

Анализ напряженно-деформированного состояния арочной конструкции для установки на плотине Братской ГЭС при воздействии нормативных нагрузок

© Д. А. Шагдыр, И. А. Коновалов, Е. В. Зеньков

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация*

Аннотация. В статье представлен расчет и анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) металлической конструкции арки с применением численного моделирования методом конечных элементов. Техническое решение, разработанное студентами ИРНИТУ в рамках акселератора «Лаборатория энергетики», потребовало расчетного обоснования его надежности в процессе эксплуатации. Особенностью предложенной арочной конструкции является ее возможность использования для освещения автодороги на плотине Братской ГЭС в условиях гидротехнического сооружения, с учетом требований технической безопасности. 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 – шесть метров в высоту и восемь – в ширину. Нижние части арки установлены на металлическое основание (двутавры), соединены металлическим лентами, которые располагаются под асфальтным покрытием дороги. При моделировании поведения арки использованы граничные условия закрепления, приближенные к условиям ее эксплуатации. Результаты анализа конечно-элементного моделирования показали прочностную надёжность предложенной конструкции арки.

Ключевые слова: арка, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов

The stress-strain state analysis of the arch structure for installation on the dam of the Bratsk HPS under the influence of standard loads

© Darya A. Shagdyr, Ivan A. Konovalov, Evgeniy V. Zenkov

*Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation*

Abstract. The article presents the calculation and analysis of the stress-strain state (SSS) of the metal structure of the arch using numerical modeling by the finite element method. The technical solution developed by INRTU students as part of the Energy Laboratory accelerator required a calculation justification of its reliability during operation. A feature of the proposed arched structure is its ability to use the dam of the Bratsk Hydroelectric Power Station to illuminate the road in the conditions of a hydraulic structure, taking into account the requirements of technical safety. The article performed a finite element analysis of the deformation of the arch under the influence of standard loads 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 HPS. Structurally, the arch is made of a profile pipe, has overall dimensions of 6 meters in height and 8 meters in width. The lower parts of the arch are installed on a metal base (I-beams), connected by metal bands, which are located under the asphalt pavement of the road. When modeling the behavior of the arch, the boundary conditions of fastening were used, which are close to the conditions of its operation. The results of the finite element modeling analysis showed the strength reliability of the proposed arch design.

Keywords: arch, stress-strain state, finite element method

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. Но все же существуют такие территории, освещение которых привычным способом является невозможным по разным причинам.

Организация освещения автодороги правобережной плотины Братской ГЭС (БГЭС)¹ в условиях гидротехнического со-

¹ 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

оружения требует выполнения определенных условий¹. 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) [1]. С одной стороны плотины (рис. 2) узкая обочина А, а с другой проходит железная дорога Б. Анализом нормативных документов по обеспечению безопасной эксплуатации гидротехнического сооружения 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.

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.

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.

Для обеспечения несущей способности [2] представленной конструктивной схемы арки проведен анализ ее НДС. Указанное НДС позволит оценить прочность и жесткость конструктивных элементов и узлов арки при воздействии на них нормативных нагрузок [3].

На основе твердотельной модели арки разработана трехмерная дискретная модель арки в САЕ-системе *Femap*. Указанная трехмерная модель состоит из шести узловых четырехгранных конечных элементов (тетраэдры) [4]. Дискретная модель арки состояла из 200 тыс. конечных элементов, обеспечивая при этом достаточную точность получаемых характеристик НДС [5–7]. В численном расчете принимались упругие составляющие физико-механических свойств материала арки: $E = 210000$ МПа, $\mu = 0.3$.

При разработке расчетной модели арки внесены следующие упрощения. Моделирование болтового соединения арки к уголку и уголка к двутавровому основанию осуществлялось путем соответствующего задания граничных условий, основание арки (двутавр) исключено из расчета НДС. Граничные условия закрепления арки к двутавровому основанию выполнено по 4-м отверстиям под болты в виде жесткого закрепления.

Нагрузки на арку принимались согласно своду правил СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»², 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 Братска. Во внимание принимались следующие виды нагрузок на арку: воздействие поперечного ветра, лобового ветра, снега, комплексное воздействие лобового ветра и снега. Кроме того, в численном расчете учитывался собственный вес арки и вес фонаря, подвешенного в верхней её точке. Численная трехмерная модель элементов арки представлена на рис. 4.

² СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». М.: Минстрой России, 2020. 100 с.



Рис. 1. План местности БГЭС



Рис. 2. Разрез Правобережной плотины БГЭС

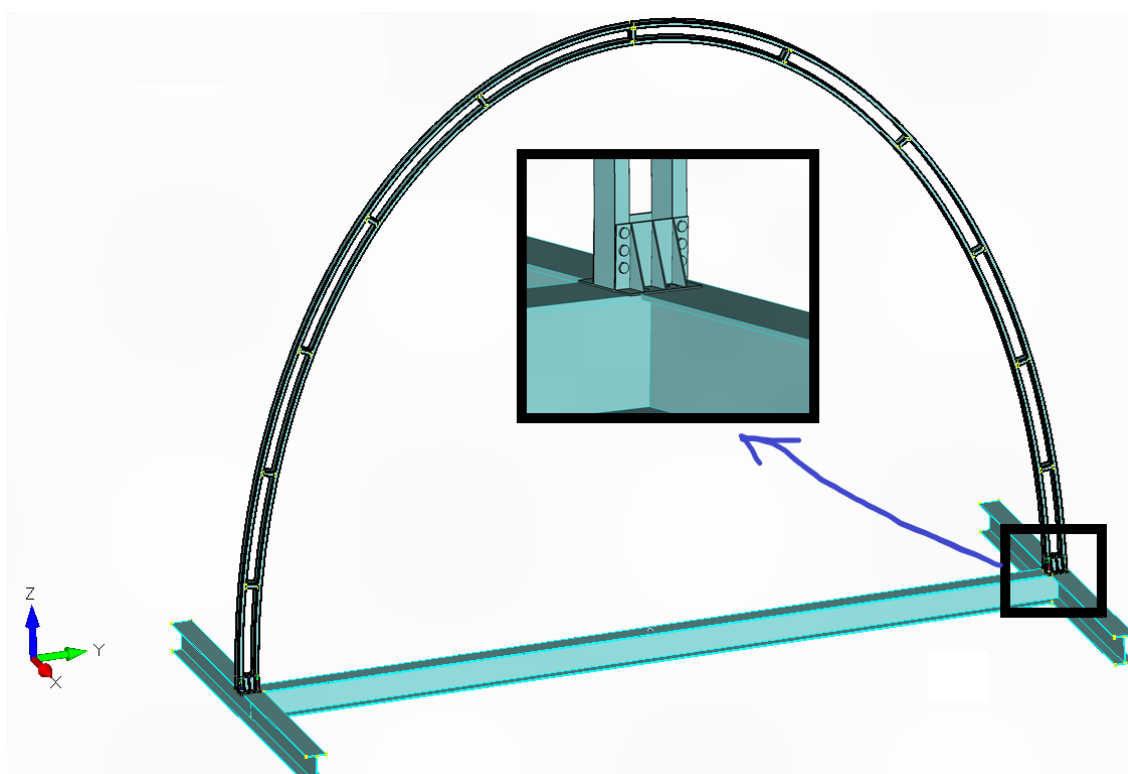


Рис. 3. Твёрдая модель арки

На рис. 4, 5 представлены результаты численного расчета напряжений и деформаций 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 (рис. 5) и равны 80 МПа.

Растягивающая доля в интенсивности напряжений по Мизесу составляет 67 МПа (рис. 6).

На рис. 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.

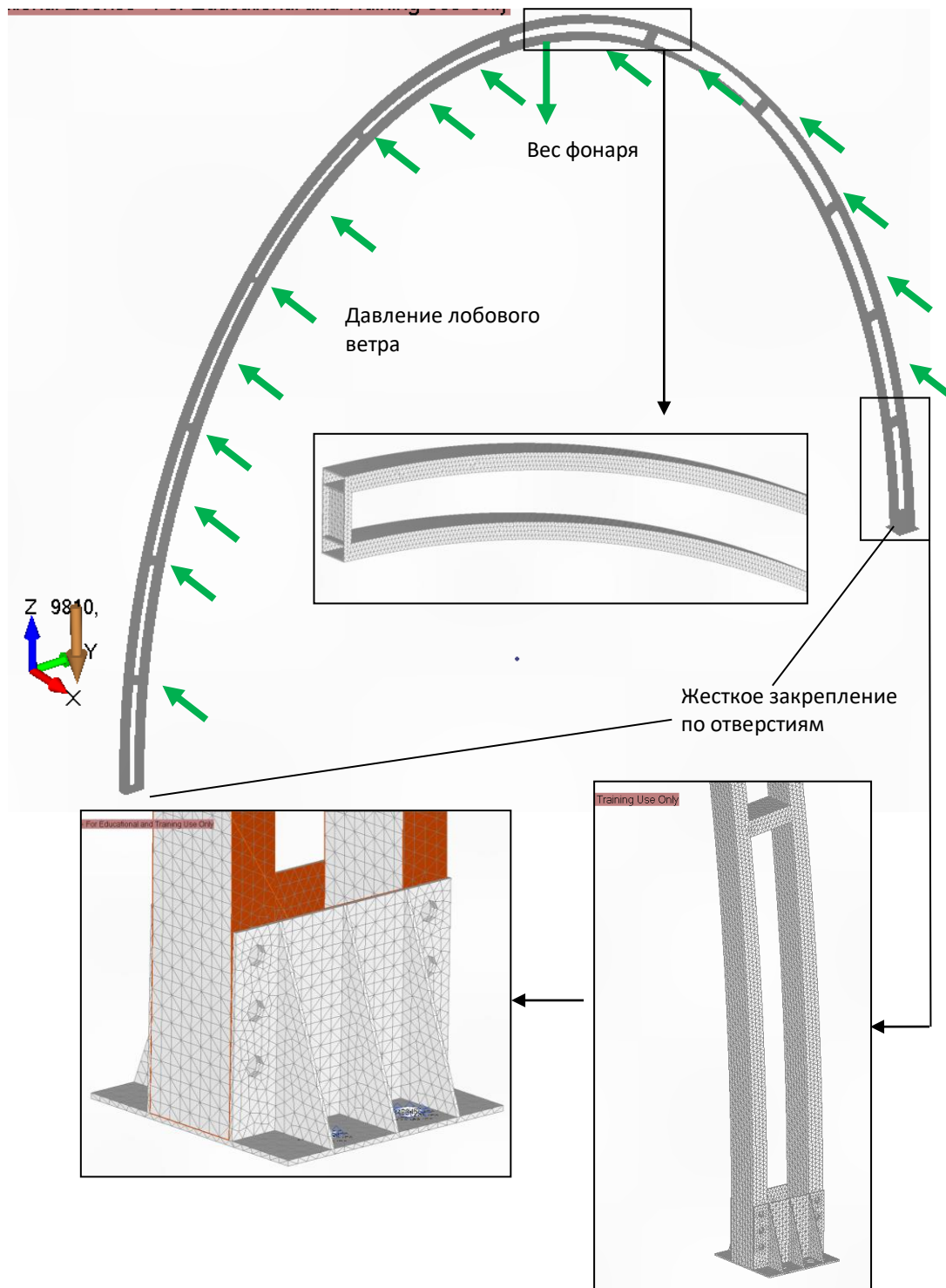


Рис. 4. Расчётная модель арки

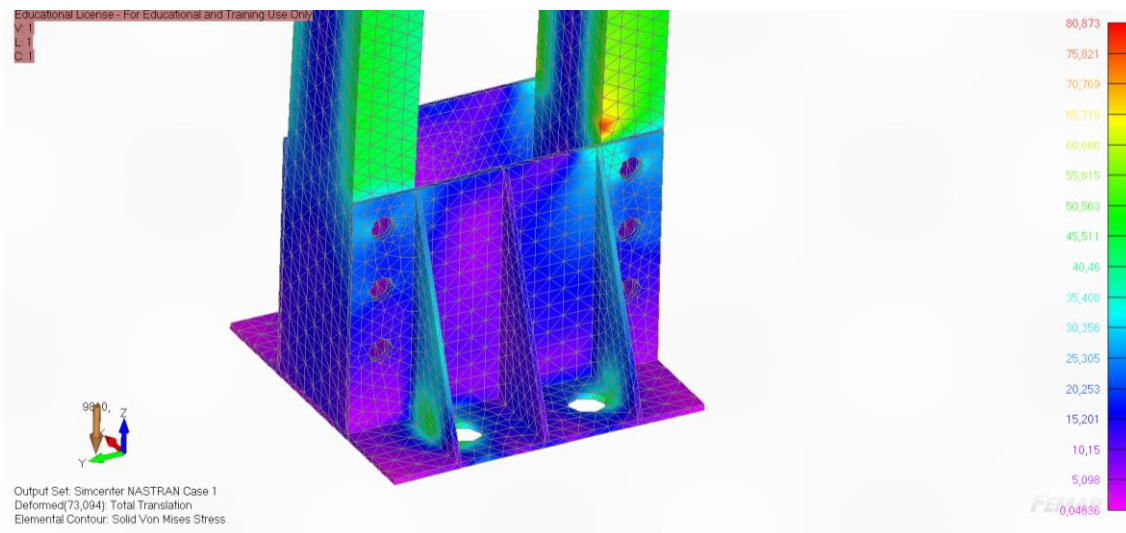


Рис. 5. Распределение поля напряжений по теории Мизеса в нижней части арки под воздействием лобового ветра и снега (вид сзади), МПа

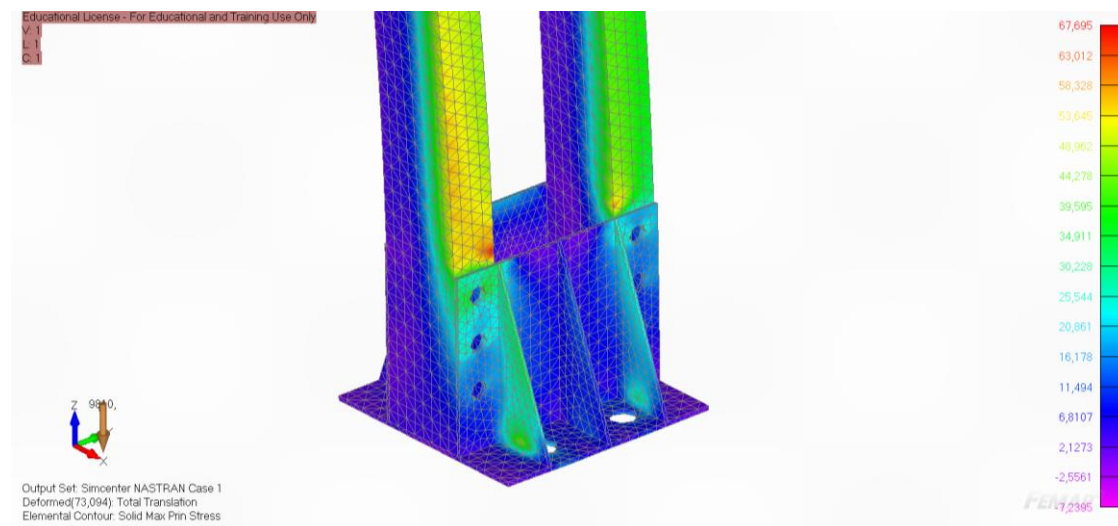


Рис. 6. Распределение поля растягивающих напряжений в нижней части арки под воздействием лобового ветра и снега (вид спереди), МПа

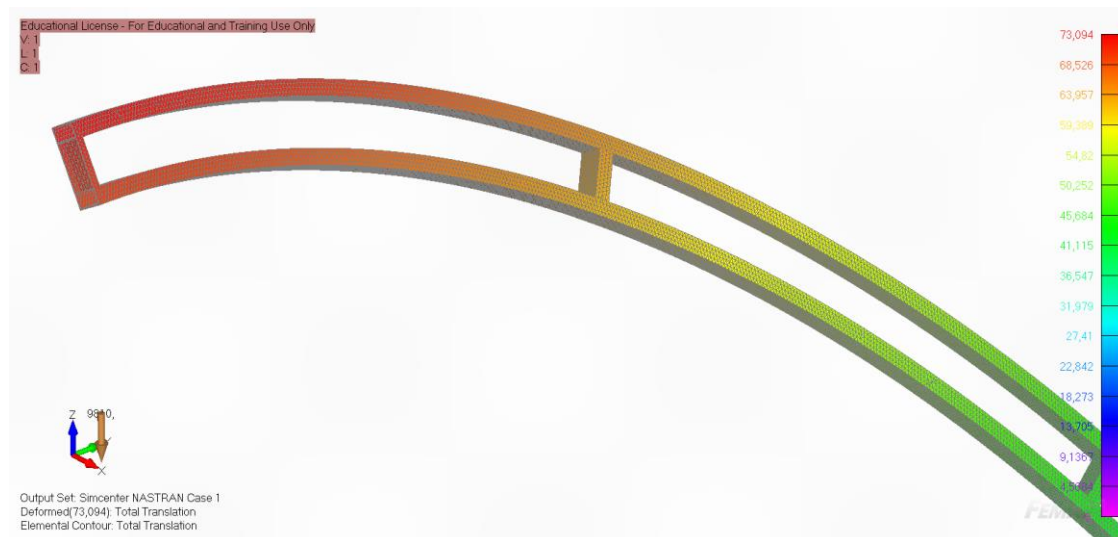


Рис. 7. Распределение поперечных для арки перемещений (в направлении оси X) под воздействием лобового ветра и снега, мм

Таким образом, 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 предельных 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 потока ветра, что несущественно в сравнении с высотой арки в 6 метров. Напряжения и деформации в уголке, являющимся узлом соединения арки с двутавровым основанием, не превышают 50 МПа. Кроме того, глядя на поле распределения

напряжений и деформаций в средней части уголка, можно заметить, что материал здесь не догружен, что позволяет исключить среднее ребро жесткости.

Полученные результаты в совокупности позволяют утверждать, что при рассмотренном конструктивном решении арки ее прочность и жесткость обеспечивается, поскольку характеристики напряжений и деформаций не превышают предельно допустимых значений [8–10]. Также можно предполагать, что усталостная прочность арки при воздействии переменного 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 источников

1. Шляхтина Т. Ф., Ким Е. Л. Организация системы мониторинга Братской ГЭС // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2015. Т. 1. С. 248–254.
2. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.
3. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов К.: Изд-во Дельта, 2008. 816 с.
4. Зенкевич О. К. Метод конечных элементов в технике. М.: Изд-во «Мир», 1975. 572 с.
5. Zenkov E. V., Tsvik L. B. Formation of divergent testing efforts and experimental evaluation of material strength under biaxial stretching // PNRPU Mechanics Bulletin. 2015. No. 4. Pp. 110-120.
6. Зеньков Е. В. О моделировании напряженно-деформированного состояния материала конструкции для оценки её конструкционной прочности на примере колеса железнодорожного вагона // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2021. № 13. С. 13–17.
7. 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.
8. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б. Расчет на прочность деталей машин. Справочник. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.
9. Кулагин А. В. Некоторые особенности решения задач сопротивления материалов для плоских рамных конструкций // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 12. С. 460–464.
10. Зеньков Е. В., Цвик Л. Б., Пыхалов А. А. Методика расчета на прочность деталей машин с учетом вида напряженного состояния // Механики XXI века. 2015. № 14. С. 57–61.

Информация об авторах / Information about the Authors

Дарья Андреевна Шагдыр,
студентка группы ЭСб-18-1,
Институт энергетик,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
darya.shagdyr@mail.ru

Darya A. Shagdyr,
Student,
Energy Institute,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russian Federation,
darya.shagdyr@mail.ru

Иван Алексеевич Коновалов,
студент группы ЭСб-18-1,
Институт энергетики,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
ik.2400@mail.ru

Ivan A. Konovalov,
Student,
Energy Institute,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russian Federation,
ik.2400@mail.ru

Евгений Вячеславович Зеньков,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры механики и
сопротивления материалов,
Институт архитектуры, строительства и дизайна,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
jovanny1@yandex.ru

Evgeniy V. Zenkov,
Cand. Sci. (Technics), Associate Professor,
Associate Professor of Mechanics and Resistance
of Materials Department,
Architecture, Construction and Design Institute,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russian Federation,
jovanny1@yandex.ru