

УДК 004.94:625.142

<https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-72-81>

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОСТАВНОЙ ДЕРЕВЯННОЙ ШПАЛЫ С УЧЕТОМ ПОЕЗДНОЙ НАГРУЗКИ

**А. Б. НЕВЗОРОВА**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**В. В. РОМАНЕНКО**

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель*

*Описан процесс создания 3D-модели составной деревянной шпалы (СДШ) с учетом физических и виртуальных компонентов древесины «сосна». Проведен прочностной анализ шпалы на стадии сборки. Предложена расчетная схема напряжений в СДШ от воздействия подвижного состава. Смоделировано влияние поездной нагрузки на прочность соединения составных элементов шпалы. В результате расчета установлено отсутствие превышения прочностных пределов, что свидетельствует о возможности СДШ выдержать нагрузку от колес подвижного состава до 50 кН без потери надежности в соединениях между элементами.*

**Ключевые слова:** 3D-моделирование, составная деревянная шпала, поездная нагрузка, прочность, рельсовое соединение, ресурс.

**Для цитирования.** Невзорова, А. Б. Имитационное моделирование несущей способности составной деревянной шпалы с учетом поездной нагрузки /А. Б. Невзорова, В. В. Романенко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2024. – № 1 (96). – С. 72–81 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-72-81>

## SIMULATION MODELLING OF THE LOAD-BEARING CAPACITY OF COMPOSITE WOODEN SLEEPERS TAKING INTO ACCOUNT TRAIN LOAD

**A. B. NEVZOROVA**

*Sukhoi State Technical University of Gomel,  
the Republic of Belarus*

**V. V. ROMANENKO**

*Belarusian State University of Transport, Gomel*

*In this article the process of a composite wooden sleeper 3D-model creating is described, taking into account the physical and virtual components of pine wood. A strength analysis of the sleeper was carried out at the assembly stage. A calculation scheme of pressure in composite wooden sleeper due to the impact of rolling stock is proposed. The influence of train load on the connection strength of sleeper components was modelled. As a result of the calculation, it was established that the strength limits were not exceeded, which indicates the ability of a composite wooden sleeper to withstand a load from rolling stock wheels of up to 50 kN without loss of reliability in the connections between the elements.*

**Keywords:** 3D-modeling, composite wooden sleeper, train load, strength (durability), rail connection, resource.

**For citation.** Nevzorova A. B., Romanenko V. V. Simulation modelling of the load-bearing capacity of composite wooden sleepers taking into account train load. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 1 (96), pp. 72–81 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-72-81>

### **Введение**

Несмотря на интенсивное расширение полигона железобетонных шпал, деревянные шпалы в настоящее время востребованы для криволинейных железнодорожных путей малого радиуса, стрелочных переводов, подъездных и подкрановых путей, расположенных как на станционных путях общего пользования, так и на территории предприятий. На сегодняшний день потребность в деревянной шпалопродукции для Белорусской железной дороги обеспечивает ОАО «Борисовский шпалопродукционный завод», в результате производственной деятельности которого остается значительное количество так называемых «остатков» брусьев. Образовавшиеся остатки не имеют широкой сферы реализации и зачастую используются как топливный материал, что существенно снижает значимость ценной древесины, качество которой подразумевает ее применение в виде конструктивных элементов [1], служащих опорой для рельсов, равномерно распределяя нагрузку от поезда на плотный балласт и земляное полотно.

Количество эксплуатируемых стрелочных переводов на деревянных брусьях, после изготовления которых образуются такие остатки, а также отсутствие тенденции значительного снижения их в следующие годы позволяет сформировать задачу по применению остатков деревянных пиловочных брусьев в качестве составной деревянной шпалы (СДШ) [2].

Анализ существующих конструктивных схем СДШ [3–5] выявил необходимость разработки принципиально новой конструкции шпалы и ее исследования для дальнейшего применения на железнодорожном пути в качестве подрельсового основания.

Для реализации производства СДШ требуется проведение исследования, которое предполагает осуществление эксперимента с изучением реальных образцов. Такое исследование несомненно занимает важное место в ходе принятия решения по внедрению СДШ в производство, но даже на первоначальной стадии требует материальных затрат. Одним из первоначальных вариантов практического эксперимента для получения предварительных данных о непосредственной возможности либо невозможности изготовления и дальнейшего использования СДШ в качестве подрельсового основания, а также конкретизации способа проведения эксперимента может стать имитационное моделирование. Для этого необходимо разработать 3D-модель для определения характера поведения и предположительных характеристик исследуемой системы [6].

Цель данного исследования состоит в выборе компонентов для разрабатываемой имитационной модели и подтверждении теоретической возможности применения СДШ в качестве подрельсового основания с учетом моделирования напряжений и прилагаемой поездной нагрузки от колеса на рельс.

### **Постановка задач**

Имитационное моделирование позволяет конструировать модель составной деревянной шпалы как реальной системы и провести эксперименты на основе этой модели с целью проверки функционирования системы «шпала – рельс». В качестве инструмента использовался программный комплекс Autodesk Inventor [7], с помощью которого предполагается решить следующие задачи:

– разработка модели составной деревянной шпалы с соблюдением основных типоразмеров и сечения соединения [8];

- исследование спроектированной модели на предмет восприятия нагрузки от подвижного состава и передачи ее через рельсы на шпалу;
- использование модели для определения возможности изготовления составной шпалы и дальнейшего практического эксперимента.

### Создание модели составной деревянной шпалы с применением программного комплекса Autodesk Inventor

В разрабатываемой модели предлагается использование трех элементов, изготавливаемых из остатков брусков, которые между собой сращиваются, т. е. соединяются продольно. Одним из вариантов соединения без дополнительного крепления является способ сращивание впритык – «ласточкин хвост». Двойное сращивание элементов позволяет применять остатки длиной для размера  $a$  – 1,25 м и более, для  $b$  – 0,75 м и более (рис. 1).

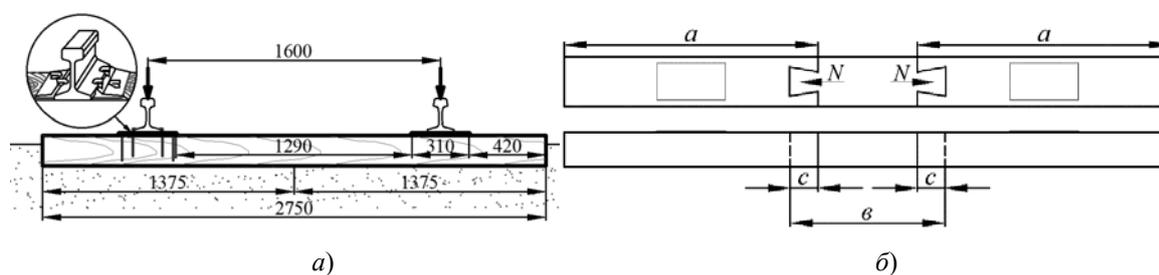


Рис. 1. Конструктивная схема составной деревянной шпалы с двойным сращиванием:  
 $a$  – общая схема;  $b$  – схема расположения элементов составной деревянной шпалы

Для обеспечения равномерного восприятия поездной нагрузки длина крайних элементов СДШ должна определяться условием симметричности каждого из них относительно оси рельса. Исходя из длины шпалы 2750 мм и расстояния между осями рельсов 1600 мм, размер  $a$  будет равен 1150 мм. Длина среднего элемента  $b$  станет зависеть от длины шипа  $c$ . В случае если  $c \leq 150$  мм, то размер среднего элемента будет  $b$  в пределах 750 мм.

Коллекции, входящие в состав программного комплекса Autodesk Inventor, позволяют создавать полнофункциональные электронные макеты изделий и сборок, а также применять необходимые технические системы и управляющие параметры на трехмерной модели. Кроме того, Autodesk Inventor основывается на технологии трехмерного параметрического моделирования, включая технологию адаптивного моделирования, что обеспечивает при изменении размера одного элемента возможность изменить сопряженные с ним другие элементы модели.

Поставленная задача 3D-моделирования – с помощью трехмерной графики разработать визуальный объемный образ СДШ, основанный на реальных размерах деревянной шпалы [8].

Трехмерная модель формируется из отдельных конструктивных элементов, разработка большинства которых начинается с построения эскиза. Создание модели производится путем сдвига контура или его вращения вокруг заданной оси. Процесс выполнения компьютерного моделирования должен совпадать с предполагаемыми этапами (технологическим процессом) изготовления СДШ (рис. 2).

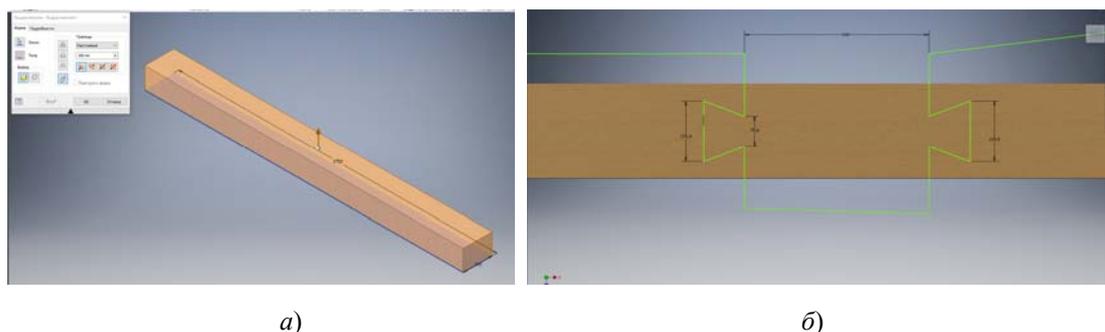


Рис. 2. Создание модели составной деревянной шпалы из цельнобрусковой шпалы:  
 а – модель цельнобрусковой шпалы I типа;  
 б – проектирование соединений

### Создание узлов скрепления

Инструментальные средства Autodesk Inventor обеспечивают полный цикл конструирования, в процессе которого при создании модели СДШ из отдельных элементов реализуется процедура обеспечения их строгой взаимосвязи друг с другом для последующей точной сборки общей конструкции в целом.

Пользовательская модель дает возможность разрабатывать конструкции соединений независимо от конфигурации конструкции, ее параметров или размеров. Для этого необходимо определить критерии сборки деталей, в нашем случае это следующие размеры:

- высота, ширина и длина шпалы (принята согласно I типу) соответственно 180, 250, 2750 мм;
- узкий размер шипа – 80 мм;
- широкий размер шипа – 160 мм;
- длина шипа – 150 мм;
- расстояние от края шипа до боковой грани шпалы – 45 мм.

Размеры соединения для моделирования были приняты исходя из условия обеспечения прочности древесины при растяжении вдоль волокон, на которое оказывают влияние величина боковой составляющей транспортной нагрузки, условия предполагаемой эксплуатации СДШ, качество древесины и т. п. Прочность соединения обеспечивается в том случае, когда напряжения, возникающие от боковой силы, действующей на соединение, не будут превышать расчетное значение прочности древесины при растяжении вдоль волокон:

$$\sigma_{t,o,d} = \frac{N_d}{A_{net}} \leq f_{t,o,d} = f_{t,o,k} \frac{K_{sys} K_h K_{mod}}{\gamma_m}, \quad (1)$$

где  $N_d$  – боковая сила, действующая на шпалу от подвижного состава, кН, (рис. 2, б);  $A_{net}$  – площадь поперечного сечения шпалы, м<sup>2</sup>;  $f_{t,o,d}$  – расчетное значение прочности древесины при растяжении вдоль волокон;  $f_{t,o,k}$  – характеристическое значение прочности древесины при растяжении вдоль волокон;  $K_{sys}$  – коэффициент, учитывающий изменение прочности материала в элементах системы, соединенных посредством клея или механических связей;  $K_h$  – коэффициент, учитывающий изменение прочности древесины при растяжении вдоль волокон в зависимости от высоты поперечного сечения по отношению к стандартной высоте;  $K_{mod}$  – коэффициент модификации (приведения), учитывающий изменение прочности древесины или материала

на ее основе в зависимости от продолжительности действия нагрузки и условий эксплуатации;  $\gamma_m$  – частный коэффициент для свойств материалов и изделий, учитывающий погрешности модели и отклонения размеров.

Определение соответствия отдельных элементов на различных частях СДШ базируется на том, как детали узла должны располагаться в сборках, а именно: размер «паза» должен соответствовать размеру «шипа» (рис. 3 и 4).

Технологии адаптивного конструирования, реализованные в Autodesk Inventor, позволяют определить размеры и пространственное расположение деталей автоматически. При этом не требуется прорисовывать все элементы конструкции каждой детали соединения с большой точностью, так как их конфигурация определяется непосредственно в сборках на основе того, как детали соединения стыкуются друг с другом [9].

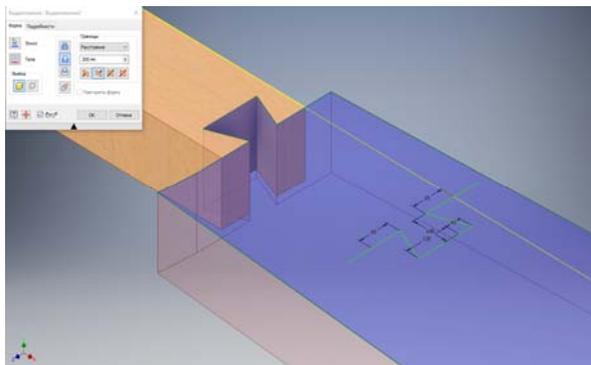


Рис. 3. Моделирование крайних блоков

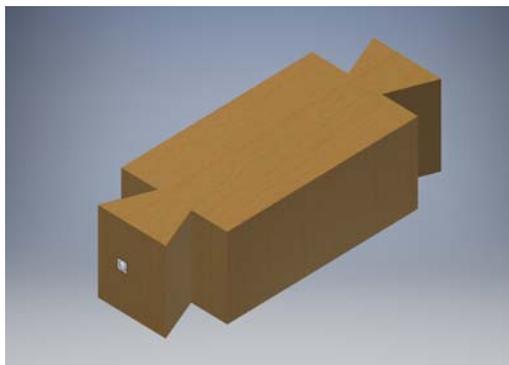


Рис. 4. Моделирование среднего блока

### Выбор компонентов для разрабатываемой модели

Деревянные шпалы изготавливают из сосны либо ели 1, 2, 3 сортов. Соответственно для оценки работы модели ей необходимо придать свойства материала. В Inventor материалы представляют собой комбинации различных типов наборов характеристик, имитирующих природный материал, которые называются компонентами.

Используются материалы двух компонентов – физических и представлений модели, первые из которых обладают характеристиками самого материала, вторые – обеспечивают визуальную реализацию материала, например, цвет, текстуру, зернистость.

Информация о составе материала находится в разделе «Физические параметры», такие параметры возможно использовать для определения массы, площади и объема конструкции, а также прочностных и физических характеристик.

Дерево является ортотропным материалом, т. е. обладающим уникальными и независимыми механическими и термическими свойствами вдоль трех взаимно перпендикулярных направлений  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Исходя из этого значения механических показателей, например, модуль Юнга, коэффициент Пуассона и модуль сдвига по каждой из осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  будут одинаковыми.

Материалу «сосна» соответствуют определенные параметры:

- *механические:*
  - плотность –  $0,570 \text{ г/см}^3$ ;
  - модуль Юнга (характеристика способности материала сопротивляться растяжению, сжатию при упругой деформации) –  $12066,469 \text{ МПа}$ ;

- коэффициент Пуассона (показатель отношения относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению) – 0,37;
- модуль сдвига (характеристика способности материала сопротивляться сдвиговой деформации) – 663,656 МПа;
- *прочностные:*
  - предел прочности древесины при статическом изгибе (в зависимости от породы – 75–155 МПа при влажности 12 %) – 90,326 МПа;
  - предел прочности при сжатии вдоль волокон (в зависимости от породы – 40–60 МПа при влажности 12 %) – 50,128 МПа;
  - предел прочности при сжатии поперек волокон (для всех пород – около 50 МПа) – 5,600 МПа;
  - предел прочности при продольном сдвиге – 9,600 МПа;
  - предел прочности при растяжении вдоль волокон (для всех пород – 130 МПа) – 79,983 МПа;
  - предел прочности при растяжении поперек волокон – 3,241 МПа;
  - модуль среднего натяжения – 12066,469 МПа;
  - предел текучести – 0,000 МПа.

### Создание трехмерного соединения подрельсового узла

Рельсовые крепления (промежуточные рельсовые крепления) – важнейший элемент верхнего строения пути, так как он в значительной степени определяет надежность прикрепления рельса к шпале, геометрические параметры и параметры пространственной жесткости рельсовой колеи. От подобных показателей во многом зависят условия взаимодействия пути и подвижного состава.

При воздействии боковой составляющей нагрузки от колес подвижного состава рельс не должен изменять уровень своей подуклонки (1 : 20 внутрь колеи относительно вертикальной оси рельса). Воздействие значительной (при высоких скоростях движения локомотива) динамической составляющей транспортной нагрузки вызывает незначительные отклонения рельса относительно своей вертикальной оси, но с учетом того, что в настоящее время деревянные шпалы эксплуатируются на станционных железнодорожных путях и путях необщего пользования, подобные перемещения возможно не учитывать.

При моделировании наличие промежуточного крепления реализовано за счет жесткого прикрепления рельса к шпале, что практически соответствует правильной установке прикрепителей в реальных условиях эксплуатации (рис. 5).

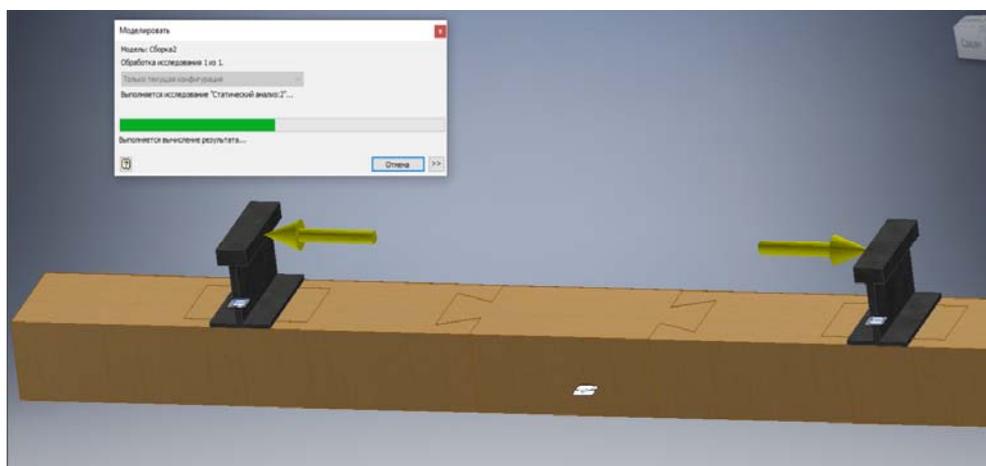


Рис. 5. Моделирование боковой составляющей транспортной нагрузки

### Результаты моделирования

Использование современных САПР дает возможность не только создавать цифровые прототипы будущих конструкций, но и проводить инженерный анализ спроектированных моделей. Комплекс Autodesk Inventor также содержит среду прочностного анализа элементов, позволяющую реализовать проверку моделей без испытания опытных образцов.

Inventor имеет встроенный инструмент анализа прочности, базирующийся на методе конечных элементов, для прогнозирования поведения модели под действием различных сил, а также величин деформаций, напряжений и перемещений, для определения возможности выдерживания конструкцией нагрузки в конкретных условиях ее эксплуатации.

При передаче нагрузки от подвижного состава в элементах верхнего строения железнодорожного пути возникают напряжения, величина которых и определяет надежные условия эксплуатации как отдельного элемента в отдельности, так и всего железнодорожного пути в целом.

Используя возможность, предоставленную средой «Анализ напряжений», на полученную модель СДШ накладываем нагрузку 50 кН и как результат – получаем запас прочности шпалы методом конечных элементов, эквивалентные напряжения по Мизесу от воздействия подвижного состава. Для цельнобрусковых шпал максимальная концентрация напряжений возникает в подрельсовой зоне, которые будут «затухать» приближаясь, с одной стороны, к середине шпалы и, с другой, к концу шпалы. Так как СДШ предполагает наличие трех элементов, соединенных между собой, распределение концентрации напряжения будет иным (рис. 6).

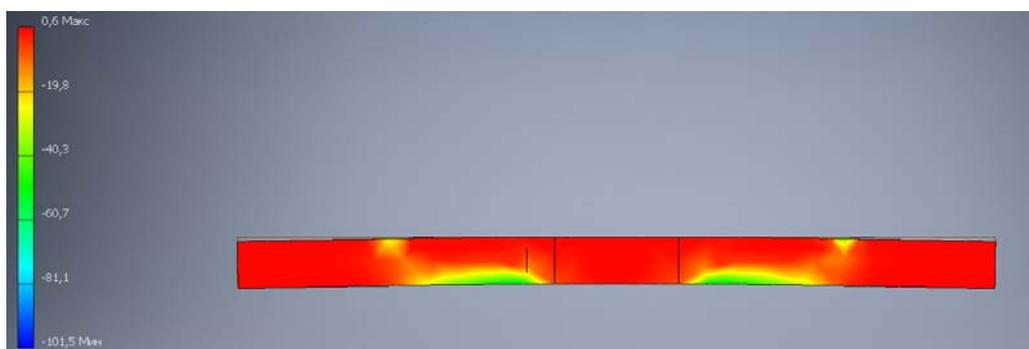


Рис. 6. Распределение напряжений в СДШ от воздействия колес подвижного состава (вид сбоку)

Распределение напряжений соответствует цветовой схеме-шкале визуализации результатов расчета с метками максимального (красный цвет) и минимального (синий цвет) значений напряжений (рис. 7). Анализ конструкции позволил определить, как будут работать элементы при различных нагрузках и надо ли улучшить конструкцию. Согласно цветовой шкале распределения напряжений, установлено, что максимальные напряжения распределяются по верхней постели шпалы, минимальные – по нижней, при этом они сконцентрированы в зоне широкого размера соединения. Следовательно, в разработанной конструкции СДШ отсутствуют критические точки напряжения и отказа.

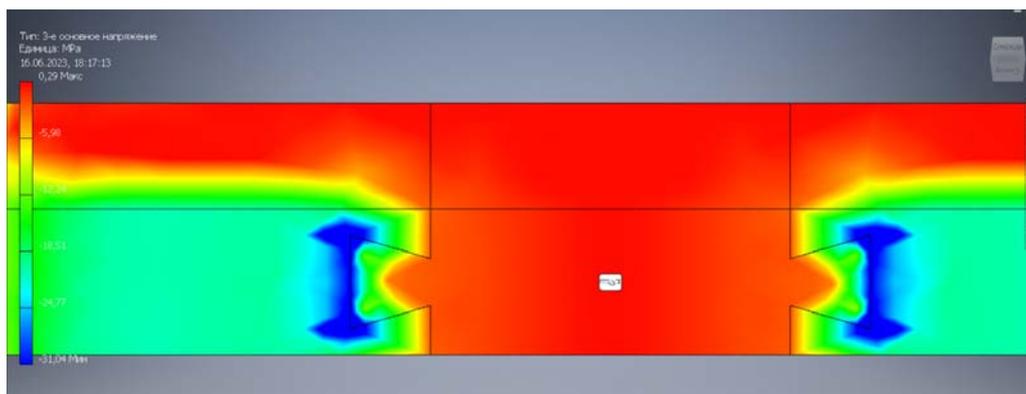


Рис. 7. Распределение напряжений в составной деревянной шпале от воздействия колес подвижного состава (нижняя постель)

В процессе моделирования СДШ в среде прочностного анализа Autodesk Inventor были выполнены следующие операции:

- создана модель СДШ согласно размерам деревянной шпалы I типа, которая включает в себя набор атрибутов по материалу конструкции, прочностным и физическим характеристикам, соответствующим материалу «сосна»;
- спроектирована схема нагружения рельсового узла поездной нагрузкой для определения возможности ее восприятия рельсами и передачи на составляющие элементы шпалы;
- проведен прочностной расчет с анализом схемы распределения напряжений во всех элементах СДШ, а также определения возможности изготовления СДШ и проведения практического эксперимента.

Согласно принципам визуализации распределения напряжений Autodesk Inventor, положительный знак напряжений означает, что на верхней постели шпалы возникают растягивающие напряжения, а на нижней – сжимающие.

В реальных условиях эксплуатации шпалы различные напряжения по верхней и нижней постелям возникают из-за жесткого прикрепления рельса к шпале за счет промежуточного скрепления. Схема распределения напряжений (рис. 7) повторяет принцип реального распределения напряжений, что указывает на адекватность разработанной модели СДШ и правильность проектирования основных узлов конструкции.

### Заключение

Полученные сведения о максимальных и минимальных растягивающих и сжимающих напряжениях СДШ и прочих важных характеристиках позволяют установить возможные места измерений и контроля при проведении практического эксперимента. Визуализация модели дает возможность оценить поведение элементов СДШ при восприятии поездной нагрузки 50 кН с целью обеспечения достаточной прочности мест сращивания брусьев, определить такие контрольные места для более подробного изучения их после изготовления образцов СДШ и укладки последних в путь, как:

- угловые участки длинного размера шипа по верхней постели шпалы (возникновение сжимающих напряжений в зоне растяжения);
- угловые участки длинного размера шипа по нижней постели шпалы (максимальные сжимающие напряжения);
- зона шипа по нижней постели шпалы (интенсивный переход растягивающих напряжений в сжимающие).

Работа выполнена в рамках отдельного проекта научно-исследовательских работ Министерства образования Республики Беларусь на 2023–2024 гг. (номер государственной регистрации 20231587 от 17.10.2023 г. Тема «Научное обоснование ресурсосберегающей технологии изготовления и применения составных деревянных шпал»).

### Литература

1. Романенко, В. В. Комплексный подход к оценке факторов, влияющих на надежность работы деревянных шпал / В. В. Романенко, А. Б. Невзорова // Тр. БГТУ, Сер. 1. Лес. хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. – 2023. – № 1 (264). – С. 147–155.
2. Романенко, В. В. Сбережение древесины при рациональном изготовлении железнодорожной продукции / В. В. Романенко // Экология родного края: проблемы и пути их решения : материалы XVIII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Киров, 24–25 апр. 2023 г. / Вят. гос. ун-т. – Киров, 2023. – С. 365–369.
3. Составная шпала : пат. 2256020 RU, МПК Е 01 В 3/10, В 27 М 3/14 / Л. А. Занегин ; заявитель Иркут. науч.-исслед. ин-т лес. пром-сти : заявл. 08.01.04 ; опубл. 10.07.05, Бюл. № 29.
4. Составная композиционная шпала для железных дорог : пат. 2536569 RU, МПК Е 01 В 3/10 (2006.01) / В. Я. Бершацкий ; заявитель Урал. гос. ун-т путей сообщения : заявл. 15.03.13 ; опубл. 27.12.14, Бюл. № 36.
5. Божелко, И. К. Физико-механические свойства комбинированных деревянных шпал / И. К. Божелко // Тр. БГТУ, Сер. 1. Лес. хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. – 2018. – № 2 (210). – С. 211–217.
6. Сембина, Г. К. Моделирование как средство проектирования сложных систем / Г. К. Сембина // Механика и технологии. – 2015. – № 1 (47). – С. 94–100.
7. Амангельдиева, А. А. Использование графических редакторов Autocad Autodesk и Autodesk Inventor в качестве инструментов проектирования в трехмерной системе автоматизированного проектирования / А. А. Амангельдиева, А. Т. Кишубаева // Вестн. Астрах. гос. техн. ун-та. – 2021. – № 1 (71). – С. 7–14.
8. ГОСТ 78–2014. Шпалы деревянные для железных дорог широкой колеи. Общие технические условия. – Введ. 01.03.16. – Минск : Гос. ком. по стандартизации Респ. Беларусь, 2016. – 18 с.
9. Корягина, О. М. Моделирование сборочных единиц и создание их чертежей в среде программы Autodesk Inventor / О. М. Корягина, С. В. Корягин // Cloud of Science. – 2018. – Т. 5, № 1. – С. 60–73.

### Referens

1. Romanenko V. V., Nevzorova A. B. Comprehensive approach to the assessment of factors affecting the reliability of wooden sleepers. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Serija Lesnoe hozjajstvo*. Minsk, 2023, no. 1 (264), pp. 147–155 (in Russian).
2. Romanenko V. V. Saving wood in the sustainable manufacture of railway products. *Ekologiya rodnogo kraja: problemy i puti ih resheniya: materialy XVIII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, Киров, 2023 g.* [Ecology of the Native Land: Problems and Ways to Solve Them: Proceedings of the XVIII All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation, Kirov, 2023]. Kirov, Vyatskii gosudarstvennyi universitet, 2023, pp. 365–369 (in Russian).

3. Zanegin L. A. Composite sleeper. Patent Rossiiskaya Federatsiya, no. 2256020, 2005 (in Russian).
4. Bershatskii V. Ya. Composite sleeper for railways. Patent Rossiiskaya Federatsiya, no. 2536569, 2014 (in Russian).
5. Bozelko I. K. The physico-mechanical properties of combined wooden sleepers. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Serija Lesnoe hozjajstvo*. Minsk, 2018, no. 2 (210), pp. 211–217 (in Russian).
6. Sembina G. K. Modeling as a tool for designing complex systems. *Mekhanika i tekhnologii = Mechanics and technology*, 2015, no. 1 (47), pp. 94–100 (in Russian).
7. Amangel'dieva A. A., Kishubaeva A. T. The use of Autocad Autodesk and Autodesk Inventor graphic editors as design tools in a three-dimensional computer-aided design system. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, no. 1 (71), pp. 7–14 (in Russian).
8. GOST 78–2014. *Sleepers, wooden, for broad-gauge railways*. Minsk, Gosudarstvennyi komitet po standartizatsii Respubliki Belarus', 2016. 18 p. (in Russian).
9. Koryagina O. M., Koryagin S. V. Modeling assembly units and creating their drawings in the Autodesk Inventor software environment. *Cloud of Science*. 2018, no. 1, pp. 60–73 (in Russian).

Поступила 02.02.2024 г.