

- портно-логистической системы Азово-Черноморского бассейна. Проблемы безопасности морского судоходства, технической и коммерческой эксплуатации морского транспорта. Материалы 1-й международной научно-технической и 6-й региональной научно-технической конференции. Ответственные за выпуск: академик РАТ, д.т.н., проф. В.В. Демьянов, академик РАТ, д.э.н., проф. В.Е. Деружинский. – 2007. – С. 204-207.
10. Бабурин О.Н. Мировой морской торговый флот: динамика, структура, перспективы [текст] / О.Н. Бабурин, Е.В. Хекерт, Ю.Л. Никулина // Транспортное дело России. – 2017. – № 1. – С. 88-92.
 11. Печников А.Н., Хекерт Е.В. Эргономический подход к оцениванию деятельности судовых специалистов: суть проблемы и подход к ее решению // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 2. – С. 26.
 12. Кондратьев С.И. Обеспечение безопасности плавания транспортных судов в порту при маневрировании в операционной акватории причала [Текст] / С.И. Кондратьев, В.В. Устинов // Транспортное дело России. – 2012. – № 6-2. – С. 196-197
 5. «Metodika ocenki zapretai spozovaniama zutav Arcticheskoy zone Rossijskoi Federacii» / A.U. Klimentiev, A.U. Knignicov / Vsemirnij fond dikoiprirodi (WWF). – М., 2018.
 6. Timchenko T.N., Hodiakov S.A. Razrabotka optimalnoi shemi podogreva gruza "mazut" v rejsse. – Egekvartalnij sbornik statei "Ekspluatacia morskogo transporta" №2 (95), 2020.
 7. Timchenko T.N., Shtefan B.A. Perestrojka toplivnoisistemi sudovsviazis vstupleniem v silu novih trebovanij MARPOL. - Egekvartalnij sbornik statei "Ekspluatacia morskogo transporta" №4 (93), 2019.
 8. Kondrat'ev S.I., Astrein V.V., Boran-Keshish'yan A.L. Metodika refleksivnoj ocenki effektivnosti ISPPR bezopasnosti sudovozhdeniya v usloviyah perekhodnogo perioda // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 3-1 (41). S. 156-161.
 9. Kondrat'ev S.I. Maksimizaciya nadezhnosti processov v usloviyah mezh sistemnyh vzaimodejstvij s ne vpolne opredelennymi parametrami [Tekst] / S.I. Kondrat'ev, A.P. Lickevich V sbornike: Strategiya razvitiya transportno-logisticheskoy sistemy Azovo-CHernomorskogo bassejna. Problemy bezopasnosti morskogo sudohodstva, tekhnicheskoy i kommercheskoy ekspluatacii morskogo transporta Materialy 1-j mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy i 6-j regional'noj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Otvetstvennye za vypusk: akademik RAT, d.t.n., prof. V.V. Dem'yanov, akademik RAT, d.e.n., prof. V.E. Deruzhinskij. 2007. S. 204-207.
 10. Baburina O.N.. Mirovoj morskoy trgovyj flot: dinamika, struktura, perspektivy [tekst] / O.N. Baburina, E.V. Hekert, YU.L. Nikulina // Transportnoe delo Rossii. 2017. № 1. S. 88-92.
 11. Pechnikov A.N., Hekert E.V. Ergonomicheskij podhod k ocenivaniju deyatelnosti sudovyh specialistov: sut' problemy i podhod k ee resheniyu // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 2. S. 26.
 12. Kondrat'ev S.I. Obespechenie bezopasnosti plavaniya transportnyh sudov v portu pri manevrirovanii v operacionnoj akvatorii причала [Tekst] / S.I. Kondrat'ev, V.V. Ustinov // Transportnoe delo Rossii. 2012. № 6-2. S. 196-197

REFERENCES

1. «Perspektivi vozmozhnosti ispolzovanie SPG dliabun kirovkiv arcticheskikh regionalah Rossiji» / A.U. Klimentiev, A.U. Knignicov, A.U. Grigoriev / Vsemirnij fond dikoiprirodi (WWF). – М., 2017.
2. «Potencial gaza i zifitsii Arcticheskoi zoni Rossijskoi Federacii s igennim prirodni m gazom (SPG)» / A.U. Klimentiev, A.U. Knignicov / Vsemirnij fond dikoiprirodi (WWF). – М., 2018.
3. Eurasian transport integration as a key factor in increasing the transit potential of the EEU / A.S. Pogarskaya, K.V. Konfino / Trudisocialnietnoshenia №2. – М.: Obrazovatelnoe uchregdenie profsouzov vichshego obrazovania "Academia truda b socialnih otoshenij", 2020.
4. «Perspektivi potenciala ispolzovania SPG dliabun kirovkiv Arcticheskikh regionalah Rossiji» / A.U. Klimentiev, A.U. Knignicov / Vsemirnij fond dikoiprirodi (WWF). – М., 2018.

УДК 621.87

DOI: 10.34046/aumsuomt98/3

НЕЛИНЕЙНЫЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ МАШИН МОРСКИХ ПОРТОВ

Е.Л. Ведерникова, старший преподаватель кафедры МиПГ

В связи с ужесточением требований по надежности, предъявляемых к грузоподъемному оборудованию, значительно повышаются затраты на проведение испытаний по их подтверждению. С целью получения результатов оценки показателей надежности в значительно более сжатые сроки и с минимальными затратами актуально применение нелинейных методов прогнозирования показателей эксплуатационной надежности перегрузочных машин морских портов. Математическая реализация нелинейных методов

заключается в решении систем дифференциальных уравнений, в частных производных или интегральных уравнениях, описывающих взаимосвязь различных параметров твердого деформируемого тела.

Ключевые слова: прогнозирование надежности, нелинейные методы, морской порт

NONLINEAR METHODS FOR PREDICTING THE OPERATIONAL RELIABILITY OF TRANSSHIPMENT MACHINES OF SEAPORTS

E. L. Vedernikova

In connection with the tightening of the reliability requirements imposed on the cargo-lifting equipment of seaports, the costs of conducting tests to confirm them are significantly increased. In order to obtain the results of assessing reliability indicators in a much shorter time and with minimal costs, it is important to use nonlinear methods for predicting the operational reliability of transshipment machines in seaports. The mathematical implementation of nonlinear methods consists in solving systems of differential equations, partial derivatives or integral equations that describe the relationship of various parameters of a rigid deformable body.

Tags:reliability forecasting, nonlinear methods, seaport

В процессе эксплуатации перегрузочных машин морских портов зачастую возникает необходимость в их модернизации для решения определенных технических задач, таких как различные конструктивные изменения грузоподъемных механизмов, обеспечивающие монтаж и функционирование специализированного оборудования, устройств и систем. Каждое подобное конструктивное изменение уникально, а его глубина и реализация зависит от конкретной задачи, при этом оценка прочности новых конструктивных элементов и их влияние на несущую способность могут не предусматриваться существующими расчетными методиками. Но благодаря нелинейным методам прогнозирования показателей эксплуатационной надежности данная проблема решается.

Существует множество методов для решения задач механики твердого тела, такие как метод конечных разностей, метод граничных интегральных уравнений, но они ограничены исследовательскими или специальными задачами. Лидирующее положение, благодаря возможности моделировать широкий круг объектов и явлений, в настоящее время занимает метод конечных элементов (МКЭ). Задачи решаются посредством численных алгоритмов. Расчет прочности конструкций с учетом физической нелинейности материала требует высокой точности определения всех компонентов напряженно-деформированного состояния. Наиболее эффективным численным методом инженерного анализа, позволяющим наилучшим образом оценить надежность конструкции любой формы и размера, является метод конечных элементов, включающий прин-

цип построения геометрической модели рассматриваемой конструкции и ее идеализации, с учетом особенностей напряженно-деформированного состояния, выбора типа и параметров конечно-элементной сетки, построения конечно-элементной сетки, приложения нагрузок, задания граничных условий, учета геометрической или физической нелинейности, задания свойств материала, оценки и анализа полученных результатов.

Система дифференциальных уравнений в частных производных специальным образом заменяется системой линейных алгебраических уравнений, количество которых равно количеству неизвестных значений в узлах, на которых ищется решение исходной системы. Это количество, называемое размерностью задачи, прямо пропорционально количеству конечных элементов и количеству степеней свободы каждого из них[1-4].

Согласно методологии исследования напряженно-деформированного состояния, в САД системах материальный континуум дискретизируется конечным числом пространственных расчетных элементов простейшей формы, взаимодействующих друг с другом в узловых точках. Для каждого из полученных элементов определяется матрица функции формы элемента N , предназначенная для интерполирования решения по выбранной форме расчетного элемента на основе значений в узловых точках[5-7]:

$$\{u\}^{(e)} = N^{(e)} \cdot \{u\}. \quad (1)$$

Деформация узловых точек расчетного элемента определяется из выражения:

$$\{\varepsilon\}^{(e)} = A^T \cdot \{u\}^{(e)}. \quad (2)$$

Таким образом полная энергия расчетного элемента:

$$T^{(e)} = \frac{1}{2} \cdot \{u\}^T \cdot \iiint_{V^{(e)}} [(A^T \cdot N^{(e)})^T \cdot C_e \cdot (A^T \cdot N^{(e)})] dV \cdot \{u\} - \{u\} \cdot \iint_{S^{(e)}} [\{P\}^{(e)T} \cdot N^{(e)}] dS - \{u\} \cdot \iiint_{V^{(e)}} [\{F\}^{(e)T} \cdot N^{(e)}] dV \quad (3)$$

После проведения замены:

$$K^{(e)} = \iiint_{V^{(e)}} [(A^{(e)T} \cdot N^{(e)})^T \cdot C_e \cdot (A^T \cdot N^{(e)})] dV, \quad (4)$$

$$\{Q_P^{(e)}\} = \iint_{S^{(e)}} [\{P\}^{(e)T} \cdot N^{(e)}] dS, \quad (5)$$

$$\{Q_F^{(e)}\} = \iint_{S^{(e)}} [\{F\}^{(e)T} \cdot N^{(e)}] dS, \quad (6)$$

где $K^{(e)}$ – матрица жесткости расчетного элемента;

$\{Q_P^{(e)}\}$ – векторы узловых сил расчетного элемента, статически эквивалентные действию поверхностных сил;

$\{Q_F^{(e)}\}$ – векторы узловых сил расчетного элемента, статически эквивалентные действию объемных сил.

После минимизирования полной энергии твердого тела:

$$\frac{\partial}{\partial \{u\}} \sum_{i=1}^n T^{(e)} = 0, \quad (7)$$

С учетом выражений (4)-(6) получаем основное уравнение метода в виде:

$$\{u\} \cdot \sum_{i=1}^n K_i^{(e)} = \sum_{i=1}^n (\{Q_P^{(e)}\}_i + \{Q_F^{(e)}\}_i) \quad (8)$$

Далее производится замена:

$$K = \sum_{i=1}^n K_i^{(e)};$$

$$\{Q\} = \sum_{i=1}^n (\{Q_P^{(e)}\}_i + \{Q_F^{(e)}\}_i), \quad (9)$$

где K – глобальная матрица жесткости; Q – глобальный вектор узловых сил.

На основании зависимостей (9) было разрешающее уравнение метода (8) будет иметь вид:

$$K \cdot \{u\} = \{Q\} \quad (10)$$

Поля напряжений, деформаций и перемещений внутри каждого из расчетных элементов:

$$\{u\}^{(e)} = N^{(e)} \cdot \{u\} \quad (11)$$

$$\{\varepsilon\}^{(e)} = A^T \cdot \{u\}^{(e)} \quad (12)$$

$$\{\sigma\}^{(e)} = C_e \cdot \{\varepsilon\}^{(e)} \quad (13)$$

Для моделирования нелинейного (упруго-пластического) поведения материала, когда глобальная матрица жесткости зависит от достигнутого уровня деформации:

$$K(\{u\}) \cdot \{u\} = \{Q\}, \quad (14)$$

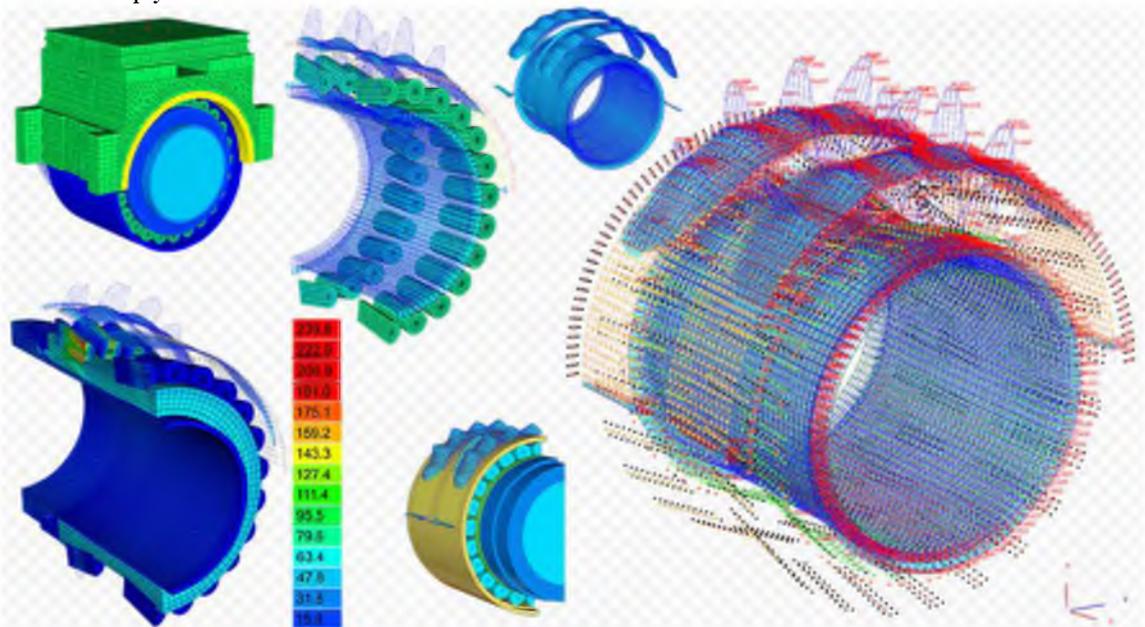


Рисунок 1 – Анализ напряженно-деформированного состояния буксовых узлов портового крана

В анализе напряженно-деформированного состояния, представленного на Рисунке 1, учтены контактные взаимодействия всех деталей, зазоры в соединениях, распределение нагрузки на ролики подшипника, выявлены факторы, влияющие на надежность подшипников, построена методика расчетного определения надежности подшипников по критерию усталостного выкрашивания.

Поведение материала в пластической области при непропорциональном нагружении удовлетворительно описывает теория течения в сочетании с энергетическим условием начала пластичности Хубера — Мизеса и кинематическим законом упрочнения:

$$f(\sigma_{ij}) = \frac{3}{2} (s_{ij} - a_{ij}) (s_{ij} - a_{ij}) - \sigma_T^2 = 0 \quad (15)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений;

s_{ij} – девиатор напряжений;

a_{ij} – девиатор добавочного напряжения;

$(s_{ij} - a_{ij})$ – девиатор активного напряжения.

В качестве закона упрочнения используется уравнение Армстронга и Фредерика, развитое в работах Шабоса:

$$\dot{a}_{ij} = \frac{2}{3} C \dot{\epsilon}_{ij}^p - \gamma a_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (16)$$

где C и γ – константы материала;

$\dot{\epsilon}_{ij}^p$ – компоненты тензора скоростей пластической деформации;

$\dot{\epsilon}_{ij}^p$ – скорость накопленной пластической деформации.

В САДсредетакую модель называют Chaboche Nonlinear Kinematic Hardening Model. Определить входящие в нее константы C и γ можно по кривым деформирования образцов [8]. Выражение (16), записанное для случая одноосного напряженного состояния, после интегрирования принимает вид

$$a = \frac{C}{\gamma} (1 - e^{-\gamma \epsilon^p}) \quad (17)$$

Из выражения (17) можно заключить, что величина C/γ равна максимальному добавочному напряжению. Для проверки правильности определения констант в САДсрдепроведены численные эксперименты, которые показали хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных.

Данные исследования наглядно демонстрируют, что даже самые сложные технические задачи по выбору оптимальных конструктивных параметров деталей и узлов грузоподъемного оборудования морских портов и обеспечению эксплуатационной надежности решаемы благодаря использованию нелинейных методов прогнозирования.

Литература

1. Темис Ю.М., Азметов Х.Х. Расчет напряженно-деформированного состояния свободных тел методом конечных элементов. Математическое моделирование и численные методы, 2018, № 3, с. 95–113.
2. Ведерникова Е.Л. Структура грузоподъемного крана как технической системы для имитационного моделирования // Подъемно-транспортное дело/ Москва, 2016, №6 – С.8-10.
3. Сивцев П.В. Численное исследование некоторых прикладных проблем расчета напряженно-деформированного состояния: дис...к.-та физ.-мат. наук: 05.13.18. – Якутск, 2018. – 148 с.
4. Ведерникова Е.Л. Исследование диссипативных свойств упругих систем грузоподъемных кранов // Транспортное дело России. – 2017. – №1 (128), – С.157-159.
5. Иванов В.Н. Метод модифицированных функций Лагранжа в задаче моделирования механических систем с дополнительными / В.Н. Иванов, И.Е. Полосков // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 10-1. – С. 67-73.
6. Bisong M. S., Sivtsev P. V., Lepov V. V. Numerical Analysis of Stress-Strain State and Crack Propagation in Welded Samples // Solid State Phenomena / Trans Tech Publ. — Vol. 265. — 2017. — P. 507–512.
7. Сивцев П.В. Численное исследование некоторых прикладных проблем расчета напряженно-деформированного состояния: дис...к.-та физ.-мат. наук: 05.13.18. – Якутск, 2018. – 148 с.
8. Мягков Л.Л. Моделирование напряженно-деформированного состояния поршня дизеля с учетом неупругих деформаций / Л.Л. Мягков, С.М. Сивачев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2020. – С. 29-36.

Reference

1. Temis YU.M., Azmetov H.H. Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya svobodnyh tel metodom konechnykh elementov. Matematicheskoe modelirovanie i chislennyye metody, 2018, № 3, s. 95–113.
2. Vedernikova E.L. Struktura gruzopod'emnogo krana kak tekhnicheskoy sistemy dlya imitacionnogo modelirovaniya. // Pod'emno-transportnoe delo/ Moskva, 2016, №6 – S.8-10.
3. Sivtsev P.V. Chislennoe issledovanie nekotorykh prikladnykh problem rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya: Dis...k.-ta fiz.-mat. nauk: 05.13.18. – YAkutsk, 2018. – 148 s.
4. Vedernikova E.L. Issledovanie dissipativnykh svoystv uprugih sistem gruzo-pod'emnykh kranov. // Transportnoe delo Rossii. M.: – №1 (128), Moskva 2017 g. – S.157-159.