

7. Кужин М.Ф., Алхамд А. Изучение условий организации строительного производства при реновации городских территорий Системные технологии. 2021. № 2 (39). С. 31-34.
8. Прохоров С.В. Повышение экологической безопасности строительного производства // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2018. №6. С. 51-56
9. Журавлев П.А., Марукян А.М. Инженерная защита зданий, сооружений и территорий как фактор инновационного развития территориального планирования // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 9. С. 1111-1111. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1111-1111.
10. Журавлев П. А., Сборщиков С. Б. Организационные особенности формирования технических решений инженерной защиты территории на этапах жизненного цикла и их реинжиниринг (часть 2) // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2021. №1. С.77-91. DOI: 10.21869/2311-1518-2021-33-41-77-91.
11. Кужин М.Ф., Паршуков А.И. Изучение организационно-технологических особенностей строительного производства при сносе зданий в условиях реновации // Системные технологии. 2021. № 40. С. 27-30.
12. Кужин М.Ф., Мелехова О.Н. Совершенствование организационно-технологического проектирования строительного производства. // Системные технологии. 2021. № 40. С. 54-58.
13. Кисель Е.И., Осопрелко Р.М., Осопрелко А.Г. Организационные аспекты проектирования объектных строительных генеральных планов // Вестник Брестского государственного технического университета. 2017. №3. С. 22-27.
14. Купчикова Н.В. Технико-экономические особенности берегоукрепления набережной р. Волги сваями-оболочками, каменной наброской и строительства на намывных грунтах вдоль береговой зоны // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2014. №1(7). С. 88-94.
15. Жилиева Е. А., Волков Б. В. Строительный комплекс как перспективное направление развития национальной экономики // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГАОУ АО ВО «АГАСУ». 2016. № 1-2 (15-16). С. 81-86.

© П. А. Журавлев, А. М. Марукян

Ссылка для цитирования:

Журавлев П. А., Марукян А. М. Особенности организации и учета временной строительной инфраструктуры (часть 1) // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2022. № 3 (41). С. 61-67.

УДК 69.04

DOI 10.52684/2312-3702-2022-41-3-67-71

**РАСЧЕТ НАГЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
С УЧЕТОМ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ**

А. С. Чугунов, О. В. Жадан

Чугунов Александр Сергеевич, старший преподаватель кафедры строительства зданий и сооружений, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, тел.: +7(921)752-69-43; e-mail: spbgau.pgs@yandex.ru;

Жадан Олег Владимирович, старший преподаватель кафедры строительства зданий и сооружений, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, тел.: +7(921)387-17-12; e-mail: zhadanpgs@yandex.ru

В настоящее время расчет нагельных соединений элементов деревянных конструкций, выполняемый в соответствии с действующими нормами, не учитывает действительную работу элементов соединения. В данной статье приводится методика расчета нагельного соединения с учетом действительной его работы, то есть с учетом упругопластических деформаций. Для решения поставленной задачи была принята расчетная схема нагельного соединения в виде многопролетной неразрезной балки, которая была реализована в расчетных программных комплексах SCAD и Лира. На первом этапе моделирования работы нагельного соединения доказывалась достоверность получаемых результатов. На втором этапе осуществляется моделирование нагельного соединения, которое ранее подлежало экспериментальному исследованию. По результатам данного моделирования делается анализ и даются выводы.

Ключевые слова: *нагель, расчет нагельных соединений для ответственных деревянных конструкций, упругопластическая работа нагеля.*

**CALCULATION OF DOWEL JOINTS OF ELEMENTS OF WOODEN STRUCTURES,
TAKING INTO ACCOUNT ELASTIC-PLASTIC WORK**

A. S. Chugunov, O. V. Zhadan

Chugunov Alexander Sergeevich, Senior Lecturer, Department of Construction of Buildings and Structures, St. Petersburg State Agrarian University, St. Petersburg, Russian Federation, phone: +7-921-752-69-43; e-mail: spbgau.pgs@yandex.ru;

Zhadan Oleg Vladimirovich, Senior Lecturer, Department of Construction of Buildings and Structures, St. Petersburg State Agrarian University, St. Petersburg, Russian Federation, phone: +7-921-387-17-12; e-mail: zhadanpgs@yandex.ru.

At present, the calculation of dowel joints of wooden structure elements, performed in accordance with current standards, does not take into account the actual work of the connection elements. This article provides a method for calculating the dowel joint, taking into account its actual work, that is, taking into account elastic-plastic deformations. To solve the problem, the calculation scheme of the dowel joint in the form of a multi-span continuous beam was adopted, which was implemented in the calculation software systems



SCAD and Lira. At the first stage of modeling the operation of the dowel connection, the reliability of the results obtained is proved. At the second stage, the modeling of the dowel joint, which was previously subject to experimental research, is carried out. Based on the results of this simulation, an analysis is made and conclusions are drawn.

Keywords: pin, calculation of pin joints for critical wooden structures, elastoplastic work of a pin.

Одним из самых распространенных соединений деревянных конструкций являются соединения, где применяются в качестве связей нагели [1–4], выполненные из древесины твердых пород, металла (из стали или из алюминиевых сплавов), пластмасс (к примеру, из стеклопластика). Соединения с применением нагелей, в отличие от клеевых соединений, являются расчетными.

Имеющиеся на сегодняшний день многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, связанные с расчетом соединений с применением нагелей [5–10], позволяют сделать вывод, что нет точной методики расчета нагельного соединения. Повышение точности расчета соединений с применением нагелей особенно важно при расчете узлов деревянных конструкций, через которые передаются большие по интенсивности усилия, к примеру, узлов деревянных большепролетных конструкций, что подтверждается в работах [11–13].

Актуальность представленной работы заключается в совершенствовании методики расчета нагельных соединений, направленной на повышение точности полученных результатов.

Целью данной работы является повышение точности расчета соединения с применением нагелей, что является важным при расчете узлов деревянных конструкций, через которые передаются большие по интенсивности усилия, к примеру, узлов деревянных большепролетных конструкций, что подтверждается в работах.

Задачи данного исследования заключаются в доказательстве достоверности результатов расчета по методике, предложенной авторами и построение конечно-элементной модели (схемы) соединения по предложенной методике, которая бы учитывала работу элементов соединения в упругопластической постановке задачи.

Формулы для расчета соединения с применением нагелей, содержащиеся в таблице 18¹, являются приближенными, так как их вывод основан на предположении, что напряжения смятия древесины нагельного гнезда соединяемых деревянных элементов до определенной величины деформации сдвига соответствуют линейным деформациям, а при дальнейшем увеличении нагрузки на соединение в нагельном гнезде развиваются пластические деформации.

Проведенные В. В. Туркиным [14] многочисленные экспериментальные исследования показали, что зависимость напряжений смятия и

деформаций сдвига являются упругопластическими (нелинейными). Алгоритм расчета соединения с применением нагелей, содержащийся в п. 8.13², не учитывает реальной работы нагелей, то есть при расчете исключается учет упругопластических деформаций. При выполнении расчетов соединений с применением нагелей В. В. Туркиным применялось теоретическое положение расчета упруго-защемленного стержня, разработанное проф. Б. Н. Жемочкиным [15], которое было дополнено учетом развития пластических деформаций нагельного гнезда. Результаты данных исследований приведены в [14].

Предположение, которое взято в основу расчета упруго-защемленного стержня, заключается в том, что между стержнем-нагелем и упругой средой (древесиной гнезда) установлены бесконечно малые абсолютно жесткие связи-стержни, располагаемые таким образом, чтобы грузовая площадь была равной для всех стержней-связей. Усилия от стержня-нагеля передаются на защемленную среду только через стержни-связи. Определение внутренних усилий в стержне-нагеле и в стержнях-связях осуществлялось методами строительной механики. За расчетную схему принималась многопролетная неразрезная балка, которая являлась многократно статически неопределимой. При выполнении расчета были приняты следующие предпосылки: поперечные размеры нагеля принимались малыми по сравнению с его длиной; расчет нагеля-балки на несущую способность выполнялся по формулам сопротивления материалов применительно к изгибаемым элементам; при изгибе нагеля его поперечное сечение не искажалось (сохранялась плоская форма); нагрузка на защемленную среду распределялась равномерно по ширине нагеля; после достижения предельных напряжений смятия на защемленных участках, нагрузка на них считалась приложенной постоянной, а напряжения, вызванные этой нагрузкой, соответствовали расчетному сопротивлению древесины смятию. Разработанная методика расчета соединения с применением нагелей [14] была признана адекватной, но имеющая существенные недостатки: алгоритм решения данной задачи был разработан только для реализации в программе Например, формульный аппарат, приведенный [14], является весьма громоздким, что будет усложнять реализацию данного алгоритма с применением других языков программирования или

¹ СП 64.13330.2017 (Актуализированная редакция СНиП II-25-80) «Деревянные конструкции».

² Там же.

других программ; совершенствование расчетной схемы или алгоритма решения, которое позволит повысить точность результата будет либо не возможно, либо весьма затруднительно; результаты решения представляют собой только значения опорных реакций нагель-стержня.

С целью совершенствования методики расчета соединений с применением нагелей, предложенной В. В. Туркиным [14], направленной на ликвидацию недостатков самой методики расчета, авторами была предложена конечно-элементная модель нагеля. Данная модель реализовывалась с применением метода конечных элементов (МКЭ) в программах Лира и SCAD по технологии, предложенной в [16, 17].

На первом этапе доказывалась адекватность рассматриваемой конечно-элементной модели нагеля, построенной с применением МКЭ. Работа нагеля на данном этапе рассматривалась в упругой стадии, поскольку расчетные формулы (формулы по нахождению несущей способности одного нагеля), содержащиеся в таблице 18³, отражают упругую работу нагеля. В последующем выполнялся сравнительный анализ результатов расчета соединения с применением нагелей, выполненного с применением методики согласно п. 8.13⁴ и методики, предложенной авторами в данной работе. Сравнительный анализ показал, что расхождение в результатах расчета нагельного соединения, выполненных по двум методикам, составляет не более 6 %. Это является показателем достаточной точности расчетной модели нагеля, построенной с применением МКЭ.

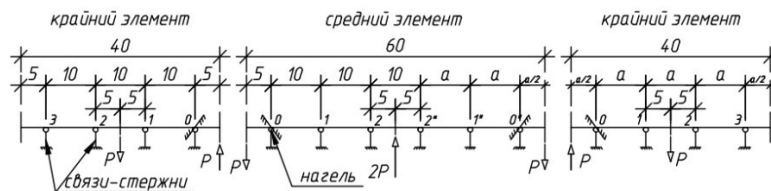


Рис. 2. Расчетные схемы нагеля

Чтобы построить конечно-элементные модели в современных программах (таких, как SCAD и Лира) были внесены изменения в методику расчета [14], то есть было сделано следующее предположение: между нагелем и упругой средой (древесиной гнезда) поставлен ряд бесконечно малых жестких связей-стержней, которые расположены так, чтобы грузовая площадь была равной для всех связей-стержней. Величина жесткости связей-стержней принималась так, чтобы исключить изгиб этих стержней (изгибная жесткость связей-стержней превосходила изгибную жесткость нагеля в 10–20 раз), а также

На втором этапе осуществлялось построение конечно-элементной модели нагеля, которая учитывала его работу в упругопластической стадии. В качестве примера было выбрано двухсрезовое симметричное соединение с применением нагелей (рис. 1), которое имело характеристики соединения, что и в случае, указанном в [14].

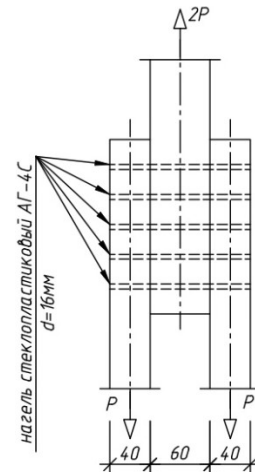


Рис. 1. Схема двухсрезового соединения с применением нагелей

Расчетные схемы нагеля в крайнем и среднем элементах (досках) представлены на рисунке 2. Характеристики нагельного соединения были приняты следующими: материал нагеля – стеклопластик АГ-4С; диаметр нагеля $d = 16$ мм; модуль упругости материала нагеля – $E_n = 3,96 \cdot 10^4$ МПа; модуль упругости основания (древесиной нагельного гнезда) – $E_c = 10000$ МПа.

допустить сжатие (растяжение) связей-стержней, что соответствовало бы смятию древесины нагельного гнезда. Величина длины стержней-связи задавалась исходя из наибольшей деформации смятия древесины гнезда, то есть не более 1–3 мм. Причем, чем больше длина стержня-связи, тем больше должна быть жесткость на изгиб. Жесткости элементам расчетной схемы (модели) задавались численным методом:

а) жесткость нагеля:

- изгибная жесткость: $E_n \cdot J_n = E_n \cdot \pi \cdot d^4 / 64 = 0,127$ кНм²;

- продольная жесткость: $E_n \cdot F_n = E_n \cdot \pi \cdot d^2 / 4 = 7958,02$ кН;

³ СП 64.13330.2017 (Актуализированная редакция СНиП II-25-80) «Деревянные конструкции»;

⁴ Там же.

• размеры ядра сечения нагеля: $y_1^H = y_2^H = W_H/F_H = 0,002$ м, где $W_H = 2J_H/d = 0,0000004$ м³;

б) жесткость стержней-связей:

• изгибная жесткость: $E_c J_c = (10 \dots 20) E_H J_H = 1,27$ кНм²;

• продольная жесткость: $E_c F_c = E_c \pi d/2 \cdot a = 2510$ кН, где $\pi d/2$ – площадь сминаемой поверхности нагелем; $a = 0,01$ м – шаг связей-стержней, то есть ширина грузовой площади (рис. 2);

• размеры ядра сечения нагеля: $y_1^c = y_2^c = W_c/F_c = 0,000003$ м, где $W_c = (10 \dots 20) W_H = 0,000004$ м³; $F_c = \pi d/2 \cdot a$.

Длина стержней-связей была принята 1 мм.

Ограничения деформаций модели нагеля были следующие (рис. 2):

а) на все нижние сечения связей-стержней накладывались связи, создающие жесткое защемление;

б) на первый узел нагеля от шва соединения накладывалась связь, ограничивающая угловые деформации нагеля в плоскости изгиба.

Кроме того, сопряжение нагеля и связей-стержней принималось шарнирное, но при этом сам нагель задавался неразрезным.

Всем элементам (нагелю и стержням-связям) присваивался вид конечного элемента – универсальный стержень.

Нагружение модели соединения производилось единичной нагрузкой, которую прикладывали к средней части балки-нагеля и в местах швов соединения (рис. 2). Использование единичной нагрузки позволяет сделать решение задачи универсальным относительно действующей нагрузки, передаваемой через соединение, так как при решении задачи в упругой постановке количество нагелей при загрузке соединения действующей нагрузкой будет равно количеству нагелей при загрузке единичной нагрузкой умноженному на величину действующей нагрузки.

Линейный расчет модели позволил определить внутренние усилия, возникающие в нагеле и в упругой среде основания (древесине гнезда). В нагеле были определены следующие усилия: изгибающий момент M и поперечная сила Q . В основании было определено продольное усилие N (сжимающее или растягивающее), которое возникало в стержнях-связях, являясь усилием, порождающим сминающие напряжения древесины гнезда, следовательно, наибольшее сминающее напряжение древесины гнезда:

$$\sigma_{см} = N_{max}/F_c,$$

где $F_c = \pi d/2 \cdot a$.

Поперечная сила Q и изгибающий момент M вызывают поперечный изгиб нагеля, следовательно, величина наибольшего нормального напряжения в нагеле будет равна:

$$\sigma_{и} = M_{max}/W_H,$$

где $W_H = 2J_H/d$.

Расчет соединения с применением нагелей будет заключаться в проверке условий:

а) прочности нагельного гнезда на смятие: $\sigma_{см} \leq R_{см}$, где $R_{см}$ – расчетное сопротивление древесины соединяемых элементов смятию, определяемое согласно п. 6.1 или п. 6.2⁵;

б) прочности нагеля на изгиб: $\sigma_{и} \leq R_{и}$, где $R_{и}$ – расчетное сопротивление древесины нагеля изгибу.

Результаты линейного расчета конечно-элементной модели соединения (рис. 2) следующие:

• наибольшее продольное усилие в стержне-связи возникало под опорой «0» крайнего элемента и составляло $N_{max} = 0,812784$ кН;

• наибольший изгибающий момент в нагеле возникал над опорой «0» и составлял $M_{max} = 0,005$ кНм.

Анализ результатов статического расчета модели соединения показывает, что наибольшее смятие древесины гнезда наблюдалось под опорой «0», а наибольший изгибающий момент в нагеле – в крайнем элементе (доске). Эти результаты согласуются с экспериментальными и теоретическими результатами, приведенными в [14].

В результате обработки полученных данных были определены следующие напряжения:

• наибольшее напряжение смятия древесины гнезда:

$$\sigma_{см} = 0,812784/0,000251 = 3,24 \text{ МПа};$$

• наибольшее нормальное напряжение изгиба, возникающее в нагеле:

$$\sigma_{и} = 0,005/0,0000004 = 12,5 \text{ МПа}.$$

После этого были проведены проверки на прочность из условия:

• смятия древесины гнезда: $\sigma_{см} = 3,24 \text{ МПа} \leq R_{см} = 13,86 \text{ МПа}$, где $R_{см}$ – расчетное сопротивление смятию хвойной породы первого сорта, из которой выполнены соединяемые элементы (доски);

• изгиба нагеля: $\sigma_{и} = 12,5 \text{ МПа} \leq R_{и} = 55 \text{ МПа}$.

Выполненные проверки демонстрируют, что прочность элементов соединения (нагеля и древесины гнезда) обеспечены, следовательно, для передачи через соединение расчетной нагрузки в 1 кН достаточно одного нагеля диаметром 16 мм из стеклопластика АГ-4С.

Нагельное соединение (рис. 1) также рассчитывалось по методике, изложенной в нормах⁶. В результате этого расчета соединения была получена минимальная несущая способность од-

⁵ СП 64.13330.2017 (Актуализированная редакция СНиП II-25-80) «Деревянные конструкции»

⁶ Там же.

ного нагеля, которая являлась несущей способностью смятию древесины гнезда в среднем элементе и была равна 3,2 кН. Требуемое количество нагелей составило один.

Сопоставляя результаты расчета, выполненного согласно нормам⁷, результаты экспериментальных и теоретических исследований [14] с результатами расчета, выполненного с использованием методики, предложенной авторами, можно сделать вывод, что разработанная методика является адекватной и может быть применена для расчета соединений с нагелями с учетом упруго-пластической работы элементов соединения.

Научная новизна исследования заключается в том, что разработанная методика расчета нагельных соединений дает результаты расчета, обладающие необходимой достоверностью, а также способной дать результаты расчета соединения с учетом его упруго-пластической работы.

Выводы. Авторами предложена методика расчета нагельных соединений, учитывающая

упруго-пластическую деформацию элементов соединения. Данный алгоритм реализуется в расчетных комплексах (к примеру, в программах SCAD или Лира), базирующихся на методе конечных элементов. Использование предложенной в статье методики позволяет производить расчет нагельных соединений элементов из древесины с большей точностью, что является актуальным при расчете узлов сильно нагруженных конструкций из древесины. Алгоритм расчета учитывает упруго-пластические деформации соединения, а также породу и сорт/класс древесины соединяемых элементов. Для проведения оценки адекватности предложенной методики были сопоставлены результаты расчета, выполненные с использованием данной методики и с результатами экспериментальных и теоретических исследований. Расхождение результатов составило не более 6%, что является хорошим показателем для инженерных расчетов.

Список литературы

1. Серов Е.Н. Проектирование деревянных конструкций / Серов Е.Н., Санников Ю.Д., Серов А.Е. – М.: АСВ, 2015. – 536 с.
2. Гиясов Б.И. Конструкции из древесины и пластмасс. Издание второе дополненное и переработанное / Гиясов Б.И., Серегин Н.Г., Серегин Д.Н. – М.: АСВ, 2018. – 400 с.
3. Калугин А.В. Деревянные конструкции. – М.: АСВ, 2008. – 288 с.
4. Thomas P. Glynn. Hammer. Nail. Wood.: The Compulsion to Build Paperback. – Chelsea Green Pub Co, 1998. – 220 p.
5. Козлюк А.Г., Старовойтов С.А., Некипелов А.Д. Напряженно-деформированное состояние нагельного соединения // Сборник докладов III Международной научно-практической конференции к 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. – С. 64 – 68.
6. Окольникова Г.Э. Анализ работы нагельных соединений деревянных конструкций с позиций механики разрушения // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2011. – С. 40 – 46.
7. Нагельное соединение деревянных элементов строительных конструкций: пат. № 2397296 С1 Рос. Федерация. № 2009121166/03 ; заявл. 03.06.09 ; опубл. 20.08.10, бюл. № 23. 3 – 6 с.
8. Губайдуллина А.Ш., Хуснутдинов Р.Ф. Сравнительный анализ европейской и российской нормативной технической документации в области расчета нагельных соединений деревянных конструкций // Журнал Инновационная наука. 2019. – С. 28–30.
9. Смирнов П.Н., Шенгелия А.К., Турковский С.Б., Погорельцев А.А. Испытание нагельных соединений, предназначенных для большепролетных деревянных конструкций // Сборник научно-технических работ Мытищинского филиала МГСУ. 2004. – С. 147 – 152.
10. Dias A.M.P.G., Cruz H.M.P., Lopes S.M.R., van de Kuilen J.W. Stiffness of doweltype fasteners in timber – concrete joints // Proceedings of the ICE-Structures and Buildings. – 2010. 163 (584). – P. 257–266.
11. Куправа Л.Р. Расчет и совершенствование конструкций ребристо-кольцевого купола из клефанерных трубчатых элементов с затяжками : диссертация ... канд. техн. наук : 05.23.01. - Санкт-Петербург, 1997. - 157 с. : ил.
12. Абу-Хасан М.С., Егоров В.В., Куправа Л.Р., Муравьева А.А. Определение усилий в меридиональных стержнях сетчатого купола // Бюллетень строительной техники. 2021. № 3 (1039). С. 58 – 60.
13. Абу-Хасан М.С., Егоров В.В., Куправа Л.Р. Экспериментальное исследование сетчатой оболочки // Бюллетень строительной техники. 2021. № 4 (1040). С. 30–33.
14. Туркин В.В. Исследование работы цилиндрического нагеля из стеклопластика АГ-4С в сопряжениях элементов деревянных конструкций при кратковременных нагрузках : автореферат дисс. ... канд. техн. наук. М., 1970. С. 14.
15. Жемочкин Б.Н. Расчет упругой заделки стержня. – М.: Стройиздат, 1948. – 68 с.
16. Георгиев Н.Г., Шумилов К.А., Семенов А.А. Визуальное программирование в задачах моделирования строительных конструкций // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2021. 4 (38). С. 117 – 123.
17. Садчиков П.Н. Методологические принципы построения математической модели // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2014. 3 (9). С. 51 – 53.

© А. С. Чугунов, О. В. Жадан

Ссылка для цитирования:

Чугунов А. С., Жадан О. В. Расчет нагельных соединений элементов деревянных конструкций с учетом упруго-пластической работы // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2022. № 3 (41). С. 67–71.

⁷ СП 64.13330.2017 (Актуализированная редакция СНиП II-25-80) «Деревянные конструкции»