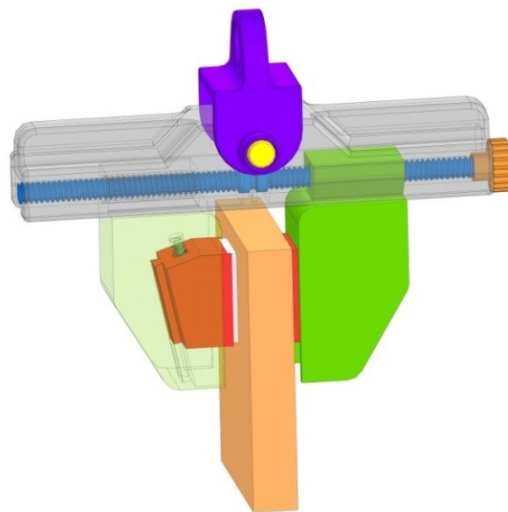
При транспортно-логистических операциях необходимо применять специальные ГЗУ с учетом реологических и анизотропных свойств древесины, что позволит обеспечить надежность и безопасность при выполнении работ. В настоящее время технические решения для перемещения КДК и изделий из древесины практически отсутствуют.

**КЭ ГЗУ с повышенной удерживающей способностью.** Одним из направлений обеспечения надежного и качественного взаимодействия КЭ с поверхностью конструкций из древесины при перемещении может быть применение ГЗУ с ошипованными КЭ [13]. При взаимодействии ошипованных КЭ с поверхностью перемещаемого груза происходит механическое внедрение шипов в древесину, при этом удерживание груза переходит границу триботехнических представлений. Такие ГЗУ обеспечивают высокую надежность при перемещении, но оставляют следы взаимодействия на контактной поверхности древесины, поэтому применение ГЗУ с ошипованными КЭ ограничено определенными требованиями к сохранности лицевой контактной поверхности изделий.

Другим направлением, обеспечивающим высокую надежность перемещения при отсутствии следов взаимодействия на контактной поверхности изделий из древесины, может быть усовершенствование конструкции фрикционных ГЗУ с самозажимными КЭ и улучшенными триботехническими характеристиками.

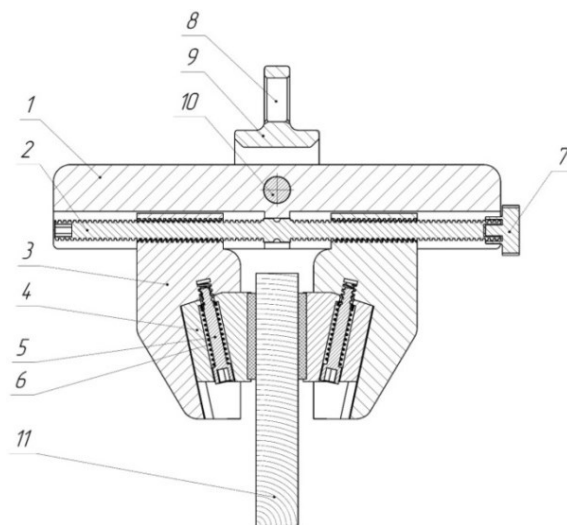
Предложенное техническое решение конструкции ГЗУ (рис. 3) позволяет обеспечить надежное перемещение КДК и изделий из древесины без повреждения кромок и лицевой контактной поверхности перемещаемого груза.

ГЗУ с клиновыми КЭ (рис. 4) включает корпус (1), винт (2) с двумя концевыми участками с правой и левой ходовой самотормозящейся резьбой. Винт вращают с помощью маховичка (7), обеспечивая зеркальное движение ползунов (3), в которые установлены КЭ (4). Задняя поверхность КЭ расположена под углом относительно передней поверхности.



**Рис. 3.** 3Д-модель фрикционного ГЗУ с клиновыми КЭ для перемещения КДК

Перемещение КЭ вниз ограничено возвратной пружиной (6) с крепежным винтом (5). При снятии нагрузки возвратная пружина (6) возвращает КЭ в исходное положение. Для подвешивания на грузоподъемное средство предназначена скоба (9) с проушиной (8), которая шарнирно закреплена в корпусе ГЗУ на оси (10).

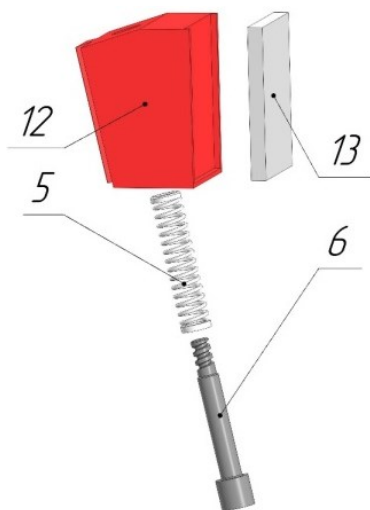


**Рис. 4.** Общий вид фрикционного ГЗУ с клиновыми КЭ: 1 – корпус; 2 – зажимной винт; 3 – ползун; 4 – клиновой контактный элемент; 5 – крепежный винт; 6 – возвратная пружина; 7 – маховичок; 8 – проушина; 9 – скоба; 10 – ось; 11 – изделие из древесины

ГЗУ с разведенными КЭ устанавливают на кромку перемещаемой деревянной конструкции. Зажимным винтом (2) ползуны (3) симметрично сводят и создают контакт упругоподатливой накладки (13) (рис. 5) с поверхностью перемещаемой деревянной конструкции (11), обеспечивая предварительное зажатие груза, при этом происходит фрикционное взаимодействие поверхности упругоподатливой накладки (13) с поверхностью перемещаемого груза. ГЗУ за скобу (9) через проушину (8) подвешивают на крюк грузоподъемного средства и поднимают груз.



При подъеме груза КЭ (4) автоматически за счет фрикционного взаимодействия сопрягаемых поверхностей перемещаются вниз по клиновым направляющим, дополнительно сводятся и дожимают груз с усилием, определяемым весогабаритными характеристиками перемещаемого изделия. Производят перемещение груза, по окончании которого ползуны (3) с КЭ (4) симметрично разводят вращением зажимного винта (2) маховичком (7). При снятии нагрузки возвратные пружины (6) приводят КЭ в исходное положение, контактное взаимодействие с поверхностью груза прекращается.



**Рис. 5.** Клиновый контактный элемент ГЗУ: 5 – крепежный винт; 6 – возвратная пружина; 12 – опорное основание; 13 – накладка из упругоподатливого материала

Достоинством ГЗУ является возможность перемещения плоских и объемных изделий из массивной и клееной древесины размером по толщине от 3 до 120 мм и более.

Для обеспечения надежной работы ГЗУ накладки (13) на опорные основания (12) выполнены из упругоподатливого материала с высокими адгезионными характеристиками, например, резины марки 1Ф-1-ТМКЦ-С-3 [14] (тепломорозокислотощелочестойкая, средней степени твердости, толщиной 3 мм).

Применение резины для накладок на КЭ ГЗУ при взаимодействии с массивной или клееной древесиной связано с рядом достоинств этого материала: высокий коэффициент трения в паре резина-древесина, эластичность, износостойкость, высокие прочностные качества, невысокая стоимость и доступность. При этом проявляется существенный недостаток резины – на контактной поверхности изделий из древесины остаются следы – темные отпечатки (рис. 6). В большинстве случаев резина имеет черный цвет («черная» резина), что объясняется содержанием сажи и диоксида кремния. Эти вещества армируют резину и повышают эксплуатационные свойства: упругость, износостойкость, долговечность и др.

Применение обрезиненных КЭ ограничено жесткими требованиями к изменению внешнего вида лицевой поверхности перемещаемых изделий из массивной и клееной древесины.



**Рис. 6.** Отпечаток на древесине сосны после взаимодействия с накладкой из «черной» резины

Альтернативой «черной» резине может быть силикон – материал без применения в составе сажи, который не оставляет следов на контактной поверхности. Силиконовые резины получают на основе силоксановых (силиконовых, кремнийорганических) каучуков [15]. В качестве наполнителя для армирования и повышения эксплуатационных характеристик в силиконовые резины вводят различные формы кремнезема: аэросилы; белая сажа (силика, осажденный диоксид кремния); диатомиты. Эти наполнители имеют белый или светлый оттенок, который и определяет окраску силиконовой резины. Такая резина не оставляет отпечатков на контактных поверхностях при взаимодействии с древесиной. К достоинствам силиконовой резины дополнительно следует отнести высокие адгезионные свойства и коэффициент трения в паре с древесиной, долговечность, теплостойкость. К недостаткам – более низкие (по сравнению с «черной» резиной), нестабильные прочностные характеристики и высокая стоимость.

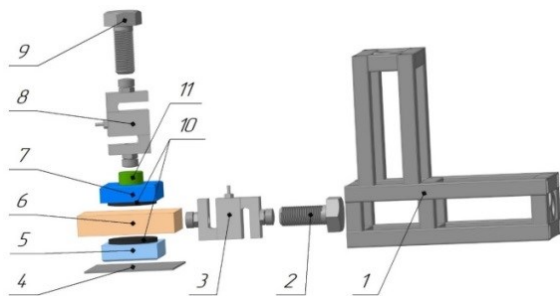
Применение в КЭ ГЗУ силиконовой резины позволяет избежать появления окраски на поверхности древесины. В конструкциях ГЗУ накладки из силиконовой резины практически не применяются, их свойства изучены недостаточно, требуется проведения дополнительных целенаправленных исследований.

Для уточнения взаимодействия КЭ ГЗУ из упругоподатливых материалов с древесиной в условиях переменной нагрузки с учетом реологических и анизотропных свойств древесины выполнены экспериментальные исследования.

Определение коэффициента трения по классической методике на наклонной плоскости по критическому углу трения [16] не позволяет получить полной информации в условиях переменной нагрузки, т. е. при изменении усилия прижатия КЭ. При проведении исследования контактного взаимодействия силиконовых резин с древесиной, определении характера изменения коэффициента трения от величины контактного давления требуется уточнить и определить триботехнические характеристики.

Определение коэффициента трения при разных усилиях прижатия контактных элементов проведено на экспериментальной установке (рис. 7).

Величину коэффициента трения определяли по усилию прижатия КЭ и усилию сдвига. Для этого применяли два электронных тензометрических динамометра.

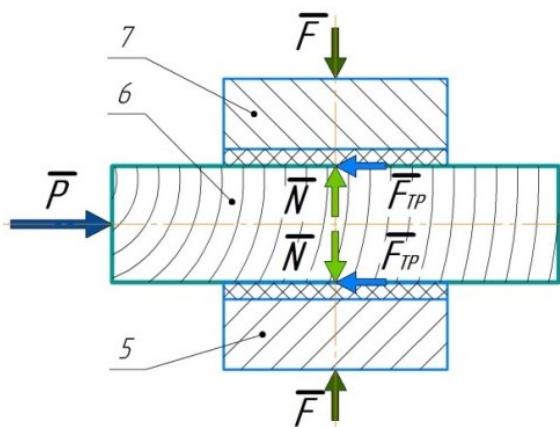


**Рис. 7.** Установка для определения коэффициента трения: 1 – корпус; 2, 9 – винт М24х50; 3 – тензодатчик динамометра № 1; 4 – крышка; 5, 7 – контактный элемент; 6 – образец древесины; 8 – тензодатчик динамометра № 2; 10 – вкладыш из упругоподатливого материала; 11 – толкатель

При определении коэффициента трения применена классическая расчетная схема (рис. 8), тогда:

$$f = \frac{P}{2N}, \quad (1)$$

где  $f$  – коэффициент трения;  $P$  – усилие сдвига;  $N$  – усилие распора (усилие прижатия контактных элементов).



**Рис. 8.** Расчетная схема определения коэффициента трения упругоподатливого материала с поверхностью древесины: 5, 7 – контактный элемент; 6 – образец древесины;  $P$  – усилие сдвига;  $F$  – сила прижатия КЭ;  $F_{тр}$  – сила трения на контактной поверхности,  $N$  – нормальная сила

Усилие распора  $N$  создают вращением винта (9) и измеряют тензодатчиком (8). Усилие сдвига определяют по второму динамометру тензодатчиком (3), это усилие создают вращением горизонтального винта (2). Показания динамометров фиксируют в момент начала сдвига образца древесины (рис. 9).

Для исследования были подготовлены образцы ЛДСП, из древесины сосны и лиственницы с поперечным и продольным расположением волокон, размером 80х60х15 мм. Как отмечено, древесина является материалом с невысокой контактной прочностью и требует деликатного обращения при изменении пространственного положения и перемещении. На надежное и качественное перемещение изделий из массивной и клееной древесины при применении фрикционных ГЗУ оказы-

вает влияние множество различных конструкционных и технологических факторов: контактное давление на поверхности КЭ, твердость, шероховатость и влажность поверхности, направление волокон в массивной древесине, состояние поверхности (наличие загрязнений, наледи, снега и т. п.) и др. Степень влияния каждого фактора может быть от значительной до незначительной. При проведении исследования применена методика полного факторного эксперимента.



**Рис. 9.** Установка для определения коэффициента трения

Выбраны зависимые и независимые переменные. За выходной параметр или отклик, т. е. зависимой переменной, принят коэффициент трения  $f$ , который определяется из отношения усилия сдвига  $P$  к усилию  $N$ .

Входные параметры, которые могут быть оценены количественно и качественно, представляют собой независимые переменные. С одной стороны, они должны оказывать влияние на величину коэффициента трения  $f$ , с другой стороны необходимо иметь возможность управления ими.

В результате анализа проведенных нами ранее разведывательных опытов и исследований других авторов [17, 18], установлены основные факторы, влияющие на величину коэффициента трения  $f$ :

- контактное давление  $q$ ;
- площадь контактной поверхности  $S$ ;
- направление волокон массивной древесины  $Z$ ;
- твердость поверхности перемещаемых изделий  $T$ .

Представленные в табл. 2 факторы выбраны в качестве варьируемых. Оставшиеся факторы признаны незначительными (табл. 3).

**Таблица 2.** Влияние факторов на коэффициент трения

| Фактор                                                  | Тип фактора | Уровень               |                         |
|---------------------------------------------------------|-------------|-----------------------|-------------------------|
|                                                         |             | 1                     | 2                       |
| А: Контактное давление $q$                              | непрерывный | 0,1 Н/мм <sup>2</sup> | 3,5 Н/мм <sup>2</sup>   |
| В: Площадь контактной поверхности $S$                   | непрерывный | 490,9 мм <sup>2</sup> | 1 963,5 мм <sup>2</sup> |
| С: Направление волокон по отношению к усилию сдвига $Z$ | дискретный  | 1 (вдоль)             | 2 (поперек)             |
| Д: Твердость древесины $T$                              | непрерывный | 25 МПа (мягкая)       | 35 МПа (твердая)        |

Уровни независимых факторов установили в зависимости от эксплуатационных наблюдений:

1) Фактор  $A$  – величина контактного давления  $q$  на поверхности КЭ:

$A_{min} = 0,1 \text{ Н/мм}^2$  (-1) – минимальное значение контактного давления;

$A_{max} = 3,5 \text{ Н/мм}^2$  (+1) – максимальное значение контактного давления.

2) Фактор  $B$  – площадь контактной поверхности  $S$ .

$B_{min} = 490,9 \text{ мм}^2$  (-1);

$B_{max} = 1963,5 \text{ мм}^2$  (+1).

Предел изменения фактора  $B$  выбран с учетом того, что для оценки влияния площади контактной поверхности при взаимодействии КЭ и образца древесины проводили испытания на КЭ разных размеров: диаметром 25 мм (площадь контакта  $490,9 \text{ мм}^2$ ) и 50 мм (площадь контакта  $1963,5 \text{ мм}^2$ ).

3) Фактор  $C$  – направление волокон  $Z$ , имеет дискретный характер и может принимать значения:

вдоль волокон  $C_1 = 1$  (-1);

поперек волокон  $C_2 = 2$  (+1).

4) Фактор  $D$  – твердость материала образцов  $T$

$D_{min} = 25 \text{ МПа}$  (-1) – из сосны;

$D_{max} = 35 \text{ МПа}$  (+1) – из лиственницы.

Принята методика регрессионного анализа. Цель регрессионного анализа – это построение корреляционной зависимости, отражающей с заданной точностью закономерность изменения величины коэффициента трения  $f$  от исследуемых факторов, в определенном диапазоне их действия.

Функциональная зависимость между параметром оптимизации  $y$  и исследуемых факторов представлена в степенном виде:

$$y = c \cdot A^\alpha \cdot B^\beta \cdot C^\gamma \cdot D^\delta, \quad (2)$$

где  $c$  – постоянный коэффициент;  $A$  – исследуемый фактор № 1;  $B$  – исследуемый фактор № 2;  $C$  – исследуемый фактор № 3;  $D$  – исследуемый фактор № 4;  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  – показатели степени факторов.

**Таблица 3.** Факторы, не включенные в эксперимент

| Фактор                                    | Причина, по которой фактор не включен в эксперимент                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Температура окружающей среды              | Предусматривается применение ГЗУ в условиях закрытых помещений при положительных температурах. Применение на открытом воздухе в зимний период времени не предусмотрено.                                                                                   |
| Состояние контактной поверхности          | Не может по физической сути существенно влиять на значение исследуемой величины                                                                                                                                                                           |
| Влажность древесины                       | Разведывательные опыты показали, что повышение влажности древесины способствует увеличению коэффициента трения при взаимодействии КЭ из резины и силикона с образцами древесины                                                                           |
| Шероховатость контактной поверхности $Ra$ | Испытания проводили на массивной древесине с параметрами шероховатости $Ra_{3,2} \dots Ra_{6,3}$ [19]. Перемещение гладких изделий ( $< Ra_{0,8}$ ) не предусмотрено, а увеличение параметра шероховатости $Ra$ приведет к увеличению коэффициента трения |

Выбор степенной функции обоснован тем, что позволяет учитывать нелинейное изменение факторов в заданном диапазоне, удобен при математической обработке результатов, а также более корректно устанавливает степень влияния факторов на искомую функциональную зависимость. Эта зависимость представляет собой эмпирическую модель зависимости отклонения отклика от присутствующих факторов.

На основании результатов предварительных опытов составили план-матрицу эксперимента для контактных пар резина – древесина и силикон – древесина (табл. 4).

**Таблица 4.** План-матрица эксперимента по определению коэффициента трения для контактных пар резина – древесина и силикон – древесина

| №  | А   |          | В   |          | С   |          | D   |          | отклик<br>(резина – древесина) |                | отклик<br>(силикон – древесина) |                |
|----|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|--------------------------------|----------------|---------------------------------|----------------|
|    | код | значение | код | значение | код | значение | код | значение | у <sub>1</sub>                 | у <sub>2</sub> | у <sub>1</sub>                  | у <sub>2</sub> |
| 1  | +   | 3,5      | +   | 1963,5   | +   | 2        | +   | 35       | 0,475                          | 0,515          | 0,353                           | 0,356          |
| 2  | –   | 0,1      | +   | 1963,5   | +   | 2        | +   | 35       | 0,921                          | 0,863          | 0,932                           | 0,900          |
| 3  | +   | 3,5      | –   | 490,9    | +   | 2        | +   | 35       | 0,452                          | 0,515          | 0,337                           | 0,356          |
| 4  | –   | 0,1      | –   | 490,9    | +   | 2        | +   | 35       | 0,857                          | 0,863          | 0,765                           | 0,900          |
| 5  | +   | 3,5      | +   | 1963,5   | –   | 1        | +   | 35       | 0,460                          | 0,466          | 0,301                           | 0,310          |
| 6  | –   | 0,1      | +   | 1963,5   | –   | 1        | +   | 35       | 0,872                          | 0,781          | 0,922                           | 0,783          |
| 7  | +   | 3,5      | –   | 490,9    | –   | 1        | +   | 35       | 0,451                          | 0,466          | 0,300                           | 0,310          |
| 8  | –   | 0,1      | –   | 490,9    | –   | 1        | +   | 35       | 0,853                          | 0,781          | 0,852                           | 0,783          |
| 9  | +   | 3,5      | +   | 1963,5   | +   | 2        | –   | 25       | 0,445                          | 0,418          | 0,283                           | 0,291          |
| 10 | –   | 0,1      | +   | 1963,5   | +   | 2        | –   | 25       | 0,732                          | 0,700          | 0,878                           | 0,735          |
| 11 | +   | 3,5      | –   | 490,9    | +   | 2        | –   | 25       | 0,449                          | 0,418          | 0,309                           | 0,291          |
| 12 | –   | 0,1      | –   | 490,9    | +   | 2        | –   | 25       | 0,682                          | 0,700          | 0,719                           | 0,735          |
| 13 | +   | 3,5      | +   | 1963,5   | –   | 1        | –   | 25       | 0,415                          | 0,378          | 0,273                           | 0,253          |
| 14 | –   | 0,1      | +   | 1963,5   | –   | 1        | –   | 25       | 0,603                          | 0,633          | 0,568                           | 0,639          |
| 15 | +   | 3,5      | –   | 490,9    | –   | 1        | –   | 25       | 0,388                          | 0,378          | 0,256                           | 0,253          |
| 16 | –   | 0,1      | –   | 490,9    | –   | 1        | –   | 25       | 0,504                          | 0,633          | 0,545                           | 0,639          |

При определении коэффициента трения в контактной паре силикон-ЛДСП и резина-ЛДСП рассмотрен только один параметр, влияющий на значение коэффициента трения – контактное давление  $q$ .

**Результаты исследования.** Зависимость коэффициента трения от контактного давления для фрикционных пар силикон – ЛДСП и резина – ЛДСП, уравнения регрессии и величины достоверности аппроксимации представлены на рис. 10–12.

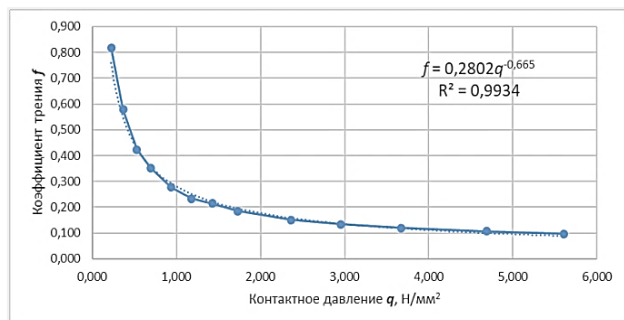


Рис. 10. Коэффициент трения КЭ из силикона с поверхностью ЛДСП

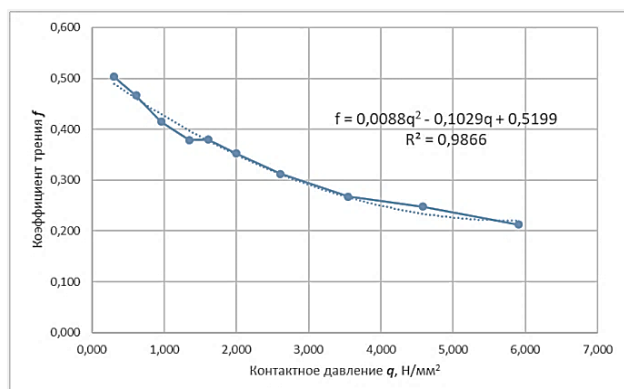


Рис. 11. Коэффициент трения КЭ из резины с поверхностью ЛДСП

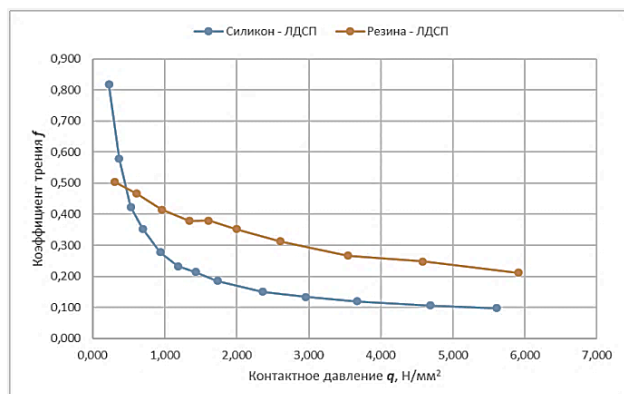


Рис. 12. Сравнительная характеристика коэффициента трения КЭ из упругоподатливых материалов с поверхностью ЛДСП

После статистической обработки результатов испытаний получены целевые функции зависимости коэффициента трения от варьируемых факторов для четырех пар трения упругоподатливых материалов с образцами из древесины и ЛДСП (табл. 5).

Впервые установлены величины коэффициента трения для силиконовой резины с поверхностью ЛДСП

Установлено, что КЭ с силиконовым покрытием при небольших контактных нагрузках проявляют высокие адгезионные свойства, в результате значение коэффициента трения силикона сопоставимо с коэффициентом трения для резины. С увеличением контактного давления коэффициент трения силикона с ЛДСП начинает резко уменьшаться и стремится к значению 0,1 (при контактном давлении 5,5 Н/мм²), что необходимо учитывать при проектировании ГЗУ с КЭ из силиконовой резины.

Таблица 5. Целевые функции зависимости коэффициента трения от варьируемых факторов.

| № | Пара трения                   | Коэффициент трения для пары трения                          |
|---|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1 | Силикон – массивная древесина | $f = 0,0507 \frac{Z^{0,2012} \cdot T^{0,6007}}{q^{0,2608}}$ |
| 2 | Резина – массивная древесина  | $f = 0,0609 \frac{Z^{0,1453} \cdot T^{0,6235}}{q^{0,1452}}$ |
| 3 | Силикон – ЛДСП                | $f = \frac{0,2802}{q^{0,665}}$                              |
| 4 | Резина – ЛДСП                 | $f = 0,0088 \cdot q^2 - 0,1029 \cdot q + 0,5199$            |

Таким образом, для надежного и качественного перемещения изделий из древесины необходимо ограничивать контактное давление на поверхности упругоподатливого КЭ до 1–2 Н/мм².

Рекомендовано применять значения коэффициента трения при максимальном контактном давлении 1 Н/мм²:

- силикон – массивная древесина: 0,4;
- резина – массивная древесина: 0,5;
- силикон – ЛДСП: 0,26;
- резина – ЛДСП: 0,4.

**Заключение.** В результате проведенных исследований можно заключить, что явление адгезии резины и силикона к поверхности древесины проявляется при небольшом контактном давлении ( $< 0,5$  Н/мм²). Особенно заметно это проявляется в паре трения силиконовая резина – ЛДСП. При увеличении контактного давления коэффициент трения снижается, что полностью соответствует моделям контактного взаимодействия, предложенным И.В. Крагельским [20]. При проектировании фрикционных ГЗУ для перемещения изделий из ЛДСП с КЭ из силиконовой резины рекомендуется применять величину коэффициента трения не более 0,26.



*Литература*

- Guenther R., Tajmar M., Bach Ch. (2024). Wood and Wood-Based Materials in Space Applications – A Literature Review of Use Cases // Challenges and Potential. Aerospace. 2024. Vol. 11. P. 910. DOI:10.3390/aerospace11110910
- Mpele M., Abouar B., Okpwe Mbarga R. Recovering wood wastes for potential use in building // World Journ. of Advanced Engineering Technology and Sciences. 2024. Vol. 12. P. 318-331. DOI:10.30574/wjaets.2024.12.2.0298
- Chudzińska A., Orchowska A., Hassan S., Adebayo O. Contemporary possibilities for the use of reclaimed wood in interior design // Architecture of Challenges – Materials for the Future. 2024. № 6. P. 120-121.
- Mao Y., Hu L., Ren Z.J. Engineered wood for a sustainable future // Matter. 2022. Vol. 5 (5). P. 1326-1329.
- Bayat M. Types of Engineered Wood and Their Uses // Current Applications of Engineered Wood. 2023. DOI: 10.5772/intechopen.107739
- Olorunnisola A. Uses of Wood and Wood Products in Construction // Design of Structural Elements with Tropical Hardwoods. 2018. № 9. P. 71-92. DOI:10.1007/978-3-319-65343-3\_5
- Послание Путина Федеральному собранию 29 февраля. Главное. [Электронный ресурс]. <https://iz.ru/1657543/2024-02-29/poslanie-putina-federalnomu-sobraniuu-29-fevralia-glavnoe> (дата обращения 12.11.24).
- Платов С.А. Анализ современных технологий клееных деревянных конструкций (КДК) // Междунар. журнал прикладных наук и технологий Integral. 2020. № 3. С. 35. EDN RPKZDQ.
- ГОСТ 32289–2013 Плиты древесно-стружечные, облицованные пленками на основе термореактивных полимеров. Технические условия [Текст]. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 23 с.
- Никифоров Е.П. Клееная древесина: технология изготовления, свойства, преимущества и недостатки, области применения // Современные научные исследования и инновации. 2019. № 7(99). С. 6. EDN TVDZCD.
- YongFu W., JiYe Hu. Research on Logistics Cost Management Strategy for Wood Processing Industry Based on Environmentally Conscious Supply Chain // Revista de Gestão Social e Ambiental. 2024. Vol. 18. P. e05711. DOI:10.24857/rgsa.v18n1-114
- Wang Q., Wang Z., Feng X., Zhao Y., Li Z. Mechanical properties and probabilistic models of wood and engineered wood products: A review of green construction materials // Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 21. P. e03796. DOI:10.1016/j.cscm.2024.e03796
- Дужевский И.А., Мелехов В.И., Бабкин А.И. Экспериментальное определение несущей способности ошипованных контактных элементов при перемещении конструкций из древесины // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 3(63). С. 159-166. DOI:10.18324/2077-5415-2024-3-159-166
- ГОСТ 7338-90 Пластины резиновые и резинотканевые. Технические условия [Текст]. Введ. 1991-07-01. М.: Стандартинформ, 2005. 27 с.
- Силиконовая резина. [Электронный ресурс]. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Силиконовая\\_резина](https://ru.wikipedia.org/wiki/Силиконовая_резина), свободный (дата обращения 01.12.2024).
- Руденко А.В., Дужевский И.А. Повышение надежности фрикционных грузозахватных устройств при перемещении изделий из древесины // Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ. Сб. материалов II Всеросс. науч.-практич. конф. М.: Мин. науки и высшего образования РФ, Изд-во Северного (Арктического) федерал. ун-та, 2021. С. 20-23.
- Бабкин А.И. Совершенствование фрикционных грузозахватных устройств для перемещения деревянных конструкций: дисс. ... канд. технич. наук. Архангельск, 2018. 174 с. EDN FUNSTC.
- Морозов А.С. Повышение эффективности технологического оснащения погрузочных и монтажных работ в судостроении и судоремонте: дисс. ... канд. технич. наук. Санкт-Петербург, 2009. 151 с. EDN QEIZQF.
- ГОСТ 7016–2013. Изделия из древесины и древесных материалов. Параметры шероховатости поверхности [Текст]. Введ. 2014-01-01. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.
- Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. Кн. 1. М.: Машиностроение, 1978. 400 с.

*References*

- Guenther R., Tajmar M., Bach Ch. (2024). Wood and Wood-Based Materials in Space Applications – A Literature Review of Use Cases // Challenges and Potential. Aerospace. 2024. Vol. 11. P. 910. DOI:10.3390/aerospace11110910
- Mpele M., Abouar B., Okpwe Mbarga R. Recovering wood wastes for potential use in building // World Journ. of Advanced Engineering Technology and Sciences. 2024. Vol. 12. P. 318-331. DOI:10.30574/wjaets.2024.12.2.0298
- Chudzińska A., Orchowska A., Hassan S., Adebayo O. Contemporary possibilities for the use of reclaimed wood in interior design // Architecture of Challenges – Materials for the Future. 2024. № 6. P. 120-121.
- Mao Y., Hu L., Ren Z.J. Engineered wood for a sustainable future // Matter. 2022. Vol. 5 (5). P. 1326-1329.
- Bayat M. Types of Engineered Wood and Their Uses // Current Applications of Engineered Wood. 2023. DOI: 10.5772/intechopen.107739
- Olorunnisola A. Uses of Wood and Wood Products in Construction // Design of Structural Elements with Tropical Hardwoods. 2018. № 9. P. 71-92. DOI:10.1007/978-3-319-65343-3\_5
- Putin's Address to the Federal Assembly on February 29. The main thing. [Electronic resource]. <https://iz.ru/1657543/2024-02-29/poslanie-putina-federalnomu-sobraniuu-29-fevralia-glavnoe> (date of address 12.11.24).
- Platov S.A. Analysis of modern technologies of glued wooden structures (GWS) // Intern. journ. of applied sciences and technologies Integral. 2020. № 3. С. 35. EDN RPKZDQ.
- State Standard 32289-2013 Wood particleboards lined with films based on thermosetting polymers. Technical conditions [Text]. Introduction 2014-07-01. Moscow: Stan-standartinform, 2014. 23 p.
- Nikiforov E.P. Glued wood: manufacturing technology, properties, advantages and disadvantages, areas of application // Modern Scientific Research and Innovations. 2019. № 7(99). С. 6. EDN TVDZCD.
- YongFu W., JiYe Hu. Research on Logistics Cost Management Strategy for Wood Processing Industry Based on Environmentally Conscious Supply Chain Social e Ambiental. 2024. Vol. 18. P. e05711. DOI:10.24857/rgsa.v18n1-114
- Wang Q., Wang Z., Feng X., Zhao Y., Li Z. Mechanical properties and probabilistic models of wood and engineered wood products: A review of green construction materials // Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 21. P. e03796. DOI:10.1016/j.cscm.2024.e03796
- Duzhevskiy I.A., Melekhov V.I., Babkin A.I. Experimental determination of the bearing capacity of the mistaken contact elements at the displacement of the wood structures // Sys-

- tems. Methods. Technologies. 2024. № 3(63). P. 159-166. DOI:10.18324/2077-5415-2024-3-159-166
14. State standard 7338-90 Rubber and rubber-fabric plates. Technical conditions [Text]. Introduction 1991-07-01. Moscow: Standardinform, 2005. 27 c.
15. Silicone rubber. [Electronic resource]. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Силиконовая\\_резина](https://ru.wikipedia.org/wiki/Силиконовая_резина), free (date of address 01.12.2024).
16. Rudenko A.V., Duzhevskiy I.A. Increasing the reliability of friction load-capturing devices when moving wood products // Actual issues of innovation development of the Arctic region of the Russian Federation. Collection of materials of the II All-Russian scientific-practical conference. Moscow: Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Northern (Arctic) Federal University, 2021. C. 20-23.
17. Babkin A.I. Perfection of friction cargo-gripping devices for moving wooden constructions: dissertation ... candidate of technical sciences. Arkhangelsk, 2018. 174 p. EDN FUNSTC.
18. Morozov A.S. Increase of efficiency of technological equipment of loading and assembly works in shipbuilding and ship-repair: dissertation ... candidate of technical sciences. St. Petersburg, 2009. 151 p. EDN QEIZQF.
19. State Standard 7016-2013. Products made of wood and wood-based materials. Parameters of surface roughness [Text]. Introduction 2014-01-01. Moscow: Standardinform, 2014. 16 p.
20. Friction, wear and lubrication: Reference book. In 2 books / Edited by I.V. Kragelsky, V.V. Alisin. Alisina. Book 1. Moscow: Mashinostroenie, 1978. 400 p.