

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АРОЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ОСВЕЩЕНИЯ АВТОДОРОГИ В УСЛОВИЯХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СООРУЖЕНИЯ

Зеньков Е.В.

*Иркутский национальный исследовательский технический университет;
Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск*

Ключевые слова: арочная конструкция, моделирование, напряженно-деформированное состояние, прочность, жесткость, метод конечных элементов, нормативные нагрузки.

Аннотация. В статье представлен численный расчет и анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) металлической конструкции арки на основе использования метода конечных элементов с применением препостпроцессора Femap with NXNastran. Необходимость проведения указанного расчета вызвана уникальностью предложенной конструкции арки для освещения автодороги правобережной плотины Братской ГЭС в условиях гидротехнического сооружения. Установлено, что использование стандартных способов освещения является невозможным по разным причинам. Техническое решение, предложенное студентами, потребовало расчетного обоснования его надежности в процессе эксплуатации. В работе выполнен конечно-элементный анализ деформирования арки под воздействием нормативных нагрузок согласно своду правил СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», необходимых для обеспечения безопасной эксплуатации арки в ветровом районе Братской ГЭС. Конструктивно арка выполнена из профильной трубы, имеет габаритные размеры 6 метров в высоту и 8 метров в ширину. При моделировании поведения арки использованы граничные условия закрепления и нагружения, приближенные к реальным условиям ее эксплуатации. Результаты анализа конечно-элементного моделирования показали прочностную надёжность предложенной конструкции арки.

SIMULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF ARCH STRUCTURE FOR HIGHWAY LIGHTING UNDER THE CONDITIONS OF HYDRO-ENGINEERING STRUCTURES

Zenkov E. V.

*Irkutsk National Research Technical University;
Irkutsk State Transport University, Irkutsk*

Keywords: arched structure, modeling, stress-strain state, strength, rigidity, finite element method, standard loads.

Abstract. The article presents a numerical calculation and analysis of the stress-strain state (SSS) of a metal arch structure based on the use of the finite element method using the Femap with NXNastran pre-postprocessor. The need for this calculation is due to the uniqueness of the proposed design of the arch for lighting the highway of the right-bank dam of the Bratsk HPP in the conditions of a hydraulic structure. It has been established that the use of standard lighting methods is impossible for various reasons. The technical solution proposed by the students required a calculation substantiation of its reliability during operation. In this work, a finite element analysis of the deformation of the arch under the influence of standard loads was performed in accordance with the set of rules SP 20.13330.2016 "Loads and impacts" necessary to ensure the safe operation of the arch in the wind region of the Bratsk HPP. Structurally, the arch is made of a profile pipe, has overall dimensions of 6 meters in height and 8 meters in width. When modeling the behavior of the arch, the boundary conditions of fastening and loading were used, which are close to the real conditions of its operation. The results of the finite element modeling analysis showed the strength reliability of the proposed arch design.

Введение

Освещение дороги является важным требованием обеспечения безопасности жителей каждого города. Как правило, способы освещения представляют собой систему, состоящую из осветительного прибора и опоры, на которой он закрепляется. Однако существуют территории, освещение которых привычным способом является невозможным по разным причинам.

Организация освещения автодороги правобережной плотины Братской ГЭС (БГЭС) в условиях гидротехнического сооружения требует выполнения требований [1-5]. По данным ООО «ЕСЭ-Гидрогенерация» филиала Братской ГЭС, известно, что с одной стороны участка

автомобильной дороги проходит узкая обочина и склон плотины, а с другой стороны проложен кабель связи и далее проходит железная дорога, которая имеет охранную зону. В соответствии с [1] и [4] отмечается, что размещение грузов и устройство каких-либо сооружений, в том числе причалов, автомобильных и железных дорог, на бержах и откосах каналов, плотин, дамб и у подпорных стенок в пределах расчетной призмы обрушения запрещается. Кроме того, в соответствии с [5], ограждения первой группы должны быть расположены на расстоянии не менее 0.50 м от бровки земляного полотна, при этом минимальное расстояние от ограждения до опор освещения составляет 1,25 м. В связи с этим, минимальное расстояние от бровки автодороги до опор освещения составляет 1,75 м, что при организации стационарного электрического освещения приводит к необходимости устройства насыпи, которая, в свою очередь, в любом случае попадает в пределы расчетной призмы обрушения.

В свою очередь, от администрации города Братска и ГИБДД в адрес БГЭС поступают требования об организации освещения автодороги (рис. 1). Техническая задача установки стандартных опор освещения усложняется рельефом местности (рис. 2). С одной стороны плотины (см. рис. 2) узкая обочина А, а с другой стороны проходит железная дорога Б. Анализ нормативных документов по обеспечению безопасной эксплуатации гидротехнического сооружения, в частности в [1], установлено, что со стороны А нельзя копать, бурить и в целом нарушать конструкцию плотины, поскольку призма обрушения низового откоса плотины затрагивает насыпь опор освещения. Со стороны Б нельзя проводить никаких земляных работ, т.к. там проходит кабель связи, а также нельзя трогать откос от железной дороги из-за её охранной зоны. Проработка известных конструктивных решений для организации освещения автодорог выявила множество недостатков и на основании этого предложена арочная конструкция (рис. 3).



Рис. 1. План местности БГЭС



Рис. 2. Разрез правобережной плотины БГЭС

Материалы и методы исследований

Конструктивно арка выполнена из профильной трубы (рис. 3), имеет габаритные размеры 6 метров в высоту и 8 метров в ширину. Нижние части арки установлены на металлическое основание (двутавры), соединены металлическим лентами, которые

располагаются под асфальтным покрытием дороги. Продольное крепление арки осуществляется при помощи небольших откосов, которые крепятся к металлическим основаниям, расположенным вдоль бордюра дороги. На внутренней стороне арки в верхней части устанавливается светодиодная лампа для освещения дороги. Подвод кабеля к аркам осуществляется наземным способом. Для питания ламп кабель заводится вверх по металлоконструкции самой арки.

Для обеспечения прочностной надежности [6] представленной конструктивной схемы арки выполнено моделирование и анализ ее НДС в условиях, приближенных к эксплуатационным. Указанное НДС позволит оценить прочность и жесткость конструктивных элементов и узлов арки при воздействии на них нормативных нагрузок [7, 9].

На основе твердотельной модели арки (рис. 3) разработана трехмерная дискретная модель арки в САЕ-системе Femap (рис. 4). Указанная трехмерная модель состоит из шестиузловых четырехгранных конечных элементов (тетраэдров). Дискретная модель арки состояла из 200 тыс. конечных элементов, обеспечивая при этом достаточную точность получаемых расчетных характеристик напряжений и деформаций [8]. При создании конечно-элементной модели арки принимались свойства материала арки, реально используемого при её изготовлении. В частности, были использованы следующие значения механических характеристик материала: модуль упругости $E=2,1 \cdot 10^5$ МПа; модуль сдвига $G=0,79 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент поперечной деформации $\mu=0,3$; плотность $\rho=7850$ кг/м³.

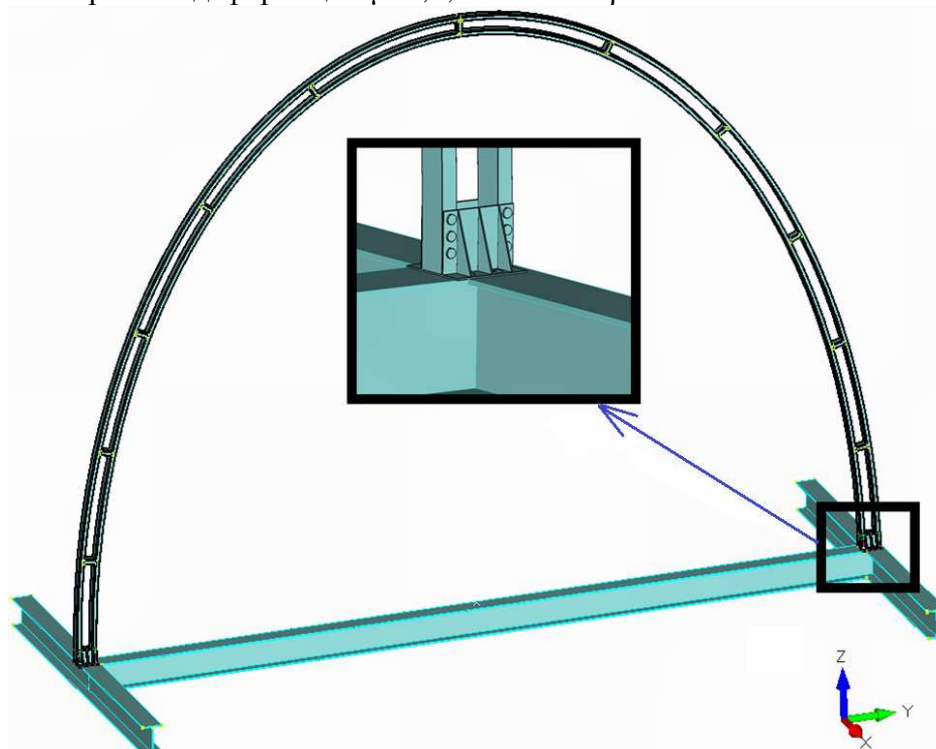


Рис. 3. Твердотельная модель арки

При разработке расчетной модели арки (рис. 4) внесены следующие упрощения. Моделирование болтового соединения арки к уголку и уголка к двутавровому основанию осуществлялось путем задания контактного взаимодействия упрощенным способом, реализованным в САЕ-системе Femap [9], основание арки (двутавр) исключено из численного расчета НДС. Граничные условия закрепления арки к двутавровому основанию выполнено по 4 отверстиям под болты в виде жесткого закрепления.

Нагрузки на арку принимались согласно своду правил СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» [10], содержащих общие технические требования по назначению нагрузок, воздействий и их сочетаний при строительстве новых, расширении, реконструкции и перевооружении действующих предприятий, зданий и сооружений. Величина и значение нормативных нагрузок по СП 20.13330.2016 приняты в соответствии с ветровым районом

г. Братска. Во внимание принимались следующие виды нагрузок на арку: воздействие поперечного ветра, воздействие лобового ветра, воздействие снега, комплексное воздействие лобового ветра и снега. Кроме того, в численных учитывался собственный вес арки и вес фонаря, подвешенного в верхней её точке. Расчётная трехмерная модель арки представлена на рисунке 4.

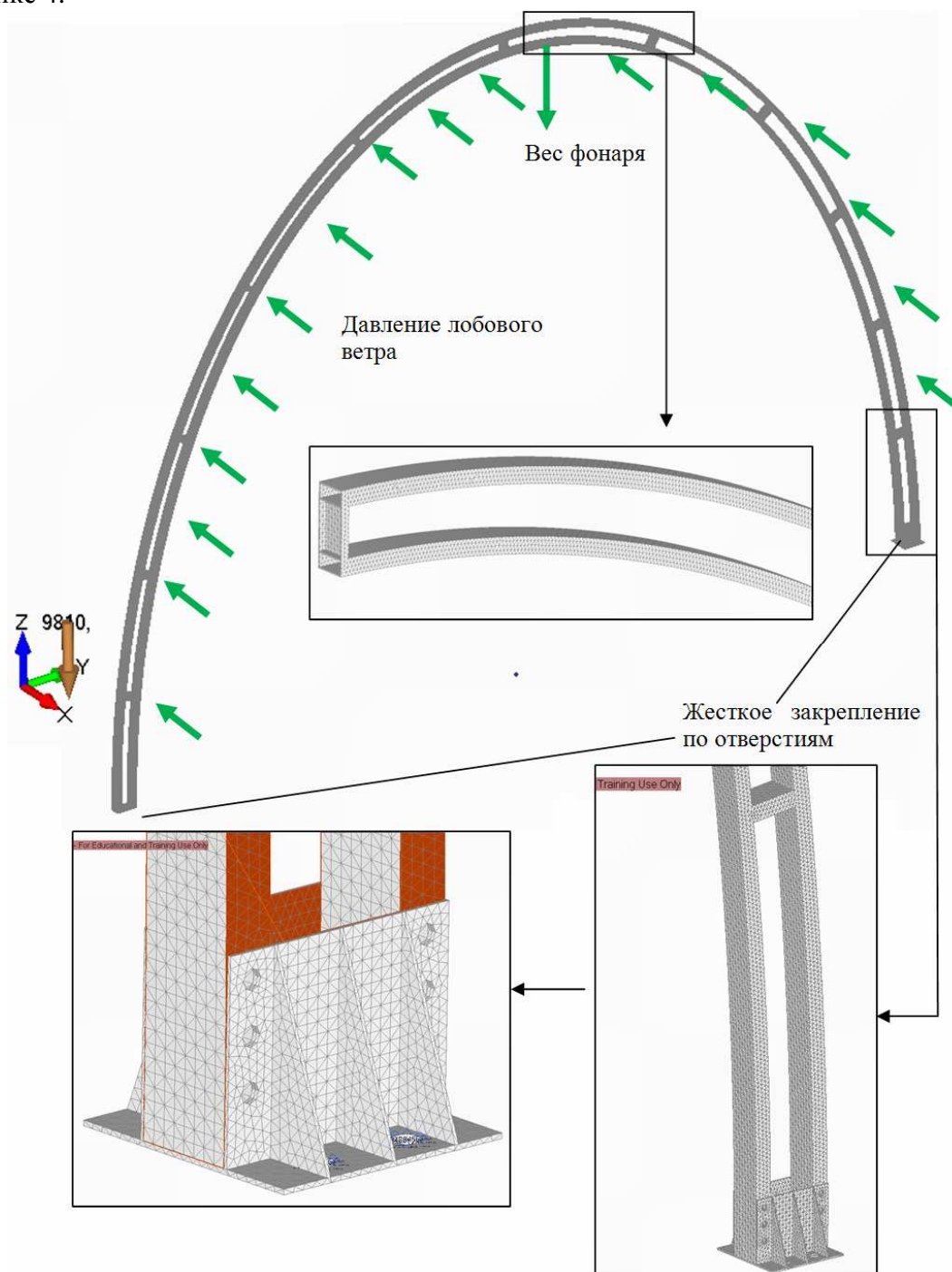


Рис. 4. Расчётная модель арки

Результаты моделирования НДС арки

На рисунках 5-7 представлены результаты численного расчета напряжений и деформаций элементов арки. Наибольший вклад в напряженно-деформированное состояние арки вносят нагрузки от совместного действия лобового ветра и снега (рис. 5). Максимальные расчётные напряжения по теории Мизеса возникают в зоне крепления арки к уголку на внутренней образующей (см. рис. 5) и равны 80 МПа. Растягивающая компонента напряжений в критерии интенсивности напряжений по Мизесу составляет 67 МПа (рис. 6).

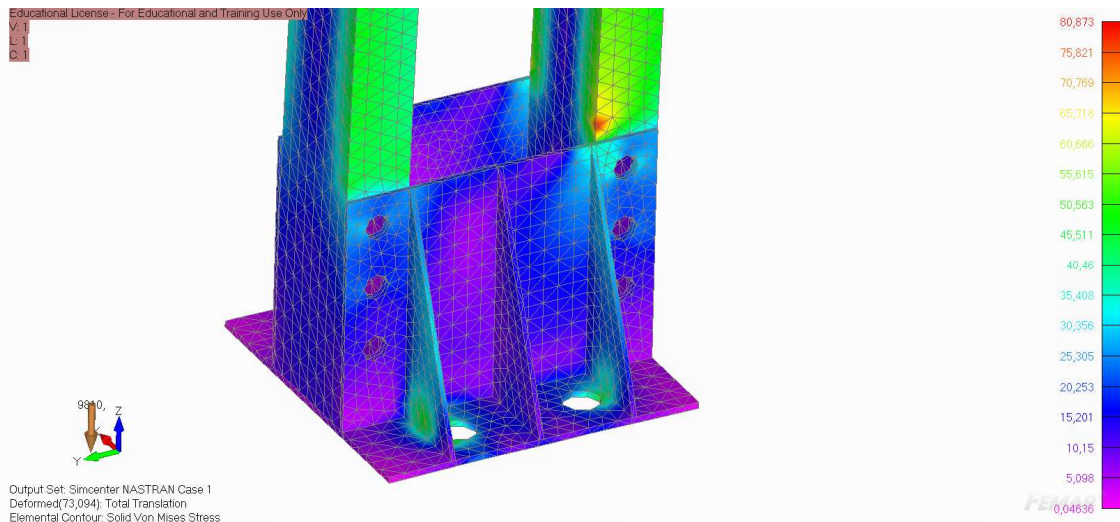


Рис. 5. Распределение поля напряжений по теории Мизеса в нижней части арки под воздействием лобового ветра и снега (вид сзади), МПа

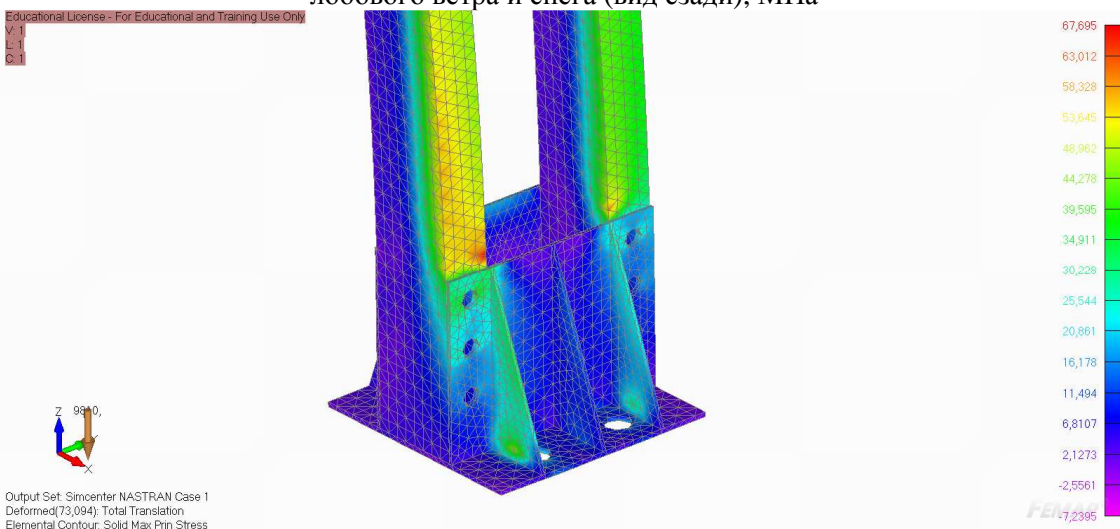


Рис. 6. Распределение поля растягивающих напряжений в нижней части арки под воздействием лобового ветра и снега (вид спереди), МПа

На рисунке 7 представлены результаты численного расчета деформаций в верхней части арки при воздействии лобового ветра и снега. Наибольшее отклонение верхнего пояса, где прикреплен фонарь, составило 73 мм.

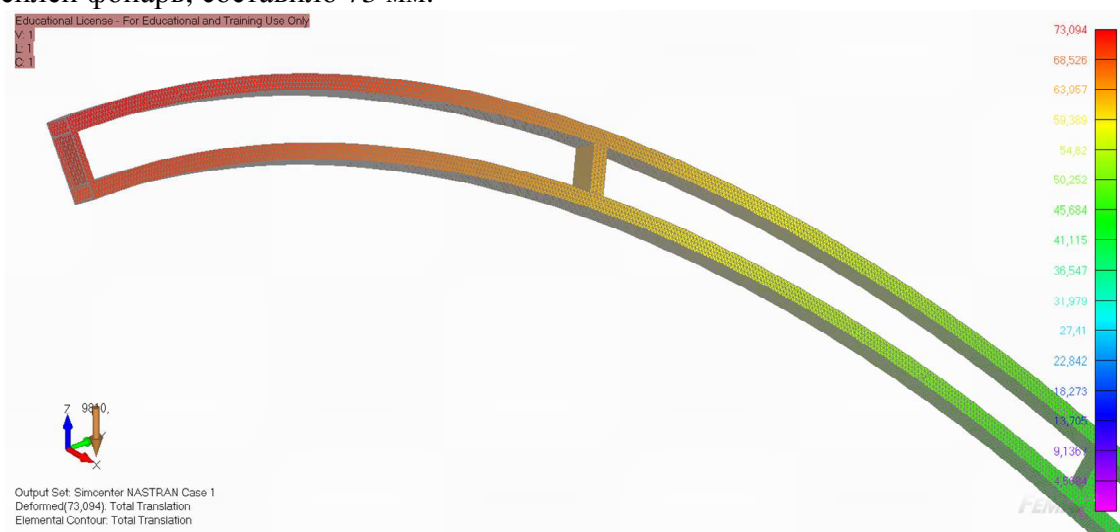


Рис. 7. Распределение поперечных для арки перемещений (в направлении оси X) под воздействием лобового ветра и снега, мм

Заключение

Численный расчет арки показал, что максимальные расчетные напряжения в конструкции арки локализуются на внутренней образующей арки ближе к уголку крепления и составляют 80 МПа. Указанные расчетные значения напряжений значительно ниже допускаемых значений напряжений для материала арки, у которой предел текучести находится в пределах 240 МПа. Наибольшие перемещения в арке, как показал численный расчет, возникают в ее верхнем поясе. Перемещения здесь равны 73 мм в направлении лобового потока ветра, что несущественно в сравнении с высотой арки в 6 метров. Интенсивность расчетных напряжений в основании уголка в зоне отверстий, являющимися базовыми для соединения арки с двутавровым основанием, не превышают 50 МПа. Кроме того, как показал численный расчет НДС арки, значения напряжений и деформаций в средней части указанного уголка (см. рис. 5 и рис. 6), незначительны, что позволяет исключить среднее ребро жесткости.

Полученные результаты в совокупности позволяют утверждать, что при рассмотренном конструктивном решении арки ее прочностная надежность обеспечена, поскольку значения напряжений и деформаций не превышают предельно допустимых значений [11]. Также, можно предполагать, что усталостная прочность арки при воздействии переменнo-изменяющихся нагрузок (сезонное усиление ветра, выпадение снега, парусность от налипающего снега и т.д.) будет обеспечена, так как значения расчетных напряжений не превышают предела выносливости материала арки.

Список литературы

1. Экспертное заключение на проект освещения автодороги. Поворот на картодром – поворот на Зябу. – Санкт-Петербург: АО ЭЦ Гидроэнергопромбезопасность, 2017. – 9 с.
2. ГОСТ 32947-2014 Межгосударственный стандарт. Дороги автомобильные общего пользования. Опоры стационарного электрического освещения. Технические требования. – М.: Стандартинформ, 2019. – 81 с.
3. ГОСТ Р 58107.1-2018 Освещение автомобильных дорог общего пользования. Нормы и методы расчета. – М.: Стандартинформ, 2018. – 55 с.
4. РД 34.20.501-95 Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей российской федерации // Министерство топлива и энергетики РФ, РАО «ЕЭС России». – М.: СПО ОРГРЭС, 1996. – 160 с.
5. СП 34.13330.2021 Автомобильные дороги // Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. – М.: МАДИ, 2021. – 92 с.
6. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. – М.: Машиностроение. 1985. – 224 с.
7. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – К.: Изд-во Дельта, 2008. – 816 с.
8. Зеньков Е.В., Цвик Л.Б., Пыхалов А.А. Дискретное моделирование напряженно-деформированного состояния плоскоцилиндрических образцов с концентраторами напряжений в виде канавок // Вестник ИрГТУ. – 2011. – №7(54). – С. 6-12.
9. Цвик Л.Б., Зеньков Е.В., Бочаров И.С. Вычислительная механика деформирования деталей вагонов: монография. – Иркутск: ИрГУПС, 2020. – 164 с.
10. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. – М.: Минстрой России, 2020. – 100 с.
11. Зеньков Е.В., Цвик Л.Б. Уточнение уравнений предельного состояния материала конструкций с учетом реального вида их деформирования // Системы. Методы. Технологии. – 2017. – №2. – С. 28-34.

References

1. Expert opinion on the road lighting project. Turn to the karting track – turn to Zyaba. – Saint-Petersburg: JSC EC Hydroenergoprombezopasnost, 2017. – 9 p.
2. GOST 32947-2014 Interstate standard. Public automobile roads. Supports of stationary electric lighting. Technical requirements. – М.: Standartinform, 2019. – 81 p.
3. GOST R 58107.1-2018 Lighting of public roads. Norms and methods of calculation. – М.: Standartinform, 2018. – 55 p.
4. RD 34.20.501-95 Rules for the technical operation of power plants and networks of the Russian Federation // Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation, RAO UES of Russia. – М.: SPO ORGRES, 1996. – 160 p.
5. SP 34.13330.2021 Automobile roads // Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation. – М.: MADI, 2021. – 92 p.
6. Kogaev V.P., Makhutov N.A., Gusenkov A.P. Calculations of machine parts and structures for strength and durability. – М.: Mechanical Engineering. 1985. – 224 p.

7. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. Handbook of Strength of Materials. – K.: Publ. house Delta, 2008. – 816 p.
8. Zenkov E.V., Tsvik L.B., Pykhalov A.A. Discrete modeling of the stress-strain state of flat-cylindrical specimens with stress concentrators in the form of grooves // Bulletin of ISTU. 2011, no. 7(54), pp. 6-12.
9. Tsvik L.B., Zenkov E.V., Bocharov I.S. Computational mechanics of deformation of railcar parts: monograph. – Irkutsk: IrGUPS, 2020. – 164 p.
10. SP 20.13330.2016 Loads and impacts. – M.: Ministry of Construction of Russia, 2020. – 100 p.
11. Zenkov E.V., Tsvik L.B. Refinement of the equations of the limiting state of the material of structures, taking into account the real type of their deformation // Sistemy. Methods. Technology. 2017, no. 2, pp. 28-34.

Сведения об авторах:

Information about authors:

<p>Зеньков Евгений Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, доцент, доцент кафедры механики и сопротивления материалов</p>	<p>Zenkov Evgenij Vyacheslavovich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of mechanics and resistance of materials Department</p>
<p>jovanny1@yandex.ru</p>	

Получена 17.08.2022