

**Информация об авторах**

*Горякина Ольга Валентиновна* – заведующий лабораторией смазочных материалов, Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, г. Москва.

*Мартыненко Любовь Викторовна* – старший преподаватель кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: liuba.martinenko@yandex.ru

*Тимакова Елена Андреевна* – заведующий лабораторией колесных пар и буксового узла, Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, г. Москва, e-mail: Timakova.elena@vniizht.ru

*Фофонова Анна Ивановна* – старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, г. Москва.

*Шахова Надежда Ивановна* – научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, г. Москва.

**Для цитирования**

Горякина О. В. Оценка работы комплекса технических измерений и применение инновационных технологий на Восточно-Сибирской железной дороге / О. В. Горякина, Л. В. Мартыненко, Е. А. Тимакова, А. И. Фофонова, Н. И. Шахова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 119–127. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).119–127

**Authors**

*Ol'ga Valentinovna Goryakina* – Head of the Laboratory of Lubrication Materials, All-Russian Research Institute of Railway Transport, Moscow.

*Lyubov' Viktorovna Martynenko* – Senior lecturer at the Subdepartment of Rail Cars and Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: liuba.martinenko@yandex.ru

*Elena Andreevna Timakova* – Head of the Laboratory of Wheel Pairs and Axle Box, All-Russian Research Institute of Railway Transport, Moscow, e-mail: Timakova.elena@vniizht.ru

*Anna Ivanovna Fofonova* – Senior researcher, All-Russian Research Institute of Railway Transport, Moscow.

*Nadezhda Ivanovna Shakhova* – Researcher, All-Russian Research Institute of Railway Transport, Moscow.

**For citation**

Goryakina O. V., Martynenko L. V., Timakova E. A., Fofonova A. I., Shakhova N. I. Otsenka raboty kompleksa tekhnicheskikh izmerenii i primeneniye innovatsionnykh tekhnologii na Vostochno-Sibirskoi zheleznoi doroge [Estimating the work of the technical measurements complex and using innovative technologies on the East-Siberian railway]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019. Vol. 62, No. 2. Pp. 119–127. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).119–127

УДК 629.7.02

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).127–133

**Р. А. Туранов<sup>1</sup>, А. А. Пыхалов<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 14 марта 2019 г.

**АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ СХОДИМОСТИ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ ТВЕРДОГО ДЕФОРМИРУЕМОГО ТЕЛА НА ПРИМЕРЕ СОЕДИНЕНИЯ КРЫЛА САМОЛЕТА С ФЮЗЕЛЯЖЕМ**

**Аннотация.** В статье представлен анализ напряженно-деформированного состояния узлов соединения крыла и фюзеляжа самолета, как наиболее ответственной части с точки зрения прочности и надежности работы конструкции планера самолета. Он проводился на примере конструкции соединения типа «уха – вилка», часто применяемого в авиастроении. Исследование выполнено на основе метода конечных элементов с анализом точности и сходимости его численного решения. Особенностью работы является использование в решении метода конечных элементов контактной задачи теории упругости. Представленный подход позволяет при оценке высоконагруженных сборных конструкций идентифицировать необходимый уровень дискретизации в конечно-элементной модели при наличии в ней областей с концентрацией напряжений. Исследование проводилось в сравнении с использованием известных результатов экспериментально-теоретического подхода, представленного А. Войтом, и традиционно применяемого при проектировании и определении напряженного состояния соединения типа «уха – вилка». Спецификой традиционного подхода является осреднение напряжений деформируемых деталей «Уха» и «Вилки» в областях с максимальным градиентом напряжений. В этом случае анализ точности и сходимости метода конечных элементов с решением контактной задачи позволяет с высоким уровнем достоверности определить и оценить полную картину распределения напряжений в рассматриваемом соединении. Результаты анализа направлены на повышение надежности и долговечности работы узлов типа «уха – вилка», а также снижение прямых материальных и временных затрат при их проектировании.

**Ключевые слова:** самолет, соединение «уха – вилка», конечные элементы, точность, сходимость, напряженно-деформированное состояние, авиастроение, метод конечных элементов.



R. A. Turanov<sup>1</sup>, A. A. Pykhalov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

Received: March 14, 2019

## ANALYSIS OF THE ACCURACY OF THE CONVERGENCE OF A NUMERICAL SOLUTION OF THE METHOD OF FINITE ELEMENTS AND THE CONTACT PROBLEM OF A SOLID DEFORMABLE BODY ON THE EXAMPLE OF THE WING OF THE PLANE CONNECTED WITH THE FUSELAGE

**Abstract.** The paper presents an analysis of the stress-strain state (SSS) of the nodes connecting the wing and fuselage of the aircraft as the most critical part in terms of strength and structural safety of the airframe design. The analysis was made by the example of the structure of the lug type joint, which is often used in aircraft construction. The study was conducted on the basis of the finite element method (FEM), with an analysis of the accuracy and convergence of its numerical solution. A special feature of the study is the use of the contact problem of the theory of elasticity in the FEM solution. The presented approach allows, in the analysis of highly loaded prefabricated structures, identifying the required level of discretization in the finite element (FE) model with the presence of areas with stress concentration in it. The study was conducted in comparison with the use of the well-known results of an experimental and theoretical approach presented by A. Voit, and traditionally used in the design and determination of the stress state of a lug joint. The specificity of the traditional approach is the averaging of the stresses of the lug deformable parts in areas with a maximum stress gradient. In this case, an analysis of the accuracy and convergence of the FEM with the solution of the contact problem makes it possible, with a high level of confidence, to determine and evaluate the complete picture of the stress distribution in the joint under consideration. The results of the analysis are aimed at improving the reliability and durability of the work of the lug type nodes, as well as at reducing the direct material and time costs during their designing.

**Keywords:** aircraft, lug joint, finite elements, accuracy, convergence, stress-strain state.

### Введение

Традиционно на этапах проектирования сложных механических систем особое внимание уделяется наиболее ответственным узлам, для которых используются особые экспериментально-теоретические методики [1–7]. Например, таким узлом является соединение «ухо – вилка», применяемое для крепления крыла с фюзеляжем и показавшее свою эффективность. В этом креплении используется расчетно-экспериментальная методика, предложенная А. Войтом [8], которая для данного соединения является базовой. Дальнейшее развитие и более углубленное понимание физики напряженно-деформированного состояния (НДС) представленного узла (соединения) может быть связано с применением метода конечных элементов (МКЭ) [9–13], построенного с использованием решения контактной задачи [14–16] теории упругости. Однако в этом случае требуется

дополнительное изучение параметров точности и сходимости численного решения МКЭ в областях деталей узла, где имеет место концентрация напряжений, т. е. в этих областях при работе узла наблюдается высокий градиент изменения величин исследуемых напряжений, и проблема заключается в точности их вычисления. Относительно этих зон и определяется работоспособность рассматриваемого узла.

Таким образом, решение контактной задачи МКЭ позволит выявить эти особые области в деталях узла и уточнить величину концентрации напряжений.

Основным критерием, определяющим точность и сходимость МКЭ, является уровень плотности конечных элементов в модели. При этом в каждом случае погрешность можно оценить, сравнивая решения, полученные при различной плотности разбиения на конечные элементы (КЭ). До-

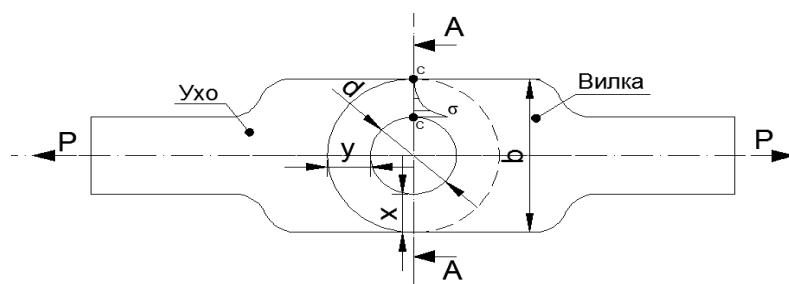


Рис. 1. Традиционная расчетная схема (вид сверху) соединения «ухо – вилка»



полнением для зон с концентрацией напряжений является изучение точности сходимости численного решения при выходе на особые точки, где значение напряжений максимально.

Исходя из сказанного, можно утверждать, что представленная задача исследования точности и сходимости МКЭ для узлов с особыми точками поля напряжений актуальна.

Расчет геометрических параметров соединения типа «ухо – вилка» (рис. 1) выполнен по традиционной расчетной схеме, описанной А. Войтом, с действующей нагрузкой  $P = 10\,000$  кгс, вызывающей, по некоторым предположениям [1, 17], разрыв проушины. Рассчитанные в этом случае геометрические размеры соединения также представлены (табл. 1).

#### Точность и сходимость решения контактной задачи на примере соединения типа «ухо – вилка»

Этапами построения КЭ модели соединения являются:

- построение и параметризация геометрической модели;
- генерация КЭ сетки деталей;
- присвоение к конечным элементам свойств материала;
- генерация сетки контактных КЭ с условиями сопряжения деталей соединения;
- генерация граничных условий;
- моделирование действующей нагрузки.

С целью анализа точности и сходимости центральная часть болта и другие цилиндрические части «уха» и «вилки» параметризованы на специальные дуги, по которым выполнена генерация конечных элементов в модели.

Геометрическая модель экспортирована в систему препроцессор «Patran» для последующего анализа КЭ модели. Детали соединения и крепежные элементы выполнены в виде конечных эле-

ментов типа «HEX», а также небольшое количество КЭ типа «Wedge».

Основные характеристики материала для КЭ выбраны в виде сплава 30ХГСА.

Для анализа НДС соединения, выполняемого с решением контактной задачи твердого деформируемого тела, используется контактный конечный элемент (типа «Gap»), устанавливаемый между узлами контактирующих поверхностей КЭ модели соединения. В этом КЭ определяются исходные условия сопряжения между отдельными деталями внутри соединения. В рассматриваемой КЭ модели между всеми контактирующими поверхностями и по всем направлениям используется нулевая посадка. В целом условия сопряжения можно изменять. Данная посадка (нулевая) выбрана для сравнения значений КЭ решения с эмпирическим решением задачи по Войту [1]. Для болта контактирующие поверхности расположены в его осевом и радиальном направлении.

Для соединения гайки с болтом используется другой КЭ типа «Glue-контакт», эмитирующий резьбовое соединение.

Граничные условия по перемещениям установлены на торце вилки (рис. 2). Данная схема выбрана с учетом того, чтобы реакции от граничных узлов были максимально приближены к реальным условиям. Внешняя нагрузка на модель выполнена в виде приложения расчетного усилия в  $10\,000$  кгс к торцу проушины в виде распределенной силы  $P$ .

В результате генерации сетки с повышением уровня плотности КЭ сетки получено три варианта моделей:

- 2 453 узла – 730 элементов;
- 8 391 узел – 5 497 элементов;
- 35 709 узлов – 26 671 элемент (рис. 3).

Анализ НДС представленных моделей позволил получить картины распределений напряже-

Т а б л и ц а 1

Параметры, необходимые для построения расчетной конечно-элементной модели

Наименование параметра	Формула	Полученное значение
Площадь среза	$F = \frac{P}{\tau_B m}$	84 мм <sup>2</sup>
Диаметр болта	$d = \sqrt{\frac{4P}{\tau_B m \pi}}$	11 мм
Толщина проушины	$a = \frac{P}{d \mu \sigma_B}$	7 мм
Ширина проушины $b$	Значение $b/d$ в пределах 2...3	25 мм
Расстояние от болта до края проушины $x$	$x = \frac{b-d}{2}$	7 мм
Расстояние от болта до края проушины $y$	$y = x \left( 0,208 \frac{b}{d} - 1,177 \right) + \frac{P}{0,96 a \sigma_B}$	7 мм



ний в рассматриваемой сборной конструкции.

В качестве особой зоны с концентрацией напряжений [18] выбрана линия С-С (рис. 4, 5) в области отверстий на «проушине» и «вилки». Эта зона исследовалась в работе Войта [1] на основе

результатов натуральных испытаний образцов соединения «ухо – вилка».

Результаты НДС, полученные для точки с максимальным уровнем (табл. 2), показывают, что с увеличением плотности сетки в области с кон-

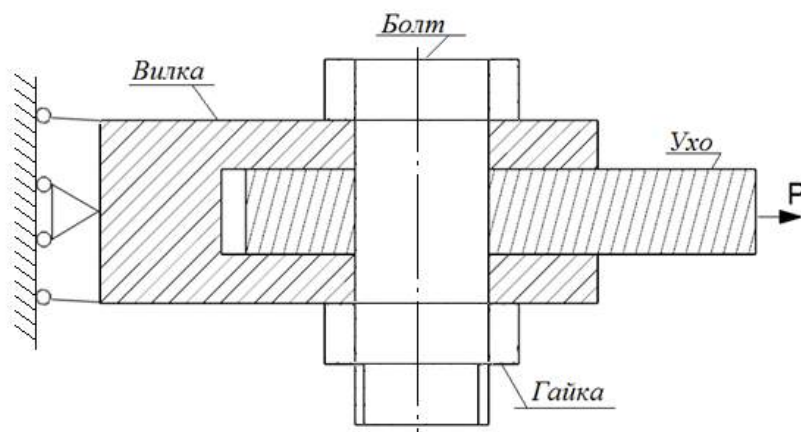


Рис. 2. Сема нагружения и граничных условий для соединения «ухо – вилка» и линии действия силовых факторов

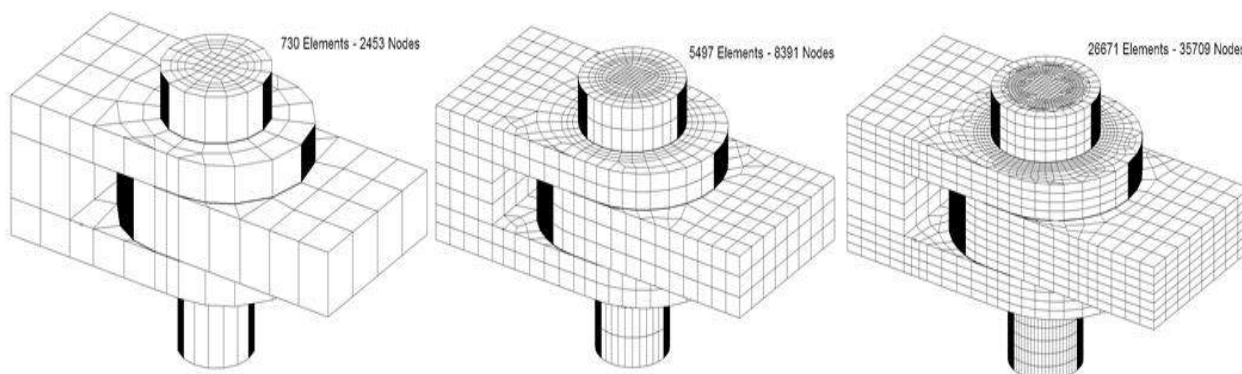


Рис. 3. Конечные элементы модели соединения «ухо – вилка» с различной плотностью конечно-элементной сетки

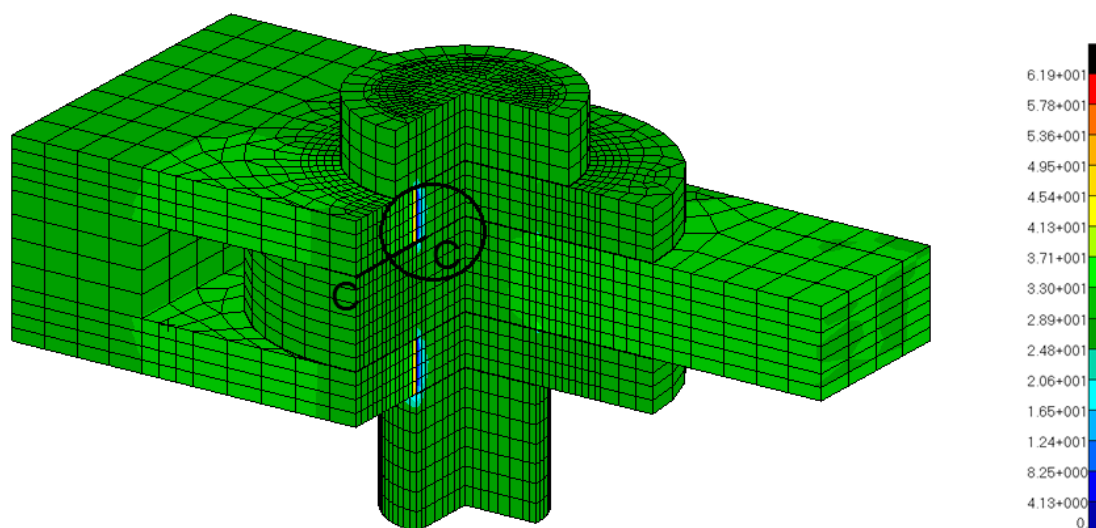


Рис. 4. Напряжения в конечных элементах модели «ухо – вилка» с самым плотным количеством элементов

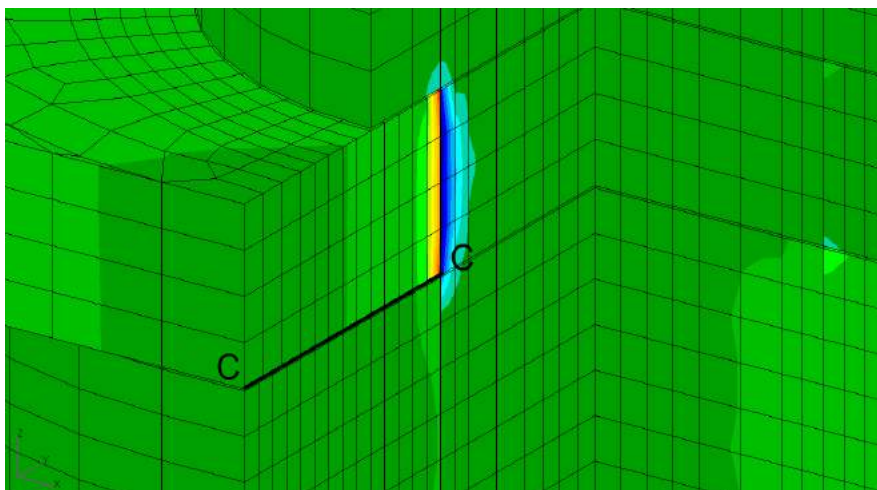


Рис. 5. Напряжения в конечных элементах модели «ухо – вилка» с самым плотным количеством элементов (увеличенный вид)

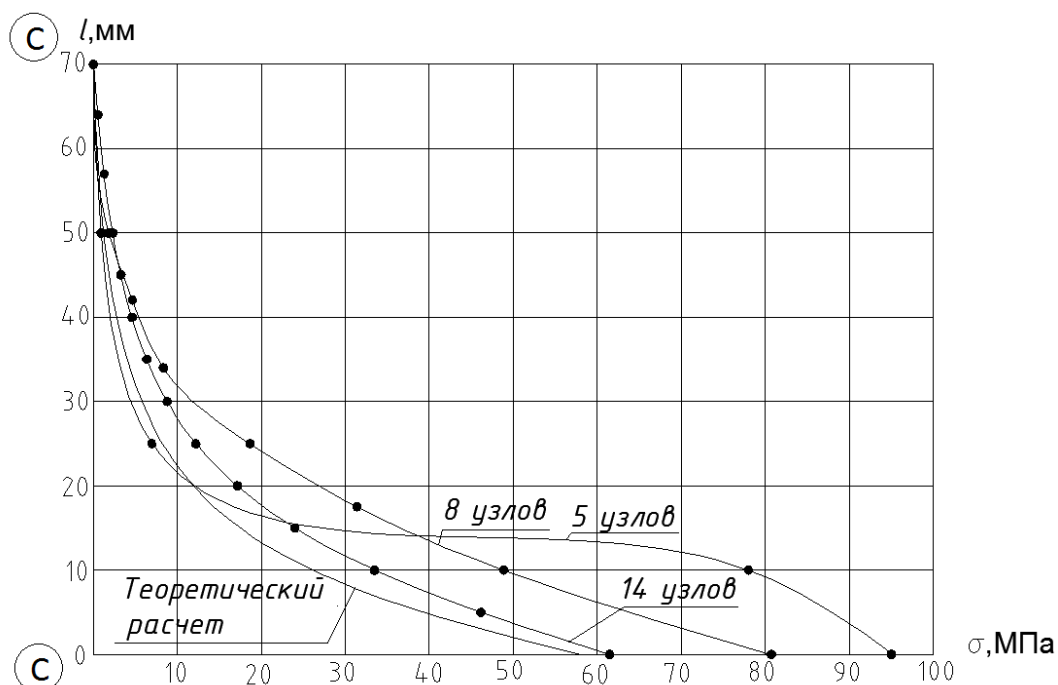


Рис. 6. График сходимости полученных напряжений (по линии С-С) в зависимости от количества узлов

центрацией напряжений их уровень падает до расчетного значения [1].

Т а б л и ц а 2

Зависимость напряжений от количества узлов

Nodes	Elements	кгс/м <sup>2</sup>
5	4	94,36
8	7	80,86
14	13	61,92

Распределение напряжений в особой области концентрации напряжений (вдоль линии С-С) (рис. 6) показывает, что с повышением уровня плотности сетки в этой области КЭ модели величина максимального напряжения приближается к

величине, полученной Войтом на основе расчетно-экспериментальной методики [1].

#### З а к л ю ч е н и е

Представленное исследование точности и сходимости численного решения МКЭ с решением контактной задачи теории упругости показывает возможности математического моделирования ответственных узлов летательных аппаратов с наличием в них концентраторов напряжений. Такое моделирование позволяет получить необходимые характеристики деталей, определяющие надежность и долговечность их работы без проведения натурных испытаний.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочная книга по расчету самолета на прочность / М.Ф. Астахов, А.В. Каравальцев и др. М. : Государственное издательство оборонной промышленности, 1954. 648 с.
2. Проектирование самолетов / С.М. Егер, В.Ф. Мишин и др. М. : Машиностроение, 1983. 616 с.
3. Ендогур А.И. Проектирование авиационных конструкций. М. : МАИ-ПРИНТ, 2009. 540 с.
4. Тимошенко С.П., Гудьер Д. Теория упругости. М. : Наука, 1975. 576 с.
5. Сироткин О.С. Гришин В.И., Литвинов В.Б. Проектирование, расчет и технология соединений авиационной техники. М. : Машиностроение, 2006. 331 с.
6. Строительная механика летательных аппаратов / И.Ф. Образцов и др. М. : Машиностроение, 1986. 536 с.
7. Авдонин А.С., Фигуровский В.И. Расчет на прочность летательных аппаратов. М. : Машиностроение, 1985. 439 с.
8. Проектирование конструкций самолетов / Е.С. Войт, А.И. Ендогур и др. М. : Машиностроение, 1987. 416 с.
9. Зинкевич О. Метод конечных элементов в технике М. : МИР, 1975. 271 с.
10. Рудаков К.Н. FEMAP 10.2.0 Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. К. : КПИ, 2011. 317 с.
11. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М. : МИР, 1979. 393 с.
12. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. М. : ДМК Пресс, 2003. 447 с.
13. Хазанов Х.С., Савельев Л.М. Метод конечных элементов в приложении к задачам строительной механики и теории упругости. Куйбышев : КуАИ, 1975. 128 с.
14. Рыжов Э.В. Контактная жесткость деталей машин. М. : Машиностроение, 1966, 196 с.
15. Пыхалов А. А. Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин : дис. ... д-ра техн. наук. Иркутск, 2006. 405 с.
16. Александров В.М., Чебаков М.И. Аналитические методы в контактных задачах теории упругости. М. : Физматлит, 2004. 304 с.
17. Расчет и проектирование проушин / В.Н. Майнсков и др. Электрон. текст. и граф. дан. (1 Мбайт). Самара, 2011. 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
18. Туранов Р.А., Пыхалов А.А. Анализ работы конструкции соединения типа «ухо-вилка» с применением метода конечных элементов и решением контактной задачи теории упругости // Труды МАИ. 2019 No. 104. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102119>. (Дата обращения: 06.04.2019).

## REFERENCES

1. Astakhov M.F., Karaval'tsev A.V. et al. Spravochnaya kniga po raschetu samoleta na prochnost' [Reference book on the calculation of the strength of the aircraft]. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo oboronnoi promyshlennosti, 1954. 648 p.
2. Eger S.M., Mishin V.F. et al. Proektirovanie samoletov [Aircraft design]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1983. 616 p.
3. Endogur A.I. Proektirovanie aviatsionnykh konstruksii [Design of aircraft structures]. Moscow: MAI-PRINT Publ., 2009. 540 p.
4. Timoshenko S.P., Gud'er D. Teoriya uprugosti [Theory of elasticity]. Moscow: Nauka Publ., 1975. 576 p.
5. Sirotkin O.S. Grishin V.I., Litvinov V.B. Proektirovanie, raschet i tekhnologiya soedinenii aviatsionnoi tekhniki [Design, calculation and technology of aviation equipment connections]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2006. 331 p.
6. Obraztsov I.F. et al. Stroitel'naya mekhanika letatel'nykh apparatov [Building mechanics of aircraft]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1986. 536 p.
7. Avdonin A.S., Figurovskii V.I. Raschet na prochnost' letatel'nykh apparatov [Calculation of the strength of aircraft]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1985. 439 p.
8. Voit E.S., Endogur A.I. et al. Proektirovanie konstruksii samoletov [Design of aircraft structures]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1987. 416 p.
9. Zinkevich O. Metod konechnykh elementov v tekhnike [Method of finite elements in engineering]. Moscow: MIR Publ., 1975. 271 p.
10. Rudakov K.N. FEMAP 10.2.0 Geometricheskoe i konechno-elementnoe modelirovanie konstruksii [FEMAP 10.2.0 Geometric and finite element modeling of structures]. Kiev: KPI Publ., 2011. 317 p.
11. Segerlind L. Primenenie metoda konechnykh elementov [Application of the finite element method]. Moscow: MIR Publ., 1979. 393 p.
12. Shimkovich D.G. Raschet konstruksii v MSC/NASTRAN for Windows [Calculation of structures in MSC / NASTRAN for Windows]. Moscow: DMK Press, 2003. 447 p.
13. Khazanov Kh.S., Savel'ev L.M. Metod konechnykh elementov v prilozhenii k zadacham stroitel'noi mekhaniki i teorii uprugosti [The finite element method as applied to problems of structural mechanics and elasticity theory]. Kuibyshev : KuAI Publ., 1975. 128 p.
14. Ryzhov E.V. Kontaktnaya zhestkost' detalei mashin [Contact stiffness of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1966, 196 p.
15. Pykhalov A. A. Kontaktnaya zadacha staticheskogo i dinamicheskogo analiza sbornykh rotorov turbomashin : dis. ... d-ra. tekhn. nauk [The contact problem of static and dynamic analysis of combined turbomachine rotors: a Dr. Sc. (Engineering) diss.]. Irkutsk, 2006. 405 p.
16. Aleksandrov V.M., Chebakov M.I. Analiticheskie metody v kontaktnykh zadachakh teorii uprugosti [Analytical methods in contact problems of the theory of elasticity]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2004. 304 p.
17. Mainskov V.N. et al. Raschet i proektirovanie proushin. Elektron. tekst. i graf. dan. (1 Mbait) [Calculation and design of loop eyes. Electron. text and graph. data]. Samara, 2011. 1 el. opt. disk (CD-ROM).
18. Turanov R.A., Pykhalov A.A. Analiz raboty konstruksii soedineniya tipa «ukho-vilka» s primeneniem metoda konechnykh elementov i resheniem kontaktnoi zadachi teorii uprugosti [Analysis of the work of the construction of the lug joint using the finite element method and the solution of the contact problem of the theory of elasticity]. Trudy MAI [Proc. of MAI], 2019. No. 104. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102119>. (Access date: 06.04.2019).

**Информация об авторах**

Туранов Роман Александрович – аспирант, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: romancheg08@mail.ru

Пыхалов Анатолий Александрович - д. т. н., профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск e-mail: Pykhalov\_aa@mail.ru

**Authors**

Roman Alexandrovich Turanov – Ph.D. student, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: romancheg08@mail.ru

Anatolii Aleksandrovich Pykhalov – Doctor of Engineering Science, Professor at the Subdepartment of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk e-mail: Pykhalov\_aa@mail.ru

**Для цитирования**

Туранов Р. А. Анализ точности сходимости численного решения метода конечных элементов и контактной задачи твердого деформируемого тела на примере соединения крыла самолета с фюзеляжем / Р. А. Туранов, А. А. Пыхалов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 127–133. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).127–133

**For citation**

Turanov R. A., Pykhalov A. A. Analiz tochnosti skhodimosti chislennogo resheniya metoda konechnykh elementov i kontaktnoi zadachi tverdogo deformiruemogo tela na primere medineniya kryla samoleta s fyuzelyazhem [Analysis of the accuracy of the convergence of a numerical solution of the method of final elements and the contact problem of a solid deformable body on the example of the wing of the plane connected with the fuselage]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2019. Vol. 62, No. 2. Pp. 127–133. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).127–133

УДК 621.311, 621.331

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).133–141

**Н. В. Буякова<sup>1</sup>, В. П. Закарюкин<sup>2</sup>, А. В. Крюков<sup>2,3</sup>, А. Д. Степанов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>3</sup> Иркутский научный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 17 марта 2019 г.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В СИСТЕМАХ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

**Аннотация.** Цель представленных в статье исследований состояла в разработке методов и средств адекватного моделирования электромагнитных полей вблизи трасс высоковольтных линий электропередачи, питающих тяговые подстанции железных дорог переменного тока. Для анализа электромагнитных полей определялись режимы электроэнергетических систем с помощью методов, в основу которых положены модели элементов в виде решетчатых схем замещения с полностью связной топологией. Эти модели и методы реализованы в программном комплексе «Fazonord-APC», обеспечивающем моделирование режимов электроэнергетических систем, а также определение напряженностей электромагнитного поля, которое создается многопроводными линиями электропередачи. В работе представлены результаты расчета электромагнитных полей, создаваемых высоковольтными линиями электропередачи, питающими тяговые подстанции. В первой части приведены результаты определения электромагнитных полей на участках двухцепной линии электропередачи 220 кВ. Показано, что напряженности электромагнитного поля на трассе линии электропередач не превышают допустимые пределы для электротехнического персонала. Уровни напряженностей существенно зависят от фазировки проводов, наибольшие величины наблюдаются на участке, которому отвечает фазировка по расположению проводов сверху вниз и слева направо А, В, С, А, В, С. Во второй части выполнен анализ электромагнитных полей высоковольтной линии электропередач на основе имитационного моделирования работы объединенной системы внешнего и тягового электроснабжения. Полученные результаты демонстрируют большую изменчивость магнитного поля линии электропередач 110 кВ, непосредственно примыкающей к тяговым подстанциям, по сравнению с магистральной линией 220 кВ. Представленная методика определения электромагнитных полей может использоваться для решения вопросов повышения электромагнитной безопасности в системах внешнего электроснабжения железных дорог.

**Ключевые слова:** тяговое электроснабжение, внешнее электроснабжение, электромагнитное поле, моделирование, электромагнитная безопасность.

**N. V. Buyakova<sup>1</sup>, V. P. Zakaryukin<sup>2</sup>, A. V. Kryukov<sup>2,3</sup>, A. D. Stepanov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

<sup>2</sup> Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>3</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

Received: March 17, 2019

## ELECTROMAGNETIC SAFETY IN RAILROAD EXTERNAL POWER SUPPLY SYSTEMS