

УДК 681.518.5:004.5

DOI 10.17223/19988621/38/9

А.А. Кулешов, В.А. Солоненко, А.А. Ящук

## МОНИТОРИНГ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИЧАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Описана методика визуализации текущего напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции. Для решения поставленной задачи рассмотрена методика использования базы данных отклика конечно-элементной (КЭ) модели конструкции пирса, построенной при помощи программного комплекса ANSYS. Используя средства объектно-ориентированного программирования в среде C++, КЭ-модель актуализируется поступающей информацией с датчиков измерительной системы в режиме реального времени с визуализацией текущей картины НДС.

**Ключевые слова:** причал, конечно-элементная модель, ANSYS, система мониторинга, датчики, визуализация НДС.

Оценка технического состояния промышленных объектов ведется в значительной степени визуально при помощи контрольно-измерительной техники мониторинга. Так называемый периодический мониторинг не всегда позволяет оперативно отслеживать критические нагрузки, смену их характера и причину возникновения, что может привести к необратимым скрытым деформационным процессам. Использование автоматических информационно-измерительных систем (ИИС) ввиду их большой стоимости дает ограниченную информацию только по выбранным контрольным точкам и не позволяет оценивать полную картину НДС [1–3].

В настоящей работе поставлена цель создать такую методику, которая позволила бы организовать переход от фиксирования параметров пространственного деформирования в строго определенных местах к визуализации распределения внутренних усилий, возникающих по всей конструкции в режиме реального времени для принятия превентивных мер безопасности.

В инженерной практике применение численных расчетов НДС всех конструкций сооружения под действием эксплуатационных нагрузок в непрерывном режиме организовать не представляется возможным. Решение подобного класса задач является ресурсоемкой как с точки зрения вычислительных, так и временных затрат. Например, при решении методом конечных элементов, реализованном в программном комплексе ANSYS, конечно-элементная модель причальной конструкции [4, 5], длина которой составляет 300 метров, а высота 35 метров, может быть представлена количеством элементов, превышающим 500 тысяч. При таких параметрах КЭ-модели время расчета при использовании компьютера со средними вычислительными ресурсами может составлять несколько часов.

Причалная конструкция, рассматриваемая в настоящей работе, была оборудована ИИС, состоящей из шестнадцати деформационных и четырех GPS-датчиков позиционирования. Подобная система выполняет контроль смещения носовой и подходной эстакады пирса по четырем датчикам позиционирования (по два на каждую часть пирса) в трех пространственных координатах и относительную де-

формацию свай по 16 деформационным датчикам (по два датчика на каждую сваю, то есть контроль ведется только по 8 сваям из 122).

Постановка задачи численного расчета НДС причала рассматривается как общая задача механики сплошной среды и может быть сформулирована следующим образом: известны (заданы) внешние воздействия на объект, определенным образом закрепленный в пространстве. Необходимо найти некоторые функции координат, описывающие состояние рассматриваемого объекта [6, 7].

В систему исходных функций входят компоненты вектора перемещений

$$\{\mathbf{u}\} = \{u(x, y, z), v(x, y, z), w(x, y, z)\},$$

а также вектор напряжений

$$\{\boldsymbol{\sigma}\} = \{\sigma_x(x, y, z), \sigma_y(x, y, z), \sigma_z(x, y, z), \tau_{xy}(x, y, z), \tau_{yz}(x, y, z), \tau_{xz}(x, y, z)\}$$

и деформаций

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = \{\varepsilon_x(x, y, z), \varepsilon_y(x, y, z), \varepsilon_z(x, y, z), \gamma_{xy}(x, y, z), \gamma_{yz}(x, y, z), \gamma_{xz}(x, y, z)\}.$$

Процедура определения указанных функций применительно к инженерным задачам называется расчетом конструкции. С математической точки зрения он сводится к решению краевых задач для системы уравнений, включающих:

уравнения равновесия

$$[\Phi]^T \{\boldsymbol{\sigma}\} = \{\Gamma_v\}; \quad (1)$$

геометрическое уравнение (Коши)

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = [\Phi] \{\mathbf{u}\}; \quad (2)$$

определяющие физические уравнения

$$\{\boldsymbol{\sigma}\} = [D] \{\boldsymbol{\varepsilon}\}, \quad (3)$$

где  $[\Phi]$  – матрица дифференциальных операторов

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix};$$

$\{\Gamma_v\} = \{X(x, y, z), Y(x, y, z), Z(x, y, z)\}$  – вектор-функция объемных сил;

$[D]$  – матрица механических характеристик материала

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix};$$

$E$  – модуль упругости материала;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Решая совместно (1)–(3) относительно неизвестных перемещений, можно получить разрешающее уравнение

$$[\Phi]^T [D] [\Phi] \{u\} = \{\Gamma_v\}. \quad (4)$$

Уравнение (4) дополняется кинематическими и статическими граничными условиями.

В методе конечных элементов, суть которого хорошо описана в [8], задача статического нагружения сводится к решению системы сходных уравнений, в которых искомыми являются лишь дискретные (узловые) значения функций:

$$[K] \{u\} = \{\Gamma\}, \quad (5)$$

где  $\{u\}$  – вектор искомых значений в узловых точках;  $[K]$  – матрица, называемая матрицей жесткости, которая описывает связь между прикладываемыми усилиями и соответствующими им перемещениями;  $\{\Gamma\}$  – вектор известных правых частей.

Искомые перемещения узлов могут быть получены после обращения матрицы  $[K]$  в виде

$$\{u\} = [K]^{-1} \{\Gamma\}. \quad (6)$$

После создания КЭ-модели конструкции причала определяется набор наиболее вероятных сценариев внешних эксплуатационных воздействий. К рассматриваемым внешним воздействиям можно отнести набор следующих типовых нагрузок: навал судна вблизи носовой, средней части причала и вблизи подходной эстакады; температурные деформации; волновые, ветровые нагрузки. Решая, например, задачу швартовки судна, фактически определяется отклик конструкции пирса на воздействие поперечной силы, действующей на определенное количество отбойных устройств. В случае температурных сезонных деформаций надводная часть причала охлаждается в соответствии с текущей температурой окружающего воздуха.

Для контроля отклика КЭ-модели конструкции пирса выбраны такие конечные элементы (в дальнейшем будем называть их «модельными датчиками»), размер и расположение которых соответствует месту установленных датчиков деформации. Набор значений модельных датчиков обозначим числовым вектором  $\{b\}$ . В процессе верификации КЭ-модели причала показания модельных датчиков приводятся в соответствие текущим значениям деформационных датчиков, которые обозначим вектором  $\{B\}$ , при известных заданных воздействиях  $\{\Gamma\}$ .

Считается, что деформации конструкции  $\{e\}$  в штатном режиме эксплуатации могут быть вызваны линейной комбинацией  $m$  известных независимых механических типовых нагрузок  $\{\Gamma_k\}$  с некими коэффициентами  $x_k$ :

$$\{\Gamma\} = \sum_k^m x_k \{\Gamma_k\}. \quad (7)$$

Учитывая, что объект находится под действием набора независимых механических нагрузок и ведет себя линейным образом, его результирующее состояние может быть получено простой линейной комбинацией вклада каждой из нагрузок:

$$\{\mathbf{u}\} = \sum_k^m x_k \{\mathbf{u}_k\} = \sum_k^m x_k [\mathbf{K}]^{-1} \{\mathbf{\Gamma}_k\}. \quad (8)$$

Ключевым моментом организации системы мониторинга является создание базы данных (БД), содержащей информацию об отклике конструкции на типовые воздействия. Для каждой типовой нагрузки  $\{\mathbf{\Gamma}_k\}$  из решения (6) определяются и записываются в БД значения величин  $\{\mathbf{u}\}$ ,  $\{\mathbf{\varepsilon}\}$  и  $\{\mathbf{\sigma}\}$  для всей конструкции пирса. Из вектора деформаций  $\{\mathbf{\varepsilon}\}$  выделяется вектор  $\{\mathbf{b}\}$ , включающий только значения деформации модельных датчиков. Данные векторы формируют матрицу  $[\mathbf{A}]$  следующим образом:

$$[\mathbf{A}] = [\{\mathbf{b}_1\} \quad \{\mathbf{b}_2\} \quad \dots \quad \{\mathbf{b}_m\}] \quad (9)$$

или

$$[\mathbf{A}] = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{21} \\ \dots \\ \varepsilon_{n1} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{22} \\ \dots \\ \varepsilon_{n2} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \varepsilon_{1m} \\ \varepsilon_{2m} \\ \dots \\ \varepsilon_{nm} \end{bmatrix} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Таким образом, матрица состоит из  $m$  столбцов, каждый из которых соответствует одной типовой нагрузке, и  $n$  строк, каждая из которых содержит значения деформации модельного датчика.

Основным предположением в работе считается то, что вектор искомых коэффициентов комбинирования типовых нагрузок  $\{\mathbf{x}\}$ , состоящий из компонент  $x_k$  уравнения (7), может быть использован для определения НДС конструкции пирса путем решения обратной задачи – системы уравнений, записанной в виде

$$[\mathbf{A}] \cdot \{\mathbf{x}\} = \{\mathbf{B}\}, \quad (11)$$

где  $\{\mathbf{B}\}$  – вектор показаний реальных датчиков деформации в условиях комбинированной нагрузки на сооружение.

Другими словами, получив информацию от ИИС о текущих значениях деформационных датчиков, решая систему уравнений (11), подбирается такая комбинация известных типовых нагрузок  $\{\mathbf{\Gamma}\}$  с весовыми коэффициентами  $\{\mathbf{x}\}$ , при которых расчетное результирующее состояние НДС совпадет с текущим.

Фактически, в рамках решения обратной задачи вместо исходной системы уравнений (5) решается родственная система уравнений (11). Решение обратной задачи деформирования такой сложной конструкции, как причал, с большим числом конечных элементов занимает доли секунды, поскольку в поиске решения участвуют не все точки расчетных вариантов НДС, а только точки, соответствующие местам установки датчиков измерительной системы.

Описываемый в работе алгоритм методики системы мониторинга (7) – (11) может быть представлен схемой, изображенной на рис. 1.

Текущие данные с датчиков системы мониторинга поступают по электронным каналам связи на персональный компьютер оператора. При этом в окне интерфейса программы происходит обновление табличных данных и графиков (рис. 2).

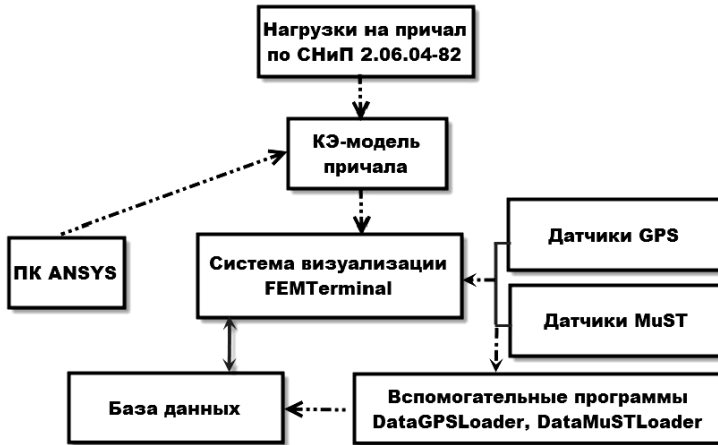


Рис. 1. Схема работы системы мониторинга

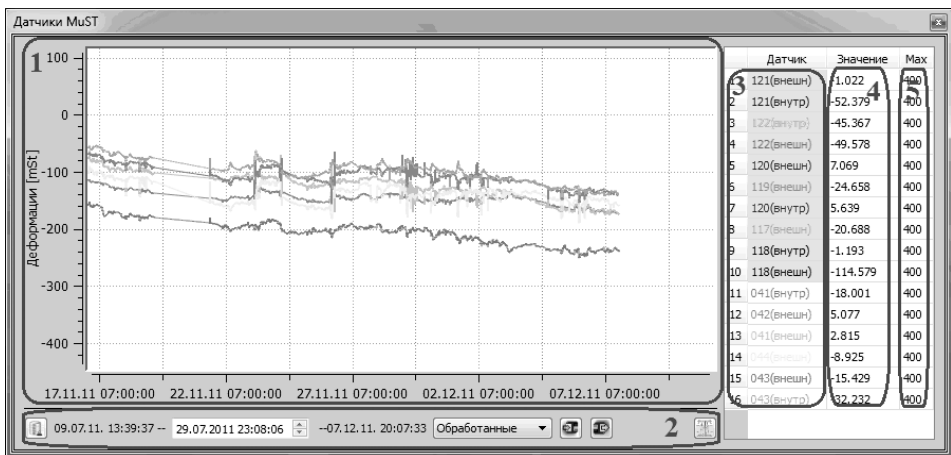


Рис. 2. Окно интерфейса программного комплекса с поступающими показаниями деформационных датчиков системы мониторинга

В процессе поступления информации о значениях деформационных сенсоров согласно уравнению (11) происходит поиск коэффициентов  $\{x\}$ . После чего полученные коэффициенты подставляются в уравнение (7). Чтение исходных данных из БД ( типовые нагрузки  $\{\Gamma_k\}$ ) и решение данного алгебраического уравнения осуществляется за считанные доли секунды с последующим обновлением контурной карты пространственной визуализации результирующей картины НДС (рис. 3).

Заложенный функционал позволяет осуществлять непрерывную обработку поступающей информации с датчиков, выполнять анализ архивной информации и визуализацию состояния причала за выбранный промежуток времени.

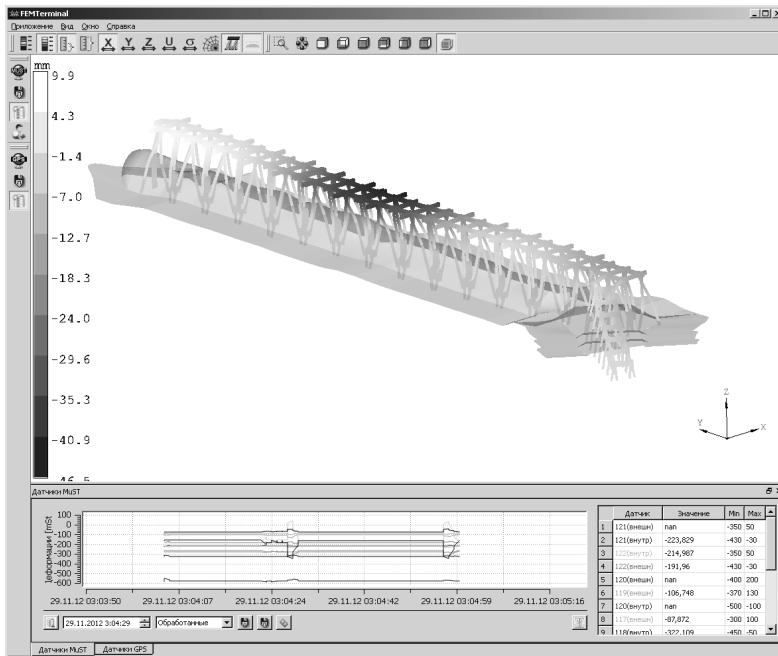


Рис. 3. Общий интерфейс программного комплекса мониторинга конструкции причала.  
Навал судна на отбойные устройства центральной части пирса

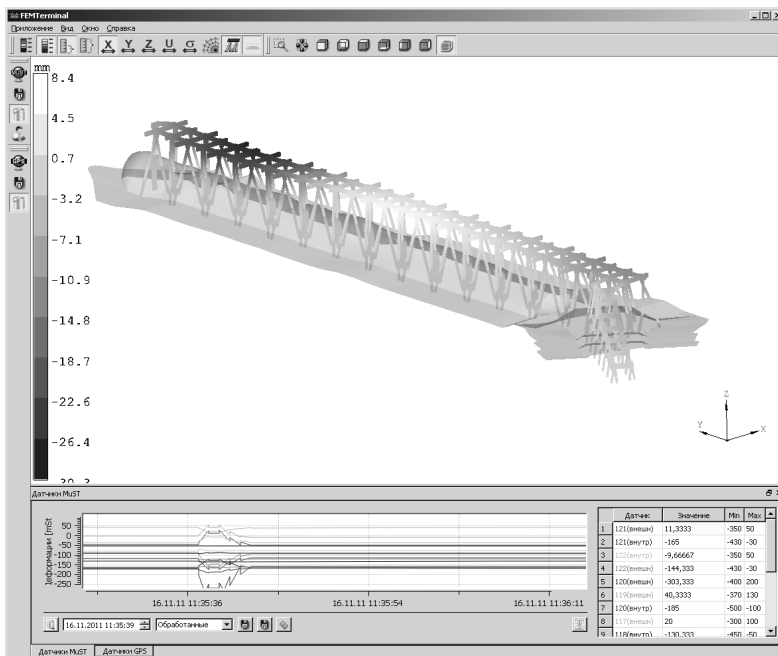


Рис. 4. Общий интерфейс программного комплекса мониторинга конструкции причала.  
Навал судна на отбойные устройства носовой части пирса

## ЛИТЕРАТУРА

1. Улыбин А. В., Ватин Н. И. Качество визуального обследования зданий и сооружений и методика его выполнения. // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 10(25). С. 134–146.
2. Методические рекомендации по контролю технического состояния и оценке безопасности судоходных гидротехнических сооружений / Утв. зам. рук. Фед. агент.мор. и реч. транс. В.Н. Вовк 15.04.2011 г. М.: РОСМОРРЕЧФЛОТ, 2011. 136 с.
3. Костюков В.Д. Надежность морских причалов и их реконструкция. М.: Транспорт, 1987. С. 223.
4. Яцук А.А., Солоненко В.А., Бовсуновский А.Б., Бутов В.Г., Кулешов А.А. Система мониторинга причальной конструкции // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 7/3. С. 137–139.
5. Бутов В.Г., Солоненко В.А., Яцук А.А., Бовсуновский А.Б., Кулешов А.А. Разработка системы мониторинга состояния причального сооружения // Вестник ТГАСУ. 2015. № 2. С. 166–175.
6. Клованич С.Ф., Безушко Д.И. Метод конечных элементов в нелинейных расчетах пространственных железобетонных конструкций. Одесса: Изд-во ОМНУ, 2009. 91 с.
7. Сабоннадьер Ж.К., Кулон Ж.Л. Метод конечных элементов и САПР. М.: Мир, 1989. 190 с.
8. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 542 с.

Статья поступила 15.06.2015 г.

*Kuleshov A.A., Solonenko V.A., Yashchuk A.A.* MONITORING SYSTEM AND VISUALIZATION OF THE STRESS-STRAIN STATE FOR THE BERTH CONSTRUCTION IN REAL TIME

DOI 10.17223/19988621/38/9

In this work, the stress and strain of the berth construction is estimated by use of the finite element method implemented in the ANSYS software. The method claimed allows calculating and visualizing the stress-strain shape of the berth construction in real time by using the tracking sensors value of strain at certain limited number points. Considering the set of equations in the static formulation with reference on nodal displacement in the finite element method and taking into account that the current external influence can be represented by a linear combination of known loads taken with some coefficients, the resulting stress-strain state can be expressed as a linear combination of responses to these loads with the same coefficients. The use of a recalculated database of the structural response to known external loads and current information from sensors allows one to estimate and visualize the stress-strain state of the whole construction.

Keywords: finite element method, berth, ANSYS, monitoring system, sensors, stress-strain visualization.

*KULESHOV Artem Alexandrovich* (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)

E-mail: artem.kuleshov@niipmm.tsu.ru

*SOLONENKO Victor Alexandrovich* (Candidate of Physics and Mathematics, Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)

E-mail: vik@niipmm.tsu.ru

*YASHCHUK Alexey Alexandrovich* (Candidate of Physics and Mathematics, Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)

E-mail: rainbow@niipmm.tsu.ru

## REFERENCES

1. Ulybin A. V., Vatin N. I. Kachestvo vizual'nogo obsledovaniya zdaniy i sooruzheniy i metoda ego vypolneniya.. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy*, 2014, no. 10(25), pp. 134–146. (in Russian)
2. *Metodicheskie rekomendatsii po kontrolyu tekhnicheskogo sostoyaniya i otsenke bezopasnosti sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* / Utv. zam. ruk. Fed. agent.mor. i rech. trans. V.N. Vovk 15.04.2011 g. Moskow, ROSMORREChFLOT Publ., 2011. 136 p. (in Russian)
3. Kostyukov V.D. *Nadezhnost' morskikh prichalov i ikh rekonstruktsiya*. Moskow, Transport Publ., 1987, pp. 223. (in Russian)
4. Yashchuk A.A., Solonenko V.A., Bovsunovskiy A.B., Butov V.G., Kuleshov A.A. Sistema monitoringa prichal'noy konstruksii. *Izv. vuzov. Fizika*, 2013, vol. 56, no. 7/3, pp. 137–139. (in Russian)
5. Butov V.G., Solonenko V.A., Yashchuk A.A., Bovsunovskiy A.B., Kuleshov A.A. Razrabotka sistemy monitoringa sostoyaniya prichal'nogo sooruzheniya. *Vestnik TGASU*, 2015, no. 2, pp. 166–175. (in Russian)
6. Klovanich S.F., Bezushko D.I. *Metod konechnykh elementov v nelineynykh raschetakh prostanstvennykh zhelezobetonnykh konstruksiy*. Odessa, Izd-vo OMNU, 2009. 91 p. (in Russian)
7. Sabonnad'er Zh.K., Kulon Zh.L. *Metod konechnykh elementov i SAPR*. Moskow, Mir Publ., 1989. 190 p. (in Russian)
8. Zienkiewicz O.C. *The finite element method in engineering science*. London, McGraw-hill, 1977. 542 p.