



МРНТИ 73.41.39

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-146-1-189-200>

Определение усталости металла башенного крана при помощи программного обеспечения

А. Тулеков¹, Б. Сазамбаева¹, А. Кенесбек¹, И. Кенесбек*

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

(E-mail: auzkhkhan1337@gmail.com, a.sazambaeva_t@mail.ru, inkara_9898@mail.ru*)

Аннотация. В этой статье рассматривается применение метода конечных элементов для оценки усталостной долговечности стальных конструкций башенных кранов. Понимая пагубные последствия циклического нагружения, метод конечных элементов позволяет инженерам моделировать и анализировать распределение напряжений, прогнозировать усталостную долговечность и оптимизировать конструкции. В статье описываются ключевые этапы, от структурного моделирования до анализа напряжений и прогнозирования усталостного ресурса, подчеркивается важность этих методов для повышения безопасности и надежности работы башенных кранов. Этот комплексный подход является примером интеграции передовых инженерных методов для обеспечения долговечности и надежности критически важного строительного оборудования.

Ключевые слова: башенный кран, усталость металла, метод конечных элементов, Solidworks, 3-D моделирование.

Поступила: 29.01.2024. Доработана: 06.02.2024. Одобрена: 22.02.2024. Доступна онлайн: 29.03.2024

¹ автор для корреспонденции

1. Введение

Башенные краны играют решающую роль в современном строительстве, поднимая тяжелые материалы на большую высоту с точностью и эффективностью. Конструктивная целостность этих кранов имеет первостепенное значение для обеспечения безопасности и надежности. Одним из ключевых аспектов оценки эксплуатационных характеристик стальной конструкции башенного крана является анализ ее усталостного ресурса. Усталостное разрушение может произойти из-за повторяющихся циклов погрузки и разгрузки, что делает необходимым прогнозирование потенциальных недостатков и управление ими.

В этой статье рассматривается анализ усталостной долговечности стальной конструкции башенного крана с использованием метода конечных элементов (МКЭ) [8].

В основу расчета грузоподъемных машин положены понятия о предельных состояниях, при котором дальнейшая эксплуатация кранов невозможна. Известны три вида предельных состояний: первое – потеря несущей способности, второе – потеря несущей способности и непригодность к дальнейшей эксплуатации, третье – непригодность к эксплуатации вследствие деформации, перемещений, колебаний и других факторов, влияющих на работу машины [2].

Для предотвращения наступления предельных состояний первого вида выполняют расчеты на прочность, контактную прочность, устойчивость элементов машины. Для предотвращения второго вида предельного состояния проводят расчеты сопротивления усталости, определяют износ и нагрев. Для предотвращения предельных состояний третьего вида выполняют расчеты упругих деформаций элементов механизмов колебаний металлоконструкций, сцепления приводных колес с рельсами [3].

Известны три типа расчетов: по допускаемым напряжениям, по предельным состояниям и вероятностные методы расчета.

Усталость металла является одним из основных факторов в материаловедении и в конструировании башенных кранов [2]. Этот процесс прогрессирующего повреждения материала при циклическом нагружении стрелы, также башни крана из-за частых качаний и боковых нагрузок. В случае башенных кранов циклическая нагрузка вызвана повторяющимся подъемом и опусканием тяжелых грузов. Со временем это может привести к образованию трещин, разломов и, в конечном счете, к разрушению конструкции, если не проводить ежедневный осмотр и своевременное техническое обслуживание должным образом. Может случиться критическая ситуация – падение или обрушением башенного крана [1].

В работе для исследования рассматривалась 3D-модель стальной конструкции башенного крана, созданного программным обеспечением SolidWorks с разбивкой на конечные элементы, с присвоением каждому элементу свойств материала и граничных условий.

2. Методология исследования

2.1 Метод конечных элементов

Метод конечных элементов (МКЭ) – это численный метод, используемый для анализа сложных структур и прогнозирования их поведения в различных условиях. Он включает в себя разделение структуры на более мелкие, управляемые элементы и решение математических уравнений для моделирования поведения каждого элемента. МКЭ позволяет инженерам изучать распределение напряжений, деформацию и другие критические факторы, предоставляя ценную информацию о реакции конструкции [8]. Для легкости расчетов МКЭ использовалось программное обеспечение SolidWorks (Рисунок 1).

При анализе учитывались механические свойства стали, используемые в конструкциях крана, характеризующиеся модулем упругости, пределом текучести и усталостной прочностью. В нашем исследовании рассматривался кран QTZ40 китайского производства, который чаще всего применяется в строительной отрасли, в металлоконструкции которой применяется сталь Q345, имеющей следующие характеристики: плотность материала составляет 7,85 г/см³, предел прочности при растяжении составляет 470-630 МПа, а предел текучести составляет 345 МПа. Данные показатели необходимы для ввода в программное обеспечение для более корректного расчета усталости металла [4].

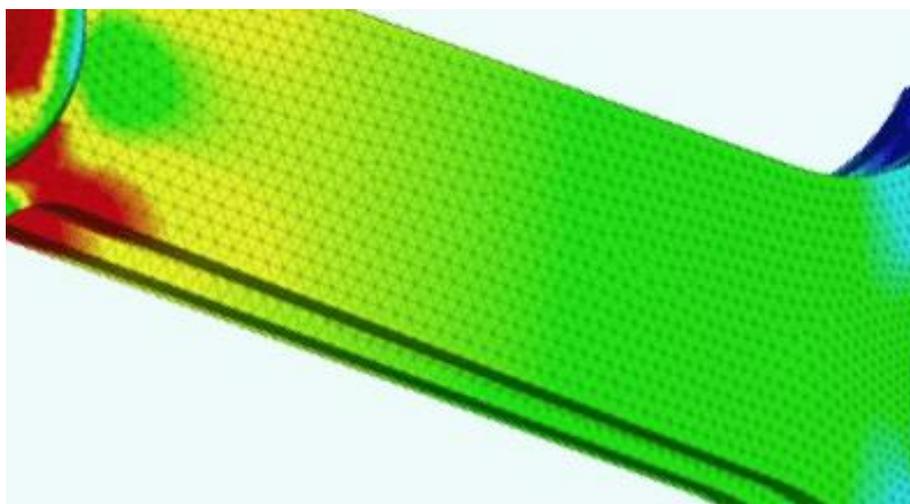


Рисунок 1. Метод конечных элементов

2.1. Условия загрузки башенного крана

Краны, как и все другие подъемные машины, испытывают внешние нагрузки, вызванные реакцией поднимаемого груза на металлоконструкцию стрелы и захватывающее груз устройство, ветровые нагрузки и нагрузки от действия массы узлов, кроме этого, испытывают внутренние напряжения в результате дефектов

технологии, которые соизмеримы с напряжениями от рабочих нагрузок. Условия загрузки определяются на основе эксплуатационных параметров крана, таких, как вес поднимаемых грузов, частота подъема и факторы окружающей среды, такие, как ветровые нагрузки [3].

Для моделирования срока службы крана применяются циклические схемы загрузки. Условия нагружения, которые воздействуют на башенный кран в течение срока его эксплуатации играют решающую роль в определении конструктивных характеристик и усталостной долговечности стальных компонентов крана. При определении условий нагружения учитываются следующие параметры: статические и динамические нагрузки.

Далее необходимо было разработать схемы циклических нагрузок, которые применяются для реалистичного моделирования срока службы крана. Эти схемы повторяют циклический характер подъема и опускания грузов, отражая повторяющиеся циклы нагрузок, испытываемых различными компонентами. Применяя динамическую нагрузку, можно предсказать, как конструкция реагирует с течением времени, и выявить области, потенциально подверженные усталости [3].

Условия загрузки не являются статичными; они могут варьироваться в зависимости от типа строительного проекта и эксплуатационных требований крана. Рассматриваются различные сценарии загрузки, такие, как внезапные пуски и остановки, экстренное торможение или непредвиденные нагрузки, для обеспечения прочности конструкции крана в различных условиях [1].

Количество циклов работы крана можно определить по следующей формуле (Таблица 1) [в]:

$$N = N_c * N_r * T \quad (1)$$

где: N_c – количество выполненных циклов крана в сутки;

N_r – количество рабочих дней в год;

T – нормативный срок службы.

Таблица 1

Класс использования башенного крана

Класс использования	Максимальное число рабочих циклов	Примечание
U0	16 000	Нерегулярное использование
U1	32 000	Нерегулярное использование
U2	63 000	Нерегулярное использование
U3	125 000	Нерегулярное использование
U4	250 000	Регулярное использование в легких условиях
U5	500 000	Регулярное использование с перерывами

U6	1 000 000	Регулярное интенсивное использование
U7	2 000 000	Интенсивное использование
U8	Более 2 000 000	Интенсивное использование

Также необходимо рассчитать, среднюю массу грузов башенного крана, используемого на данном объекте (Таб.2) [3]. Используем следующую формулу:

$$K_p = \sum \left(\frac{Q_1}{Q_{\text{НОМ}}} \right)^3 * \frac{N_1}{N_T} \quad (2)$$

где: Q_1 – масса груза, перемещаемого краном за число циклов N_1 ;

$Q_{\text{НОМ}}$ – номинальная грузоподъемность крана;

N_1 – число циклов работы крана с грузом Q_1 ;

N_T – число циклов работы крана за срок его службы, $N_T = \sum N_1$.

Таблица 2

Режим нагружения башенного крана

Режим нагружения	Номинальный коэффициент распределения нагрузок	Примечание
Q1	До 0,125	Краны, поднимающие регулярно легкие грузы, а номинальные грузы редко
Q2	До 0,25	Краны, поднимающие регулярно средние грузы, а номинальные довольно часто
Q3	До 0,5	Краны, поднимающие регулярно тяжелые грузы, а номинальные грузы часто
Q4	До 1	Краны, поднимающие регулярно грузы, близкие к номинальным

3. Результаты исследования

Анализ напряжений является важнейшим этапом оценки конструктивных характеристик стальных компонентов башенного крана при различных условиях нагружения. Этот этап включает применение метода конечных элементов для расчета и визуализации распределения напряжений по всей конструкции крана. Анализ напряжений дает ценную информацию о том, как материалы реагируют на внешние воздействия, и помогает определить потенциальные проблемные области [7].

3D-модель крана разделяется на более мелкие элементы с помощью процесса, известного, как создание сетки. Различные типы элементов, такие, как балки, фермы и оболочки, выбираются в зависимости от геометрии и сложности конструкции (Рисунок 2) [6].

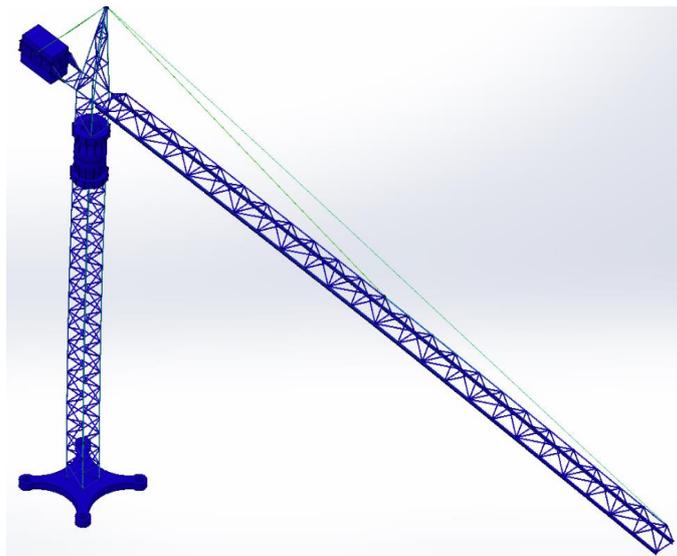


Рисунок 2. 3D-модель башенного крана

Напряжения и нагрузки определяют расчетным путем.

При расчетах, необходимых для предотвращения наступления предельных состояний первого вида, учитывают максимальную массу груза, наиболее неблагоприятные для рассчитываемого элемента, положение стрелы, и сочетания динамических нагрузок, возникающих при резких пусках и торможениях.

Правильное построение сетки важно для точного расчета напряжений. Для расчета напряжений используется следующая формула:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

где F – масса груза;

A – площадь давления.

При анализе учитываются механические свойства стали, используемой в конструкции крана, такие, как модуль упругости, предел текучести и усталостная прочность. Эти свойства определяют, как материал деформируется и реагирует на внешние нагрузки. Формула эластичной деформации выглядит следующим образом [5]:

$$\delta = \frac{F \cdot L}{E \cdot A} \quad (4)$$

где L – длина стрелы башенного крана;

E – модуль Юнга.

Напряжение фон Мизеса – это скалярное значение, получаемое из компонентов напряжения в каждой точке конструкции [2]. Оно обеспечивает единое значение, представляющее потенциальную податливость или разрушение. Инженеры используют

напряжение Фон Мизеса для оценки того, находятся ли материалы в допустимых пределах, и для выявления областей, которые могут потребовать усиления [5]. Формула выглядит следующим образом:

$$\sigma_{v-m} = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2} \quad (5)$$

где: σ – это нормальный стресс;
 τ – это напряжение сдвига.

Основываясь на распределении напряжений и свойствах материала, можно оценить усталостную долговечность компонентов крана. Кривая S-N, связывающая напряжение и количество циклов до разрушения, часто используется для прогнозирования возможного возникновения усталостного разрушения. Формула количества циклов отказа выглядит следующим образом [7]:

$$N_f = \left(\frac{S_f}{\sigma_{v-m}} \right)^m \quad (6)$$

где: S_f – усталостная прочность металла;
 $\sigma_{(v-m)}$ – это напряжение фон Мизеса;
 m – это наклон кривой S-N.

К модели применяются условия загрузки, включая вес поднимаемых грузов, частоту подъема и факторы окружающей среды, такие, как ветровые нагрузки. На этом этапе моделируются сценарии практические, что позволяет инженерам наблюдать за поведением крана в различных условиях эксплуатации [5].

Модель подвергается граничным условиям, представляющим ограничения, которые имитируют реальную среду крана. Эти ограничения включают крепления в основании или соединения с другими конструкциями. Граничные условия играют решающую роль в определении того, как кран взаимодействует с окружающей средой.

Программное обеспечение МКЭ рассчитывает распределение напряжений по всей конструкции крана, это дает возможность визуализировать концентрацию напряжений, характер деформаций и критические точки, в которых конструкция наиболее подвержена усталости. Области с высоким напряжением тщательно исследовались на предмет потенциальных уязвимостей конструкции.

Анализ напряжений помог выявить критические области, в которых вероятно возникновение усталостных повреждений, изучение которых даст возможность дальнейшей модификации конструкции для повышения общей структурной целостности крана (Рисунок 3), (Рисунок 4) [6].

Наиболее напряженным местом стрелы является соединение с оттяжным канатом, в башне – ее оголовник. Экстремальные усилия и напряжения в стреле возникают, когда груз находится на максимальном вылете.

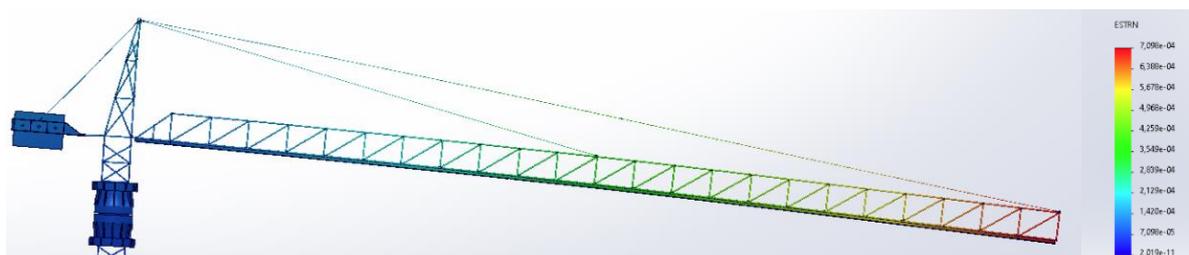


Рисунок 2. МКЭ деформации стрелы крана

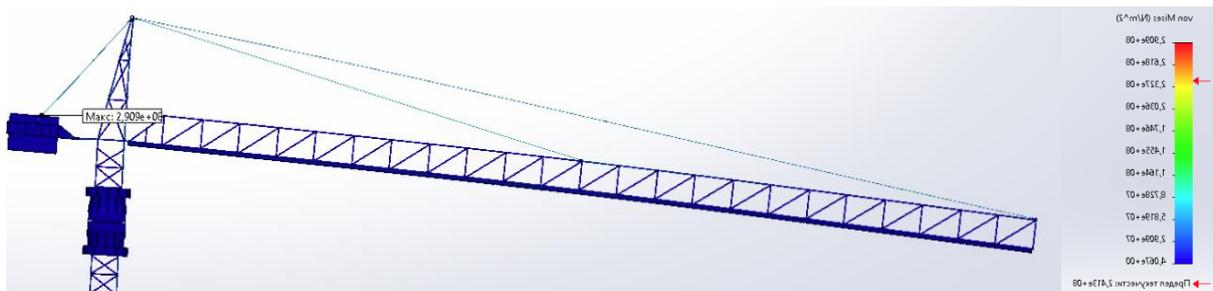


Рисунок 3 – МКЭ напряжения на стреле крана

По сути, анализ напряжений явился ключевым этапом метода конечных элементов, дающим полное представление о том, как стальная конструкция башенного крана реагирует на различные условия нагрузки. Эти знания имеют решающее значение для оптимизации конструкции, обеспечения безопасности и продления срока службы крана [6]. Благодаря этому, можно выявить критические места крана и усталость металлоконструкции для более тщательного обслуживания.

4. Вывод

Установлено, что современные инженерные технологии дают ценную информацию о сложном поведении крана в различных условиях нагрузки.

Выявлено, что анализ усталостной долговечности стальной конструкции башенного крана с помощью МКЭ, оценка пригодности к эксплуатации, направленной на использование перспективной конструкции, является ключевым процессом в обеспечении их безопасности, надежности и долговечности.

Комплексный подход, приведенный в этой статье, включает моделирование конструкции, определение условий нагружения на основе эксплуатационных параметров и использование МКЭ для анализа напряжений. В ходе исследования учитывались такие критические факторы, как вес поднимаемых грузов, частота подъема и элементы окружающей среды, такие, как ветровые нагрузки. Учет свойств материала и точных граничных условий обеспечили детальное понимание того, как стальные компоненты крана реагируют на внешние воздействия [8].

Установлено, что метод конечных элементов позволяет детально изучить конструктивную целостность башенного крана, позволяя инженерам принимать основанные на данных решения по усовершенствованию конструкции, что повышает безопасность и надежность крана, также способствует общей эффективности и продуктивности строительных проектов.

Поскольку строительная отрасль продолжает развиваться, интеграция передовых инженерных методологий, таких, как МКЭ, подчеркивает приверженность к инновациям и безопасности.

Выводы, полученные в результате анализа нагрузок, обеспечивают основу для принятия обоснованных решений, в конечном счете способствуя разработке более устойчивых и долговечных башенных кранов, которые играют жизненно важную роль в формировании нашей застроенной среды.

Вклад авторов:

А.Б. Тулеков – концепция, методология, сбор данных, экспериментальная часть.

Б.Б. Сазамбаева – моделирование, анализ, визуализация, заключение.

А.Б. Кенесбек – анализ литературы, помощь с экспериментом, моделирование.

И.Б. Кенесбек – визуализация, интерпретация, написание, редактирование.

Список литературы

1. Синельщиков А.В., Дроздов В.Н. Расчетные методы определения остаточного ресурса несущих металлоконструкций грузоподъемных кранов// Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2012. – С.62-65.
2. Наварский Ю.В. Грузоподъемные машины: учебно-методическое пособие. – Екатеринбург, 2006. – 100 с.
3. Богданов А. П., Гайнуллин А. А., Ефимов А. А., Левкович Р. В., Наумов Д. С., Окулов К. Ю. Обзор методов укрупненной оценки остаточного ресурса оборудования, эксплуатируемого на опасных производственных объектах. – Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – № 1(11). – С. 98-105.
4. «Сталь Q345». Свойства стали Q435. – (https://emk24.ru/wiki/stali-gb/stal-q345_8172675/). – 2024.
5. Сурашов Н. Т. Подъемно-транспортные машины: учебник. – МОиН РК. – Алматы: Ассоц. вузов. – 2015. - 362 с.
6. Алямовский А.А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. – М. – БХВ-Петербург. – 2016. – 800 с.
7. Международный журнал машиностроения «Проектирование и конечный анализ подъемной стрелы». – Ноябрь 2013. – 135-140 с.
8. Международный журнал передовых инженерных исследований «Моделирование и конечный элементный анализ телескопической стрелы крана». – Декабрь 2011. – С. 51-52.

А. Тулеков¹, Б. Сазамбаева¹, А. Кенесбек¹, И. Кенесбек¹

¹*Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан*

Бағдарламалық жасақтаманың көмегімен мұнара кранының металының шаршауын анықтау

Аңдатпа. Мақалада мұнара крандары болат конструкцияларының пайдалану беріктігін бағалау үшін шекті элементтер әдісін (ШЭӘ) қолдану қарастырылады. Циклдік жүктеменің зиянды ықпалын түсіну арқылы соңғы элементтер әдісі инженерлерге кернеудің таралуын модельдеуге және талдауға, тозудың беріктігін болжауға, құрылымдарды оңтайландыруға мүмкіндік береді. Мақалада құрылымдық модельдеуден бастап кернеуді талдау мен тозу ресурсын болжауға дейінгі негізгі мәселелер анықталған. Мұнара крандарының қауіпсіздігі мен төзімділігін арттыру үшін оңтайлы әдістер жүйеленген. Бұл кешенді тәсіл маңызды құрылыс жабдықтарының беріктігі мен сенімділігін қамтамасыз ету үшін озық инженерлік әдістерді біріктірудің мысалы бола алады.

Түйін сөздер: мұнара краны, металдың тозуы, шекті элемент әдісі, Solidworks, 3-D модельдеу

A. Tulekov¹, B. Sazambayeva¹, A. Kenesbek¹, I. Kenesbek¹

¹*L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Republic of Kazakhstan*

Determination of metal fatigue of a tower crane using software

Abstract. This article discusses the application of the finite element method (FEM) to assess the fatigue life of steel structures of tower cranes. By understanding the detrimental effects of cyclic loading, the finite element method allows engineers to model and analyze stress distribution, predict fatigue life, and optimize structures. The article describes the key stages, from structural modeling to stress analysis and fatigue life forecasting, and emphasizes the importance of these methods to improve the safety and reliability of tower cranes. This comprehensive approach is an example of integrating advanced engineering techniques to ensure the durability and reliability of critical construction equipment.

Keywords: tower crane, metal fatigue, finite element method, Solidworks, 3-D modeling.

References

1. Sinelshchikov A.V., Drozdov V. N. Raschetnye metody opredeleniya ostatochnogo resursa nesushchih metallokonstrukcij gruzopod"emnyh kranov [Computational methods for determining the residual life of load-bearing metal structures of lifting cranes]. –Bulletin of the Astrakhan State Technical University. – 2012. – pp.62-65.
2. Navarsky Yu.V. Gruzopod"emnye mashiny. Uchebno-metodicheskoe posobie [Lifting machines. Educational and methodical manual]. – Yekaterinburg. – 2006. – 100s..

3. Bogdanov A. P., Gainullin A. A., Efimov A. A., Levkovich R. V., Naumov D. S., Okulov K. Yu. Obzor metodov ukрупnennoj ocenki ostatochnogo resursa oborudovaniya, ekspluatiruemogo na opasnyh proizvodstvennyh ob"ektah [Review of methods for the integrated assessment of the residual life of equipment operated at hazardous production facilities]. – Current problems of the humanities and natural sciences. – 2015. – № 1(11). – Pp. 98-105.
4. «Stal' Q345». Svoystva stali Q435 ["Steel Q345". Properties of Q435 steel]. – ([https://emk24.ru/wiki/stali-gb/stal-q345_8172675 /](https://emk24.ru/wiki/stali-gb/stal-q345_8172675/)). – 2024.
5. Surashov N. T. Pod"emno-transportnye mashiny: uchebnik [Lifting and transport machines: textbook]. – MOiN RK. – Almaty: Assoc. Universities. – 2015. – 362 p.
6. Alyamovsky A.A. SolidWorks. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoj praktike [SolidWorks. Computer modeling in engineering practice]. – М. – BHV-Petersburg. – 2016. – 800 с.
7. Mezhdunarodnyj zhurnal mashinostroeniya. «Proektirovanie i konechnyj analiz pod"emnoj strely» [International Journal of Mechanical Engineering]. ["Design and final analysis of the lifting boom"]. – November 2013. – 135-140 p.
8. Mezhdunarodnyj zhurnal peredovyh inzhenernyh issledovaniy. «Modelirovanie i konechnyj elementnyj analiz teleskopicheskoy strely kрана» [International Journal of Advanced Engineering Research]. ["Modeling and finite element analysis of a telescopic crane boom"]. – December 2011. – 51-52 p.

Сведения об авторах:

А.Б. Тулеков – докторант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан.

Б.Б. Сазамбаева – доктор технических наук, профессор, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан.

А.Б. Кенесбек – Ph.D, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан.

И.Б. Кеңесбек – докторант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан.

А.Б. Төлеков – Көлік, көлік техникасы және технологиялардың үшінші курс докторанты, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтпаев көшесі 2, Астана, Қазақстан;

Б.Б. Сазамбаева – техника ғылымдарының докторы, профессор, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтпаев көшесі 2, Астана, Қазақстан;

А.Б. Кенесбек – Ph.D., Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтпаев көшесі 2, Астана, Қазақстан;

И.Б. Кеңесбек – Көлік, көлік техникасы және технологиялардың бірінші курс докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтпаев көшесі 2, Астана, Қазақстан.

А.В. Tulekov – third-year doctoral student in Transport, Transport Engineering and Technology, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev str., Astana, Kazakhstan;

В.В. Sazambayeva – Doctor of Technical Sciences, Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev str., Astana, Kazakhstan;

A.B. Kenesbek – Ph.D. L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev str., Astana, Kazakhstan;

I.B. Kenesbek – first-year doctoral student in transport, Transport Engineering and Technology, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev str., Astana, Kazakhstan.



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).