

На правах рукописи



**ОРЛОВ
АЛЕКСАНДР ОЛЕГОВИЧ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ
ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность 05.21.05 – Древесиноведение, технология и
оборудование деревопереработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Архангельск

2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

Научные руководители: **Морозов Владимир Станиславович**
доктор технических наук, профессор
Лабудин Борис Васильевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Тамби Александр Алексеевич**
доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», кафедра технологии и оборудования лесного комплекса, профессор
Бызов Виктор Евгеньевич
кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра металлических и деревянных конструкций, доцент

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова».

Защита диссертации состоится «12» декабря 2019 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.008.01, созданного на базе ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» по адресу: 163002, г. Архангельск, наб. Сев. Двины, 17, ауд. 1220.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» и на сайте www.narfu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н.



Тюрикова Татьяна
Витальевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Древесина и деревокомпозитные материалы широко применяют в современном домостроении. Древесина представляет собой экологически чистый возобновляемый материал с высокими удельными физико-механическими характеристиками. Стандартные конструктивные решения узловых соединений и элементов не предусматривают возможности применения новых материалов и современных технических решений, позволяющих повысить прочностные и деформационные характеристики соединений. Поэтому необходимо провести исследования по совершенствованию узлов элементов из древесины и деревокомпозитных материалов с разработкой новых видов соединений. Следовательно, проведенные исследования в этом направлении являются актуальными.

Объект исследования: Узловое соединение элементов деревянных конструкций

Предмет исследования: напряженно-деформированное состояние (НДС) узловых соединений стержневых деревокомпозитных конструкции (ДКК) с оценкой прочности, жесткости и сдвигоустойчивости.

Область исследования соответствует требованию паспорта научной специальности ВАК РФ 05.21.05 – «Древесиноведение, технология и оборудование деревопереработки» пп. 1, 2, 4.

Цель работы – совершенствование узловых соединений элементов деревянных конструкций с применением зубчатых пластин (когтевых коннекторов).

Для достижения цели определены задачи:

1. Провести анализ технических решений узловых соединений деревянных конструкций;
2. Разработать уточненную математическую модель взаимодействия зубчатого элемента коннектора с древесиной;
3. Разработать методику экспериментальных исследований поведения зубчатого элемента коннектора в зоне контакта его с древесиной;
4. Уточнить зависимости геометрических характеристик зубчатых элементов и несущей способностью соединения;
5. Определить взаимосвязь зубчатых элементов на несущую способность соединения с учетом анизотропных свойств древесины;
6. Исследовать влияния количества зубьев коннектора на прочность соединения с древесиной в зоне контакта;
7. Выполнить компьютерный анализ напряженно-деформированного состояния узлового соединения в зоне контакта.

Научная новизна результатов исследования:

– разработана математическая модель взаимодействия элементов узлового соединения с учетом анизотропных свойств древесины;

– определены параметрические зависимости прочности и деформативности узловых соединений деревянных элементов с различными характеристиками коннектора;

– установлены новые характеристики прочности, жесткости и сдвигоустойчивости элементов узлового соединения с коннектором.

Практическая значимость работы.

Разработаны конструктивные решения эффективных узловых соединений деревянных элементов с когтевыми коннекторами. Результаты исследований могут быть использованы при изготовлении элементов узлов деревянных конструкций, разработке нормативных документов, алгоритмов расчета, в практике проектирования и учебном процессе.

Методы исследований.

При проведении теоретических исследований использованы методы математического анализа, строительной механики, теории упругости и пластичности анизотропных тел. Численные исследования проведены методом конечных элементов в среде Ansys Workbench 15.0. Экспериментальные исследования выполнены с применением методов планирования эксперимента, математической обработки результатов, методик численного и натурного эксперимента.

Достоверность результатов исследований обеспечивается корректными допущениями при замене реальных процессов математическими моделями, приемлемым совпадением результатов теоретических и экспериментальных исследований, подтверждается решением задач в соответствии с классическими гипотезами и допущениями строительной механики и теории упругости анизотропных тел, использованием лицензионного расчетного программного комплекса ANSYS и современного аттестованного измерительно-вычислительного оборудования.

На защиту выносятся:

– результаты теоретических и экспериментальных исследований элементов узловых соединений на когтевых коннекторах для деревянных конструкций;

– уточненная расчетная математическая модель взаимодействия элементов узлового соединения древесины и коннектора;

– конечно-элементные параметрические модели взаимодействия коннектора и древесины;

– методика прочностного и деформационного расчета элементов узловых соединений деревокомпозитных конструкций с учетом анизотропии материалов и податливости соединений.

Личный вклад автора заключается в проведении аналитического обзора исследований по направлению диссертационной работы, формулировке цели и задач, разработке математических и конечно-элементных моделей узловых соединений, разработке методики проведения исследований, создании экспериментальной установки, проведении теоретических и экспериментальных

исследований, обработке и анализе результатов, подготовке публикаций по теме исследования.

Реализация результатов работы.

Результаты выполненных исследований переданы в АО «НИЦ «Строительство» Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) имени В.А. Кучеренко, «НПиПКЦ «АРМ»

Апробация результатов.

Основные положения работы представлены на международной научно-практической конференции «Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы» (г. Самара, 2015 г.), на международной научно-практической конференции «Наука третьего тысячелетия» (г. Курган, 2016 г.) на международной научно-технической конференции «Строительная наука XXI век: теория, образование, практика, инновации северо-арктическому региону» (г. Архангельск, 2016г.), на научной конференции «Развитие Северо-Арктического региона: проблемы и решения» (г. Архангельск, 2016г.), на международной научно-технической конференции «Строительная наука XXI век: теория, образование, практика, инновации северо-арктическому региону» (г. Архангельск, 2017 г.).

Публикации.

По результатам научных исследований опубликовано 11 печатных работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 – Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, библиографического списка, изложена на 137 страницах, содержит 76 рисунков, 22 таблицы, 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, приведены основные положения диссертации, выносимые на защиту, отражены актуальность и научная новизна.

В **первой главе** выполнен анализ конструктивных и технологических решений узловых соединений деревянных конструкций, отмечен мировой опыт проектирования стержневых конструкций из древокомпозитных материалов, рассмотрены разновидности узловых соединений.

Древесина – уникальный возобновляемый природный материал, использующийся на протяжении многих веков, практически во всех сферах человеческой деятельности. Исследованием физико-механических свойств древесины и древокомпозитных материалов занимались: Е.К. Ашкенази, Ф.П. Белянкин, С.И. Ванин, В.Н. Глухих, А.Б. Губенко, Д.И. Журавский, В.И. Жаданов, Е.М. Знаменский, А.М. Иванов, Ю.М. Иванов, И.С. Инжутов, А.В. Калугин, Г.Г. Карлсен, Л.М. Ковальчук, А.М. Копейкин, Б.В. Лабудин, Н.Л. Леонтьев, В.И. Мелехов, А.Н. Митинский, Р.Б. Орлович, Л.М. Перелыгин, С.Н. Пластинин, А.Д. Платонов, А.А., Погорельцев, К.П. Пятикрестовский, С.И. Рощина, Е.И. Савков,

Е.И. Светозарова, Е.Н. Серов, Ю.В. Слицкоухов, А.А. Тамби, В.И. Травуш, А.В. Турков, С.Б. Турковский, Б.Н. Уголев, В.М. Хрулев, П.Н. Хухрянский, А.Г. Черных, А.Н. Чубинский, P. Aune, R.L. Hankinson, B.O. Nilson, A. Meyer, T. Möller, M. Patton-Mallory и др.

Применения современных деревокомпозитных конструкционных материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками (КДК, LVL, CLT, OSB др.) позволяют разрабатывать новые конструктивные решения стержневых конструкций.

Результаты исследований соединений элементов деревянных и деревокомпозитных конструкций приведены в работах Б.В. Лабудина, Е.В. Попова. В исследованиях А.В. Карельского приведены технологические решения и рекомендации по усилению клееных деревянных конструкций с металлическими зубчатыми пластинами. Е.В. Даниловым изложены рекомендации по развитию методов расчета соединений деревянных конструкций с когтевыми шайбами в LVL.

Для обеспечения надежной работы узловых соединений деревянных конструкций применяются различные виды соединений: клеенные и ввинченные стержни, нагельные группы, зубчатые пластины, зубчатые шпонки, клей и др. Широкое применение получили соединения на упруго-деформируемых связях. Вопросами исследования соединений деревянных конструкций занимались П.А. Дмитриев, В.М. Коченов, В.Г. Леннов, Г.В. Никитин, Г.Г. Никитин, Ю.В. Пискунов, П.Н. Смирнов, С.Б. Турковский, K.W. Johansen, G. Pirnbacher, H. Riberholt и др.

Учитывая результаты этих ученых, одним из наиболее рациональных типов соединителей для узловых соединений стержневых конструкций из древесины и деревокомпозитных материалов являются когтевые коннекторы, в том числе типа «Bulldog» и Леннова.

К недостаткам когтевых коннекторов можно отнести небольшие размеры зубьев, которые в случае усушки могут выйти из гнезд; прорезание зубьями волокон древесины приводит к ослаблению древесины и соединения в целом; необходимость определенных требований к процессу запрессовки с целью предотвращения изгиба зубьев и др.

Вышеперечисленные недостатки связаны в основном с взаимодействием зубьев когтевого соединителя и древесины. Недостаточная изученность работы зубьев, влияние их геометрических характеристик на несущую способность соединителя (коннектора), степень вовлеченности зубьев в работу соединителя и характер их работы в зоне контакта с древесиной являются актуальными, требующими проведения новых исследований.

Во **второй главе** рассмотрены методы определения несущей способности стержневых деревянных конструкций и узловых соединений. Древесина, в том числе и клееная, принята как анизотропная (транстропная) среда. Математическая модель деформации зуба (когтя) коннектора в упруго-вязко-пластичном теле

может быть представлена в общем виде:

$$Y(x, t) = c_{11}z_{11}(x, t)(H(x) - H(x - l_1)) + c_{12}z_{12}(x, t)(H(x - l_1) - H(x - l_1 - l_2)) + c_{13}z_{13}(x, t)(H(x - l_1 - l_2) - H(x - l_2 - 2l_1)) \quad (1)$$

где $H(x - x_1)f(x)$ – функция Хэвисайда; l_1, l_2 – глубина внедрения зуба (когтя) в древесине; z_{ij} – балочная функция Крылова; c_{1j} – коэффициент постели.

При нахождении решения уравнения (1) необходимо, чтобы удовлетворялись граничные условия:

$$\sigma_{см} = \frac{q_{см}}{d_{см}} = \frac{d^4 y}{dx^4} \frac{EI}{d_{см}} < R_{см}^{дл}, \quad (2)$$

$$Y(x, t) \leq \delta_{пред}. \quad (3)$$

где $R_{см}^{дл}$ – величины временного и длительного сопротивления смятию древесины под соответствующим углом к волокнам при действии цилиндрическим штампом;

$\delta_{пред}$ – предельно допустимое смещение (податливость) в узле, равное 1,5 мм, нормируемое СП.

Рассмотрена математическая модель работы зубьев (когтей) коннектора в зависимости от угла внедрения в древесину. На рис. 1 приведены варианты расположения зуба (когтя) коннектора к направлению приложения вектора усилия N .

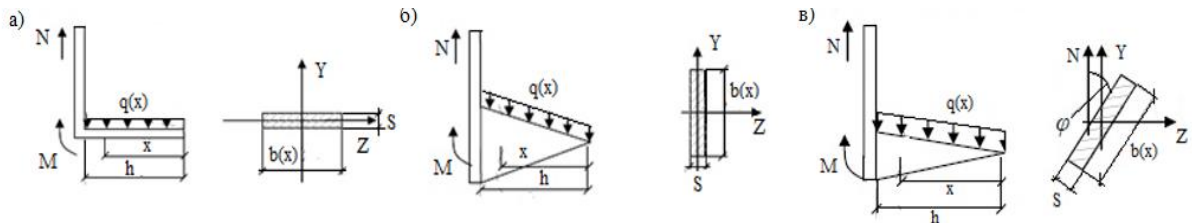


Рисунок 1 - Схемы для расчета когтя коннектора под углом φ к направлению приложения вектора усилия N : а) $\varphi=0^\circ$; б) $\varphi=90^\circ$; в) $\varphi=0^\circ \dots 90^\circ$

Для описания вязко-упругих свойств элементов коннектора использовано уравнение Работнова Ю.Н., в котором нелинейность зависимостей факторов $p(x, t), K(t, \tau)$ учитывается за счет формы кривой мгновенного деформирования:

$$c \cdot y(x, t) = p(x, t) + \int_0^t p(x, t)K(t, \tau)d\tau, \quad (4)$$

где c – коэффициент постели от действия цилиндрического штампа; $p(x, t)$ – реакция постели в гнезде нагеля; $K(t, \tau)$ – наследственное ядро уравнения ползучести.

Работы треугольного зуба с учетом длительности загрузки и угла приложения нагрузки описывается уравнениями (6а, 6б), при $p(x, t)=const$, с учетом (5):

$$xy^{IV} + 2y''' + \frac{c_x y}{EI(x)} = 0. \quad (5)$$

Получим, для угла 0° :

$$EI(x)\{2y'''(x, t) + xy^{IV}(x, t)\} + c_x y(x, t) + \int_{t_0}^t EI(x)\{2y'''(x, t) + xy^{IV}(x, t)\}K_0(t - \tau)d\tau = 0; \quad (6a)$$

для угла 90° :

$$c_{x+90}z(x, t) + EI(x)\{z'''x^3 + 6z'''x^2 + 6z''x\} + \int_0^t EI(x)\{z'''x^3 + 6z'''x^2 + 6z''x\}K_0(t - \tau)d\tau = 0. \quad (6б)$$

Для случаев расположения зубьев для промежуточных углов по отношению к направлению действия нагрузки (кроме 0° и 90°) необходимо решать систему из двух уравнений (6а, 6б).

Для определения жесткости соединения древесина-древесина с когтевыми коннекторами различного диаметра предложена расчетная модель в ANSYS.

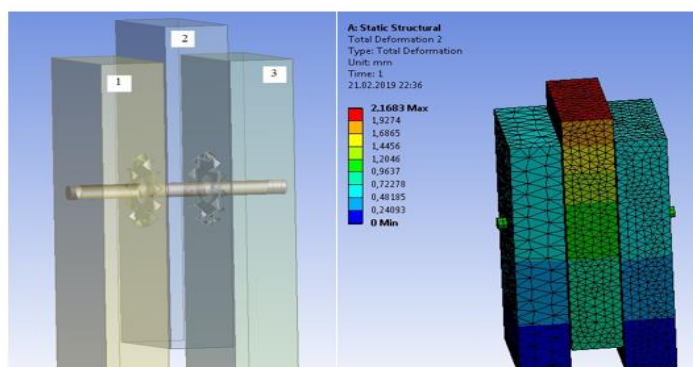
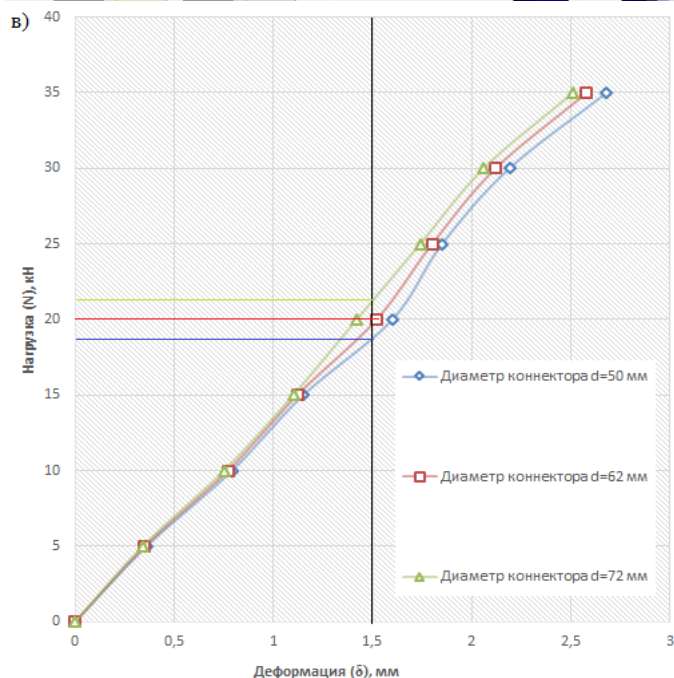


Рисунок 2 – Сдвиговые деформации соединения

древесина-древесина:

- а) трехмерная модель двухсрезного соединения;
- б) мозаика распределения деформаций;
- в) зависимость $\delta=f(N)$



По результатам

исследования получены значения коэффициентов жесткости узлового соединения ($C = N/\delta$), их зависимости от диаметра когтевого коннектора ($C_1/C_2, C_2/C_3, C_1/C_3$).

Эти коэффициенты были использованы в дальнейшем при анализе полученных экспериментальных результатов исследования деформативности узлов соединений.

В третьей главе приведена методика и результаты испытаний на сдвиг образцов соединений древесина-древесина с когтевыми

коннекторами «Bulldog». Дано описание методики эксперимента испытательной установки и аппаратного сопровождения. Лабораторные испытания на промежуточный сдвиг приведены согласно методике ЦНИИСК. В качестве образцов для испытания приняты составные пакеты из конструкционных пиломатериалов I сорта, по ГОСТ 16483.0-89. Испытывались два вида соединений:

односрезные и двухсрезные с промежуточным «срезом», где термин срез - понятие условное (рис. 3, 4).

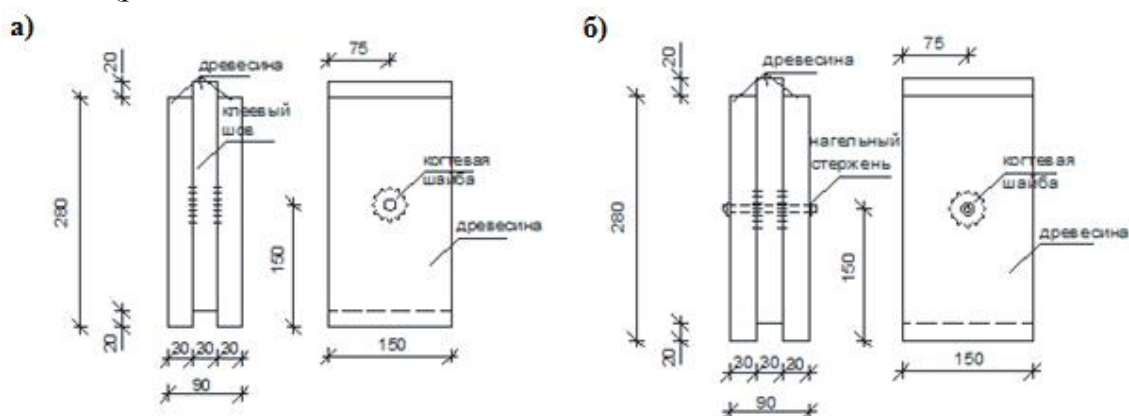


Рисунок 3 – Схема двухсрезного образца: а) с когтевым коннектором и швом из клея; б) с когтевым коннектором и нагельным стержнем

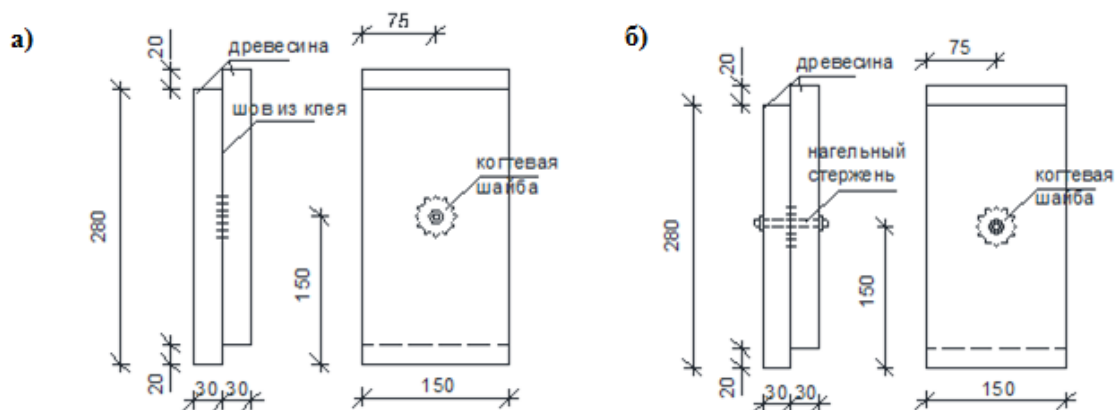


Рисунок 4 – Схема односрезного образца: а) с когтевым коннектором и швом из клея; б) с когтевым коннектором и нагельным стержнем

Рассмотрено два варианта исполнения соединения элементов: 1) с запрессованным когтевым коннектором и клеевой прослойкой; 2) с запрессованным когтевым коннектором и стальным нагельным стержнем. При проведении разведочных (предварительных) испытаний образцов до разрушения нагрузка прикладывалась ступенями с шагом 5 кН и измерялись сдвиговые деформации δ на каждой ступени. При достижении разрушающей нагрузки N , измерялось время разрушения t .

Испытания представленных вариантов соединений выполнены по методике ЦНИИСК и представлены на рис. 5.

Сравнение результатов показали, что для соединения “когтевой коннектор+клей” прочность увеличивается (при $\delta = 1$ мм) примерно на 30%, а деформативность уменьшается (при $N = 30$ кН) примерно на 50%, что также представлено на рис. 5 в виде условных диаграмм.

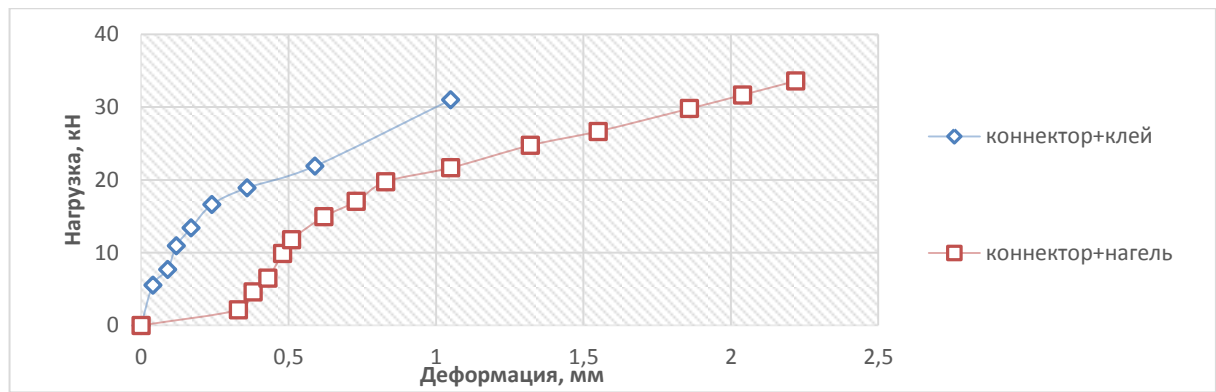


Рисунок 5 – Зависимость нагрузка-деформация для соединения «когтевой коннектор + нагель», «когтевой коннектор + клей»

Для повышения достоверности и эффективности экспериментальных исследований выполнено планирование эксперимента. Принят многофакторный метод планирования, входными параметрами которого являются три фактора: X_1 – количество срезов; X_2 – тип связей модели; X_3 – диаметр коннектора. Первым выходным параметром назначается величина разрушающей нагрузки N_t , вторым – величина деформативности δ_t .

В каждом случае эксперимент содержит 3 фактора, каждый из которых реализуется на трех уровнях. Количество параллельных опытов – 3.

Уравнения регрессии, полученные в ходе проведения статистической обработки экспериментальных результатов, имеют следующий вид:

$$N_t = 36,16 + 8,35X_1 - 2,91X_2 + 5,77X_3 + 1,53X_1X_2 + 1,33X_1X_3 + 1,06X_2X_3;$$

$$\delta_t = 1,89 + 0,17X_1 + 0,65X_2 + 0,49X_1X_2. \quad (7)$$

Сравнение результатов эксперимента с данными компьютерного моделирования приведены на рис. 6. Возможность моделирования рассматриваемых деревянных стержневых конструкций на механических связях по методу конечных элементов являются корректными, так как расхождение между расчетным и численным значение находятся в пределах 1..7%.

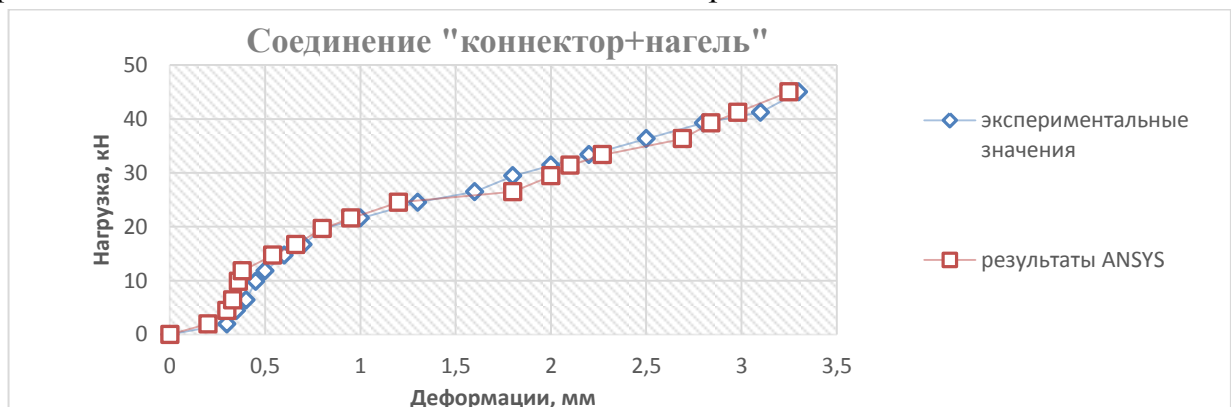


Рисунок 6 - Деформация соединения на когтевых коннекторах

По результатам испытаний установлено, что соединения с двусторонними коннекторами «Bulldog» диаметром 50 и 62 мм целесообразно использовать в качестве элементов, обеспечивающих повышенное сопротивление сдвигу узловых соединений стержневых конструкций (фермы, рамы, стойки и пр.) (до 50%).

Соединение, состоящие из когтевого коннектора и клея обладают меньшей податливостью (до 30%), чем соединения, состоящее из когтевого коннектора и нагельного стержня. Однако их использование будет не целесообразным из-за различной жесткости (податливости). В условиях сильно переменного температурно-влажностного эксплуатационного режима.

В четвертой главе приводится компьютерный (численный) расчет напряженно-деформированного состояния узловых соединений элементов деревянных конструкций в ANSYS.

Целью компьютерного расчета является уточнение зависимости геометрических и пространственных характеристик зубчатых элементов и несущей способности соединений.

С помощью программного комплекса ANSYS исследуем зависимость прочностных характеристик когтевого коннектора для двух наиболее значимых факторов: X_1 – угол острия зуба; X_2 – угол расположения зубьев к волокнам.

Выходными параметрами будут: σ_1 – напряжения в металле коннектора, МПа; σ_2 – напряжения в зоне контакта коннектора и древесины, МПа; δ – деформация податливости соединения, мм. Угол острия зуба варьируем на 5-и уровнях, угол расположения части пластины по отношению к волокнам на 3-х. К образцам прикладывается ступенчатая нагрузка. Шаг ступени 0,2 кН.

Исследования проводили для односрезного случая. Анализируемая модель представлена на рис. 7.

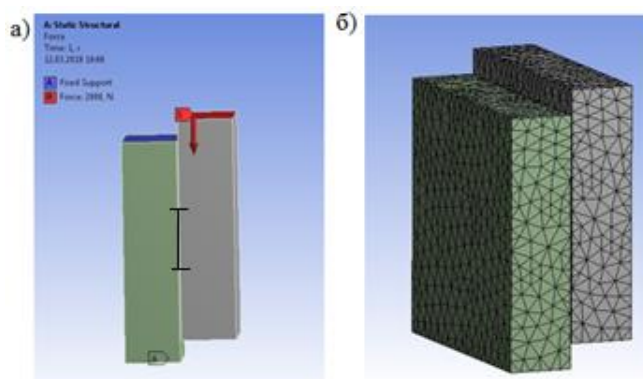


Рисунок 7 – Модель численного эксперимента: а) схема нагрузок образца; б) конечно-элементная разбивка образцов

Угол заострения зуба принимает значения от 30° до 90° с шагом 15° (рис. 8).

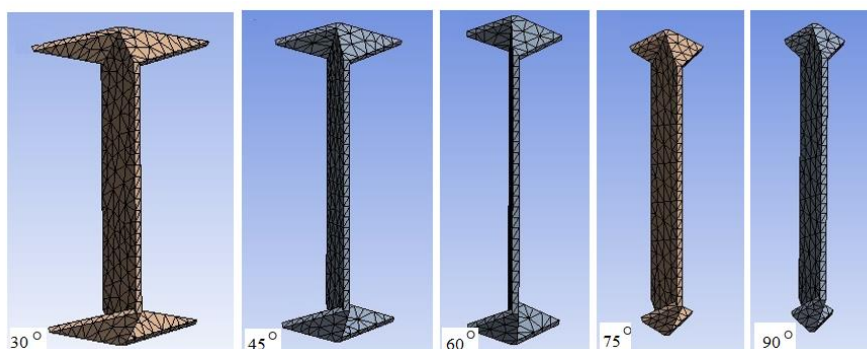


Рисунок 8 - Фрагмент металлической пластины с различным углом заострения зуба

Расположение фрагмента коннектора относительно волокон древесины представлено на рис. 9.

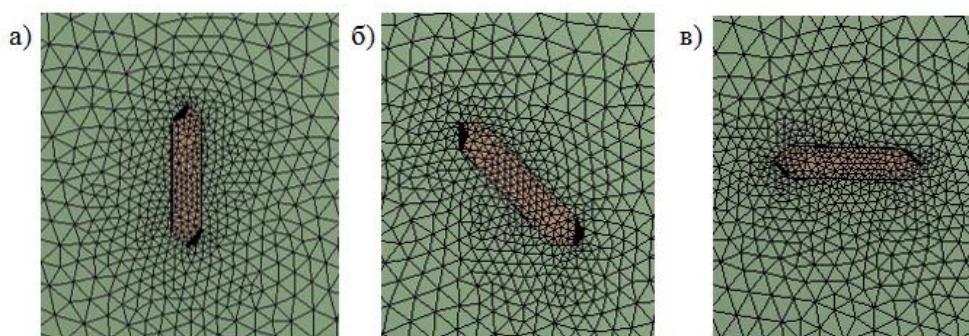


Рисунок 9 – Сетка конечных элементов на границе древесина - фрагмент коннектора под различными углами зуба и волокон древесины, α : а) $\alpha=0^\circ$; б) $\alpha=45^\circ$; в) $\alpha=90^\circ$.

Результаты численного расчета с полученными значениями нормальных напряжений в зубе и древесине представлены на рис. 10, 11. Наибольший интерес представляют нормальные напряжения в сжатой зоне фрагмента пластины и древесины.

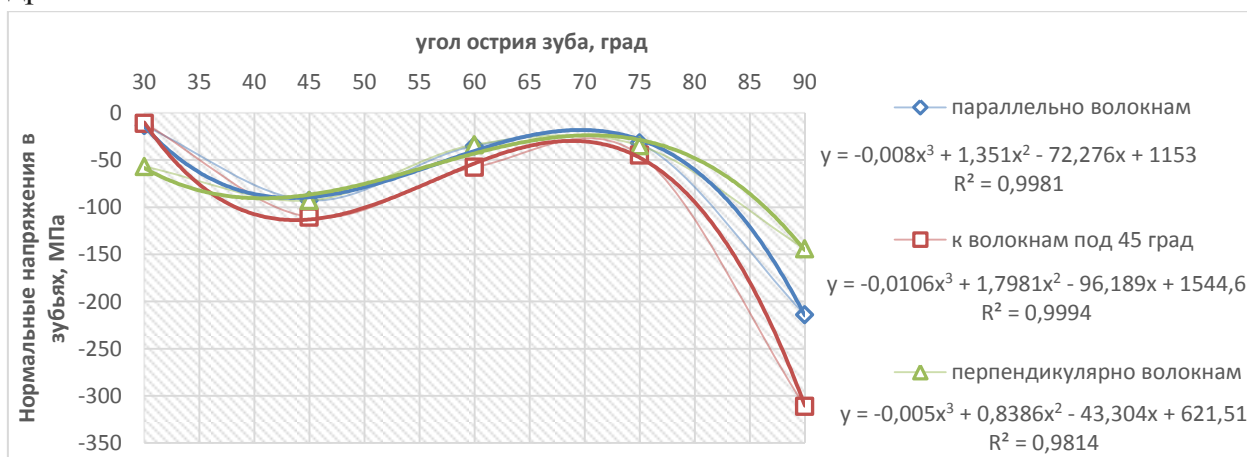


Рисунок 10 – Зависимость нормальных напряжений, возникающих в металлическом фрагменте пластины от угла расположения зуба пластины к волокнам при $N=2\text{кН}$

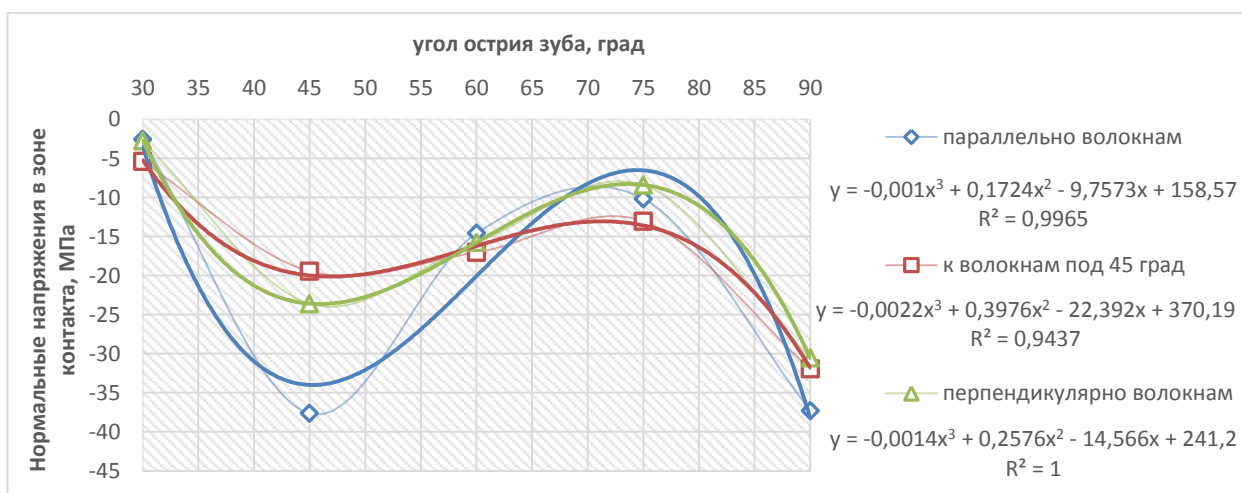


Рисунок 11 – Зависимость нормальных напряжений, возникающих в зоне контакта фрагмента пластины и древесины от угла расположения пластины к волокнам при $N=2\text{кН}$

Из графиков видно, что наименьшие значения нормальных сжимающих напряжений характерны для углов заострения зуба 30°, 60°, 75°. Однако, коннектор с углом острия зуба 30° наиболее трудоемок в изготовлении, так как штамповку такого коннектора из одного листа стали затрудняет размер зуба. Такой коннектор придется изготавливать поэтапно, используя сварку зуба с пластиной, что снизит качество соединителя. Поэтому, наиболее целесообразным и эффективным является элемент коннектора (зуб) с углом заострения 60°...75°.

Рассмотрена работа целого коннектора с различными углами заострения зубьев в односрезном соединении (рис. 12). Зубья коннектора имеют те же самые углы заострения и геометрические характеристики, что и у вышерассмотренных фрагментов стальных коннекторов на рис. 8.

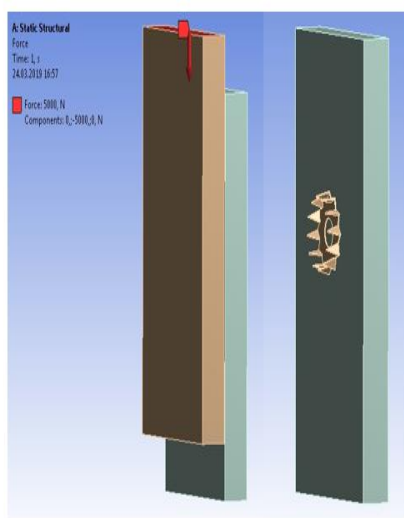


Рисунок 12 - Расчетная модель односрезного соединения

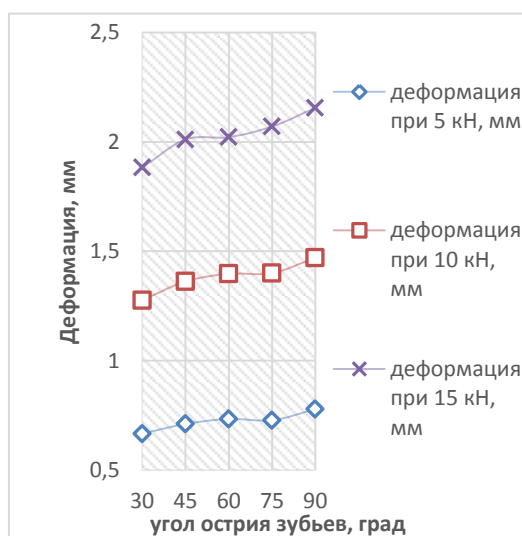


Рисунок 13 - Зависимость деформации соединения от угла заострения зубьев коннектора

Рассматриваемое соединение нагружается ступенями 5, 10, 15 кН. Работа соединения с различными коннекторами анализируется по деформативности соединения (рис. 13). Численные исследования несущей способности соединения на когтевых шайбах по деформациям приведены на рис. 14.

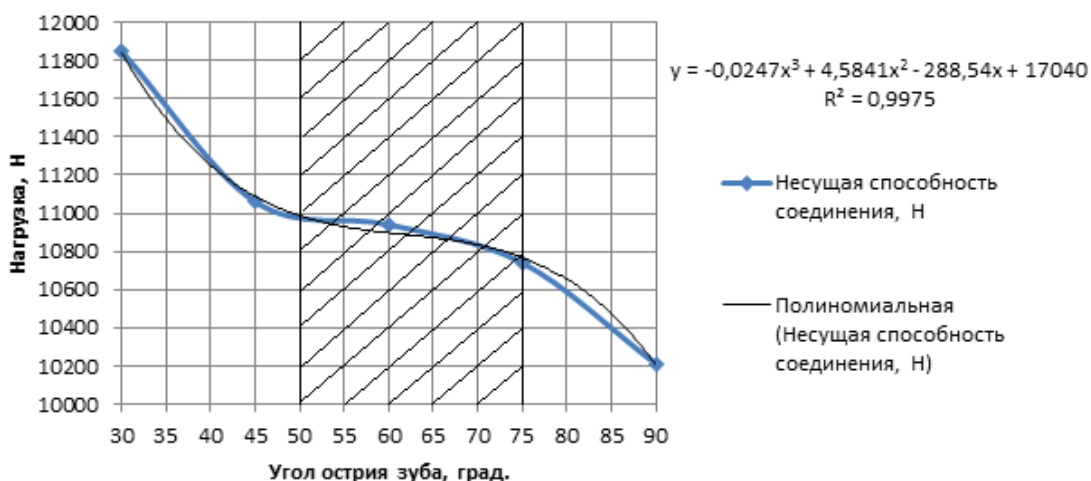


Рисунок 14 – Зависимость несущей способности соединения от угла заострения зуба коннектора

В результате анализа полученных по средством компьютерного моделирования результатов, предложена математическая модель для определения прочности и деформативности узлового соединения в зависимости от угла острия зуба коннектора и нагрузки. Установлено, что наиболее эффективными по прочности и деформативности являются коннекторы с углом острия зуба $50...75^\circ$. Применение таких коннекторов повышает сдвигоустойчивость соединения на $6...8\%$, по сравнению с типовым коннектором ($\alpha = 90^\circ$), а несущую способность – на $5...7\%$.

Практическую значимость составляют результаты, полученные на реальных примерах расчета элементов деревянных решетчатых, клефанерных и клеодошчатых конструкций. Расчеты показали, что применение когтевых коннекторов снижает материалоемкость металлических изделий в рассматриваемом узле сопряжения элементов конструкции в 2,1-2,3 раза, увеличит несущую способность в 2-2,4 раза.

Дальнейшие исследования необходимо продолжить применительно к другим породам древесины, с коннекторами другой толщины и классов стали с вибродинамическими воздействиями и др.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Определено научно обоснованное направление совершенствования узловых соединений деревянных конструкций с когтевыми коннекторами.
2. Разработаны конструктивные решения узловых соединений элементов деревянных конструкций с повышенными характеристиками прочности, жесткости сдвигоустойчивости
3. Разработаны математические модели, реализованные в среде ANSYS, учитывают упруго-вязко-пластические и анизотропные свойства материалов.
4. Получены характеристики прочности, жесткости и сдвигоустойчивости элементов узловых соединений, позволяющие повысить прочность на 30% и уменьшить деформативность соединения на 50% .
5. Разработана расчетная модель конструкции узлового соединения деревянных элементов с учетом жесткости дискретных связей и анизотропии древесины.
6. Выполнены численные исследования напряженно-деформированного состояния узловых соединений в элементах деревянных конструкций с изменяемыми геометрическими и пространственными характеристиками зубьев коннектора. Наибольшая несущая способность достигнута при расположении зубьев под углом 90° к волокнам древесины. Коннекторы с углом заострения $50...75^\circ$ увеличивают несущую способность соединения на $5...7\%$, а сдвигоустойчивость – $6...8\%$.
7. Результаты экспериментальных исследований элементов узловых соединений деревянных конструкций показали эффективность работы одно и двухсрезных соединений. Доказано, что двухсрезное соединение, по сравнению с

односрезным, позволяет повысить прочность на 35 %, уменьшить деформативность на 25%.

8. Установлено, что узловые соединения с применением когтевых коннекторов повышают несущую способность в 2,4 раза по сравнению с болтовыми соединениями. Материалоемкость элементов конструкции уменьшается в 2.1-2.3 раза

9. Результаты исследований переданы для использования при разработке новой редакции нормативных документов - СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции» и рекомендуется использовать при разработке алгоритмов расчета, в практике проектирования и учебном процессе.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАННО

В научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Орлов А.О. Компьютерный расчет напряженно-деформированного состояния узлового соединения / Б.В. Лабудин, В.С. Морозов, А.О. Орлов // Вестник Поволжского Государственного Технологического Университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии». – 2019. - №3. – С. 45-52.

2. Орлов А.О. Исследование прочности и жесткости коннектора с клеем и нагелем / А.О. Орлов, Б.В. Лабудин, В.С. Морозов, // Вестник Поволжского Государственного Технологического Университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии». – 2019. - №4. – С. 11-21.

3. Орлов А.О. Сопротивление клееной древесины растяжению под различными углами к направлению волокон / Б.В. Лабудин, В.С. Морозов, Е.В. Попов, Т.А. Никитина, О.А. Орлов // Строительная механика и расчет сооружений – 2019. – №3. – С. 12-17.

Публикации в изданиях, входящих в базу данных Scopus и Web of Science:

4. Orlov A.O. Improvement of strength and stiffness of components of main struts with foundation in wooden frame buildings / Rimshin V.I., Labudin B.V., Melekhov V.I., Orlov A.O., Kurbatov V.L. // ARPN Journal of engineering and applied sciences, vol. 13, № 11, 2018. p. 3851-3856.

5. Orlov A.O. Calculation of shear stability of conjugation of the main pillars with the foundation in wooden frame buildings / Vladimir Rimshin, Boris Labudin, Vladimir Morozov, Alexandr Orlov, Aram Kazarian, Vagan Kazaryan Advances in Intelligent Systems and Computing // Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 983. p. 867-876.

6. Orlov A.O. Numerical analysis of strength and rigidity of the biomechanical system «bone-apparatus» / R.P. Matveev, B.V. Labudin, V.S. Morozov, A.O. Orlov // Human ecology, 2017-№4. p. 58-63.

Публикации в других изданиях:

7. Орлов А.О. Совершенствование конструктивных решений основных стоек каркасных зданий / Лабудин Б.В., Морозов В.С., Карельский А.В., Петрова А.Л., Орлов А.О // Сборник трудов VIII международной научно-технической

конференции «Строительная наука – XXI век: теория, образование, практика, инновации Северо-арктическому региону» / Архангельск, 2017 – с. 124-136.

8. Орлов А.О. Cross laminated timber (clt) on the modern stage of development / Fursov V.V., Bidakov A.N., Orlov A.O // Сборник трудов VII международной научно-технической конференции посвященной 100-летию со дня рождения учёных СПбГАСУ (ЛИСИ) В.А. Лебедева, В.А. Трулля, Е.И. Светозаровой / Архангельск, 2016 – с. 337-346.

9. Орлов А.О. Математическая модель многослойной анизотропной пластины / Орлов А.О // Сборник статей международной научно-практической конференции «Наука третьего тысячелетия» - Уфа, 2016. с. 66-68.

10. Орлов А.О. Перспективы применения деревянных ограждающих конструкций в домостроении / Орлов А.О // Сборник статей международной научно-практической конференции «Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы» - Уфа, 2015. с.79-81.

11. Орлов А.О. Устойчивость деревянной стеновой панели к температурному воздействию / Орлов А.О // Международный научный журнал «Инновационная наука» - Уфа, 2016 - №1. с. 97-99.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с указанием фамилии, имени, отчества, почтового индекса, адреса электронной почты, наименования организации и должности, подписанные и заверенные печатью, просим направлять по адресу: 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17, САФУ им. М.В. Ломоносова, диссертационный совет Д.212.008.01.