

УДК 534.111

А. М. Лимаренко, к.т.н.

Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса

## КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ОПРЕДЕЛЕНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

*Выпуск конкурентной продукции краностроения в Украине сегодня сдерживается отставанием уровня ее качества и технологичности от аналогов ведущих зарубежных производителей. Решение указанной проблемы требует повышения наукоемкости отрасли. Для этого необходимо проводить компьютерный эксперимент и имитационное моделирование. Это стало возможным благодаря интеграции различных САД / САЕ систем. Для металлоконструкций подъемно-транспортной техники выполнен расчет прочности и жесткости при статической нагрузке. Для моделирования и расчета использован метод конечных элементов, реализованный в современном программном комплексе. Предложены способы учета в расчетной схеме различных условий закрепления и нагрузки, характерных для подъемно-транспортных машин. Использование современных программ позволяет вносить изменения в металлоконструкции исследуемых объектов еще на этапе проектирования.*

**Ключевые слова:** подъемный кран, метод конечных элементов, эксперимент, напряжение, деформация, моделирование.

DOI 10.32684/2412-5288-2018-1-12-66-71

### Постановка проблемы

При эксплуатации подъемных кранов важным аспектом является безопасная работа металлоконструкции и ответственных элементов. Одним из основных вопросов безопасной эксплуатации является мониторинг и точное определение механических характеристик, напряжений и деформаций.

Очевидно, возникает необходимость в применении комплексного прогрессивного метода количественной оценки напряженно-деформированного состояния и регулировки для определения значений напряжений и деформаций несущей системы подъемно-транспортных машин и деталей. При этом необходим учет прочностной и жесткостной предыстории, величины напряжений и перемещений, возникающих в результате подъема и передвижения груза.

### Анализ последних достижений и публикаций

Научному обоснованию методов определения значений прочности, жесткости и устойчивости металлоконструкций подъемно-транспортных машин посвящены работы известных ученых В. А. Баженова, Д. В. Бычкова, Н. И. Григорьева, Б. С. Кузнецкого, В. Shastri, G. V. Rao. В работах авторов И. Н. Бузуна, А. С. Городецкого, Л. Ф. Москвичевой приводятся расчеты и анализ работоспособности металлоконструкций с применением систем автоматизированного проектирования и расчета.

Большинство компьютерных программ построено с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Наиболее научно обоснованные из этих программ относятся к, так называемым, тяжелым многоцелевым пакетам.

Известно [1–5], что крупногабаритные конструктивные элементы несущей системы подъемных кранов имеют свою прочностную и деформационную предысторию, которую тяжело переоценить, в особенности те, которые находятся в эксплуатации несколько десятков лет. Отметим, что значения деформаций и напряжений в материале, нередко превышает возможную погрешность линейных размеров и угловых деформаций [3]. Из приведенного выше можно сделать вывод, что даже высокоточные инструментальные методы измерения характеристик напряженно-деформированного состояния (НДС) при эксплуатации, обследовании и проведении модернизации крупногабаритных металлических деталей и узлов подъемно-транспортных машин не дают возможности определить действительные значения параметров НДС, которые необходимы для безопасной эксплуатации крана [6].

Значит, если измерять усилия, которые испытывает несущая система и конструктивные элементы при работе крана, то при моделировании НДС стает возможным решение практических задач посредством более простых в техническом и экономическом отношении способов определения напряжений и деформаций [7–10], одну из ключевых задач

безопасной эксплуатации подъемно-транспортных машин.

Это означает, что если измеряются усилия, которые испытывает несущая система и элементы конструкции во время работы крана, то при моделировании НДС становится возможным решение практических задач с помощью более простых в техническом и экономическом отношении методов определения напряжений и деформаций [7–10], что является одной из ключевых задач безопасной эксплуатации подъемно-транспортных средств.

#### Цель исследования

Целью представленного исследования является анализ возможностей использования методов имитационного моделирования для определения напряжений и деформаций кранов во время эксплуатации, обследования и модернизации.

#### Изложение основного материала

Объект исследования представляет собой элементы несущей системы подъемно-транспортных средств.

Предмет исследования – модель напряженного и деформированного состояния и количественная оценка НДС.

Исследования выполняются методами моделирования, которые основаны на математическом аппарате метода конечных элементов в сочетании с экспериментальными методами механики.

Рациональность использования компьютерного эксперимента для определения и мониторинга механических характеристик элементов несущей системы подъемно-транспортных машин (ПТМ), материалов и деталей объясняется обеспечением непрерывного технологического тракта [5].

В работе выполнено моделирование причального перегружателя портального типа грузоподъемностью 45 тонн в соответствии с рабочими чертежами при различных комбинациях рабочих нагрузок методом конечных элементов.

Проблема была решена в линейной постановке, т.е. учитывался НДС в рамках закона Гука. В противном случае безопасная работа крана не обеспечивается. В качестве инструмента исследования выбирается многоцелевой программный пакет.

На первой стадии компьютерного моделирования эксперимента рассматривалась расчетная схема причального контейнерного перегружателя в момент нагружения – груз со стороны моря (рис. 1).

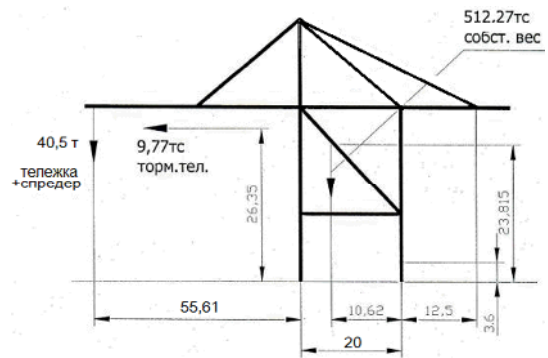


Рисунок 1 – Схема контейнерного перегружателя

К тому же, решение задач численного эксперимента предусматривает необходимость физического эксперимента для нахождения ряда механических характеристик объекта исследования.

Интегральная характеристика деформации  $\varepsilon = f(\sigma)$ , где  $\varepsilon$  – деформация и  $\sigma$  – напряжение, представлена в виде графика на рис. 2 [9].



Рисунок 2 – Графическая зависимость между усилиями и деформациями

На графике указаны упругая (I) и пластическая (II) зоны деформации. С определенным уровнем корректировки для математической модели было принято допущение, что график на рис. 2 в зоне деформации II описывается линейным законом (в рамках закона Гука). Подобное представление принимается для изучения НДС в конструкциях ПТМ.

Установленный подход дает возможность с удовлетворительным уровнем достоверности представить интегральную характеристику для анализа механических характеристик.

Отметим, что для построения численной модели НДС конструктивных элементов несущей системы ПТМ и материалов в программном комплексе Ansys использовались результаты экспериментального определения зависимостей «напряжение-деформация»,

посредством которых устанавливаются свойства исследуемого материала.

Предложенный метод может с хорошей степенью точности отражать интегральную характеристику для анализа напряжений и деформаций.

В результате исследования получена зависимость  $\varepsilon = f(\sigma)$  для постоянного поперечного сечения.

Для корректного проведения компьютерного эксперимента требуется знать габаритные размеры, модуль Юнга, объемную плотность объекта исследования, величину нагрузки и коэффициент Пуассона  $\mu$ .

В компьютерном эксперименте применяется математический аппарат механики деформированного твердого тела реализованный в программном комплексе Ansys. Объект экспериментального исследования приведен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Причальный контейнерный перегружатель

Результаты численного эксперимента приведены на рисунках 4-6.

**Выводы**

Моделирование проблем прочности и деформационных процессов численным методом дает возможность исследования и определения механических характеристик различных конструктивных элементов несущей системы подъемно-транспортных машин без проведения натурного эксперимента.

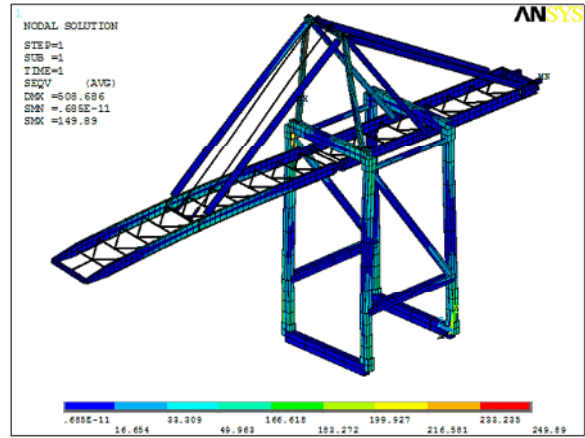


Рисунок 4 – Эквивалентные напряжения в металлоконструкции портала

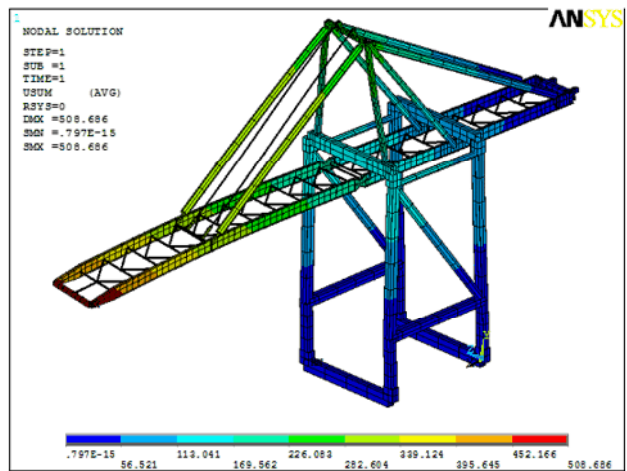


Рисунок 5 – Суммарные перемещения в металлоконструкции портала

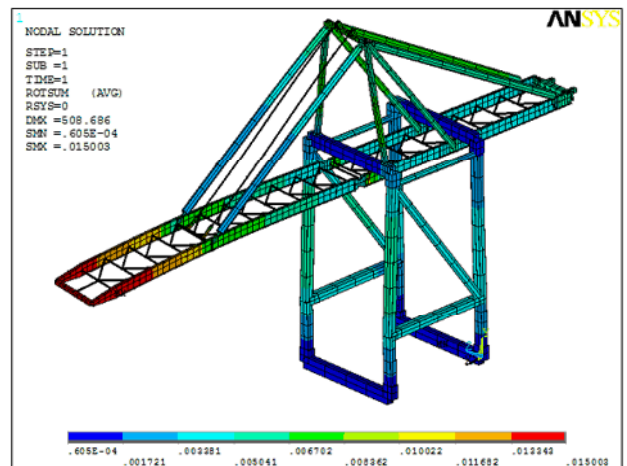


Рисунок 6 – Суммарные углы поворотов в металлоконструкции портала

Исследователю нужно учитывать, что степень соответствия результатов компьютерного эксперимента и натурного испытания зависят от способа разбиения на

конечные элементы, точности оценки условного модуля Юнга, плотности и прочностных характеристик.

Большое количество сварных соединений в металлоконструкции ПТМ необходимо учесть в построении математической модели. Сварочные швы характеризуются изменением модуля упругости.

Неоспоримым преимуществом компьютерного эксперимента является техническая простота и экономическая привлекательность по сравнению с натурным экспериментом, возможность определять параметры НДС в каждой точке, в каждом сечении, тогда как натурный эксперимент предполагает дискретную модель измерений.

#### Список использованных источников

1. Лимаренко А. М. Экспериментальные методы исследования в механике / А. М. Лимаренко, Г. А. Оборский, Н. Г. Сурьянинов. – Одесса: Астропринт, 2011. – 548 с.
2. Оробей В. Ф. Применение численных методов к расчету элементов судовых конструкций / В. Ф. Оробей, А. О. Немчук, А. М. Лимаренко // Вісн. Одес. нац. морського ун-ту. – 2009. – № 26. – С. 85–90.
3. Дашченко А. Ф. Анализ напряженно-деформированного состояния альтернативной конструкции фиксации переломов предплечья / А. Ф. Дашченко, А. М. Лимаренко, А. Д. Станков // XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», Україна, Одеса-Київ, 2015. – С. 185–190.
4. Limarenko A. M. The optimization of car engine piston-rod by numerical method / A. M. Limarenko, V. V. Khamray, A. A. Druzhynin // Вісник Одеської державної академії будівництва і архітектури. – 2015. – Вип. 51, ч.1. – С. 586–589.
5. Дашченко О. Ф. Комп'ютерне моделювання та чисельний аналіз ортопедичної конструкції для фіксації переломів кісток передпліччя / О. Ф. Дашченко, Ю. М. Свінар'юв, О. М. Лимаренко // Праці Одеського політехнічного університету. – 2015. – № 2 (41). – С. 33–42.
6. Дашченко О.Ф. Комп'ютерне моделювання і розрахунок причальної перевантажувальної техніки / О. Ф. Дашченко, В. В. Хамрай, Б. В. Плахотнюк // Праці Одеського політехнічного університету. – 2011. – № 1 (38) – С. 33–42.
7. Оробей В. Ф. Расчет арок на устойчивость методом граничных элементов / В. Ф. Оробей, А. Ф. Дашченко, А. М. Лимаренко // Проблеми техніки. – 2009. – вип. 27. – С. 114–123.

8. Orobej V. Boundary element method in problem of plate elements bending of engineering structures [Text] / V. Orobej, L. Kolomiets, A. Lymarenko // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 4. – P. 295–302.

9. Orobej V. Mathematical modeling of the stressed-deformed state of circular arches of specialized cranes [Text] / V. Orobej, O. Daschenko, L. Kolomiets, O. Lymarenko, Y. Ovcharov // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – 5/8 (89). – P. 4–11.

10. Orobej V. Stability of structural elements of special lifting mechanisms in the form of circular arches [Text] / V. Orobej, O. Daschenko, L. Kolomiets, O. Lymarenko // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – 2/7 (92). – P. 4–10.

#### References

1. Limarenko A. M. E'ksperimental'nye metody issledovaniya v mexanike / A. M. Limarenko, G. A. Oborskij, N. G. Sur'yaninov. – Odessa: Astroprint, 2011. – 548 s.
2. Orobej V. F. Primenenie chislennykh metodov k raschetu e'lementov sudovykh konstrukcij / V. F. Orobej, A. O. Nemchuk, A. M. Limarenko // Visn. Odes. nats. morskoho un-tu. – 2009. – # 26. – S. 85–90.
3. Dashhenko A. F. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya al'ternativnoj konstrukcii fiksacii perelomov predplech'ya / A. F. Dashhenko, A. M. Limarenko, A. D. Stakanov // XVI Mizhnarodna naukovotekhnichna konferentsiia «Prohresyivna tekhnika, tekhnolohiia ta inzhenerna osvita» Ukraina, Odesa-Kyiv, 2015. – S. 185–190.
4. Limarenko A. M. The optimization of car engine piston-rod by numerical method. / A. M. Limarenko, V. V. Khamray, A. A. Druzhynin. // Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva i arkhitektury. – 2015. – Vyp. 51, ch.1. – S. 586–589.
5. Dashchenko O. F. Kompiuterne modeliuвання ta chyselnyi analiz ortopedychnoi konstruktсии dlia fiksatsii perelomiv kistok peredplichchia / O. F. Dashchenko, Yu. M. Svinarov, O. M. Lymarenko // Pratsi Odeskoho politekhnichnoho universytetu. – 2015. – # 2 (41). – S. 33–42.
6. Dashchenko O. F. Kompiuterne modeliuвання i rozrakhunok prychalnoi perevantazhuvalnoi tekhniky / O. F. Dashchenko, V. V. Khamrai, B. V. Plakhotniuk // Pratsi Odeskoho politekhnichnoho universytetu. – 2011. – # 1 (38). – S. 33–42.



7. Orobei V. F. Raschet arok na ustojchivost' metodom granichnyx e'lementov / V. F. Orobei, A. F. Dashchenko, A. M. Lymarenko. // Problemy tekhniki. – 2009. – Вып. 27. – S. 114–123.

8. Orobej V. Boundary element method in problem of plate elements bending of engineering structures [Text] / V. Orobej, L. Kolomiets, A. Lymarenko // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 4. – P. 295–302.

9. Orobej V. Mathematical modeling of the stressed-deformed state of circular arches of specialized cranes [Text] / V. Orobej,

O. Daschenko, L. Kolomiets, O. Lymarenko, Y. Ovcharov // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – 5/8 (89). – P. 4–11.

10. Orobej V. Stability of structural elements of special lifting mechanisms in the form of circular arches [Text] / V. Orobej, O. Daschenko, L. Kolomiets, O. Lymarenko // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – 2/7 (92). – P. 4–10.

Надійшла до редакції 15.05.2018

**О. М. Лимаренко, к.т.н.**

### **КОМП'ЮТЕРНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ У ВИЗНАЧЕННІ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ**

*Випуск конкурентоспроможної продукції кранобудування в Україні сьогодні стримується відставанням рівня її якості та технологічності від аналогів провідних зарубіжних виробників. Вирішення зазначеної проблеми потребує підвищення наукомісткості галузі. Для цього необхідно проводити комп'ютерний експеримент, та імітаційне моделювання. Це стало можливим завдяки інтеграції різних CAD/CAE систем, для виконання конструкторської і розрахункової роботи. Для металоконструкцій підйомно-транспортної техніки виконано розрахунок міцності і жорсткості при статичному навантаженні. Для моделювання і розрахунку використано метод скінченних елементів реалізований в сучасному програмному комплексі. Запропоновано способи урахування в розрахунковій схемі різних умов закріплення й навантаження, характерних для підйомно-транспортних машин. Використання сучасних програм дозволяє вносити змінення до металоконструкцій досліджуваних об'єктів ще на етапі проектування.*

*Моделювання проблем міцності та деформаційних процесів чисельним методом дає можливість дослідження та визначення механічних характеристик різних конструктивних елементів несучої системи підйомно-транспортних машин без проведення натурального експерименту.*

*Виконано врахування, способу розбиття на скінченні елементи, точності оцінки умовного модуля Юнга, щільності і міцності. Також в роботі врахована велика кількість зварних з'єднань в металоконструкції підйомно-транспортних машин при побудові математичної моделі. Зварювальні шви характеризуються зміною модуля пружності. Вказано, що перевагою комп'ютерного експерименту є технічна простота і економічна привабливість в порівнянні з натурним експериментом, можливість визначати параметри напружено-деформованого стану в кожній точці, в кожному перерізі, тоді, як натурний експеримент передбачає дискретну модель вимірювань.*

*Запропонована в роботі методика дає можливість визначити залишковий ресурс металоконструкції крану при експлуатаційних навантаженнях, в результаті отримання даних по розподілу еківалентних напружень в характерних вузлах. Це безумовно дозволить підвищити конкурентноспроможність портової техніки в Україні.*

**Ключові слова:** підйомний кран, метод скінченних елементів, експеримент, напруження, деформація, моделювання.

**О. Lymarenko, PhD**

### **COMPUTER EXPERIMENT IN DETERMINING MECHANICAL CHARACTERISTICS OF METAL CONSTRUCTIONS**

*The release of competitive products of crane construction in Ukraine today is hampered by a lagging level of its quality and technological efficiency from analogues of leading foreign manufacturers. The solution of this problem requires increasing the industry's science-intensive nature. For this purpose, it is necessary to conduct a computer experiment, and simulation simulation. This has become possible thanks to the integration of various CAD / CAE systems. For metal structures of lifting-transport equipment the calculation of durability and stiffness at static loading is made. For modeling and calculation, the finite element method has been implemented in the modern software complex. The methods of accounting in the*

*calculation scheme of different conditions of fastening and loading, characteristic for lifting-transport machines are offered. The use of modern programs makes it possible to make changes in the metal structures of the investigated objects at the design stage.*

*The accounting, the method of decomposition into finite elements, the accuracy of the estimation of the Young's conditional module, density and strength are performed. Also, a large number of welded joints in metal structures of submerged vehicles in the construction of a mathematical model are taken into account. Weld seams are characterized by a change in the elastic modulus. It is indicated that the advantage of a computer experiment is the technical simplicity and economic attractiveness in comparison with the field experiment, the ability to determine the parameters of the VAT at each point, at each intersection, whereas the field experiment implies a discrete measurement model.*

*The proposed method allows to determine the residual life of the crane metalwork under operating loads, as a result of obtaining data on the distribution of equivalent mechanical stresses in the characteristic nodes. It is also possible to calculate the allowable loading limits depending on the lifetime of the crane. This certainly makes it possible to increase the competitive ability of port equipment in Ukraine.*

**Keywords:** *lifting crane, finite element method, experiment, stress, deformation, modeling.*