

МАТЕРИАЛЫ XIX МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ  
МЕХАНИКЕ И СОВРЕМЕННЫМ ПРИКЛАДНЫМ ПРОГРАММНЫМ СИСТЕМАМ



*Посвящается памяти Ульяна Гайковича Пирумова*

**МАТЕРИАЛЫ XIX МЕЖДУНАРОДНОЙ  
КОНФЕРЕНЦИИ ПО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКЕ  
И СОВРЕМЕННЫМ ПРИКЛАДНЫМ  
ПРОГРАММНЫМ СИСТЕМАМ**



**ВМСППС'2015**

24–31 мая 2015 г.  
Алушта, Крым



УДК 519.6:517.958:533.6  
ББК 22.2:2218  
М34

Издание осуществлено при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований (проект №15-08-20276г)  
и Московского авиационного института  
(национального исследовательского университета)

М34 **Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015), 24–31 мая 2015 г., Алушта.** — М.: Изд-во МАИ, 2015. — 760 с.: ил.

ISBN 978-5-4316-0242-9

Сборник включает в себя научные работы, отражающие современные мировые достижения в вычислительной механике, механике деформируемого твердого тела, механике жидкости, газа и плазмы, аэрокосмической механике, прикладной математике, разработке прикладных программных средств.

Для специалистов в области прикладной математики и механики, математического моделирования, информационных технологий, разработчиков современных прикладных программных систем, аспирантов и студентов старших курсов технических вузов.

Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике  
и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015),  
24–31 мая 2015 г., Алушта

Дизайн и компьютерная верстка *Ал. А. Пярнпуу*

---

Подписано в печать 27.04.15. Формат 70 × 100 1/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 61,75  
Тираж 400 экз. Изд. №323

---

Издательство МАИ  
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ООО «АРТИШОК продакшн»,  
125476, Россия, Москва, ул. Василия Петушкова, д. 8, e-mail: info@artishok.ru

ISBN 978-5-4316-0242-9

© Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский  
университет), 2015

## МЕТОДИКА МОНИТОРИНГА И ВИЗУАЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИЧАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

*А. А. Кулешов, А. Б. Бовсуновский, В. Г. Бутов, В. А. Солоненко, А. А. Ящук*

*НИИПММ ТГУ, Томск, Россия*

Слежение за нормативной эксплуатацией и напряженно-деформированным состоянием (НДС) конструкции в существующем виде ведется в значительной степени визуально при помощи контрольно-измерительных методов. В этом случае наблюдается невысокая оперативность получения информации объективной оценки технического состояния, особенно промышленных объектов, которые подвержены активным внешним воздействиям. Путь уменьшения интервала периодичности контрольно-измерительного мониторинга экономически затратен, а также чрезмерно трудоемок в виду выполнения большого объема работ. Кроме того, классические методы инструментального контроля и оценки НДС не позволяют эффективно предупреждать достижения усталостных отказов, сопровождающиеся упругопластическим или пластическим деформированием.

Частично или полностью рассмотренные ранее недостатки могут быть устранены с помощью применения комплексных автоматизированных измерительных систем, позволяющие в режиме реального времени собирать информацию с датчиков и отправлять их оператору. Однако, следует учитывать, что ввиду дороговизны подобных измерительных систем, количество контрольных точек чаще всего ограничено. Из этого следует, что объема поступающей информации достаточно только для описания НДС лишь в определенных наиболее ответственных элементах конструкции. И в этом случае определить НДС полной конструкции и распределение внутренних усилий не представляется возможным.

Целью настоящей работы является устранение вышеописанного пробела в виде методики перехода от фиксирования параметров пространственного деформирования в строго определенных местах к внутренним усилиям, возникающим по всей конструкции. Для достижения указанной цели предложена методика оценки НДС с использованием метода конечных элементов, реализуемого в программном комплексе ANSYS. Путем актуализации расчетной конечно-элементной модели (далее КЭ-модели) данными, поступающими с информационно-измерительных датчиков, предложена методика мониторинга состояния на примере причальной конструкции.

Рассматривая в статической постановке систему уравнений относительно узловых смещений в классическом для метода конечных элементов виде:

$$[K]\{U\} = \{B\}, \quad (1)$$

где  $\{U\}$  — вектор искомых значений в узловых точках;  $[K]$  — матрица, называемая матрицей жесткости;  $\{B\}$  — вектор известных правых частей.

Искомые перемещения (а затем деформации и механические напряжения) могут быть получены после обращения матрицы  $[K]$  в виде

$$\{U\} = [K]^{-1}\{B\}. \quad (2)$$

В то же время, рассматривая структуру уравнений (1) и (2), можно сказать, что если объект находится под действием набора независимых механических нагрузок

и ведет себя линейным образом, то его результирующее состояние может быть получено простой линейной комбинацией вклада каждой из нагрузок, т. е.

$$\{U\} = \sum_n \{U_n\} = \sum_n [K]^{-1} \{B_n\}, \quad (3)$$

где  $\{U\}$  — результирующая картина НДС;  $\{U_n\}$  — картина НДС, вызванная элементарной нагрузкой.

Исходя из предположения, что деформации конструкции в штатном режиме эксплуатации могут быть вызваны только известными типовыми нагрузками (3), а также из предположения линейного характера поведения материалов, любое НДС конструкции может быть выражено как линейная комбинация НДС типовых нагрузок:

$$\{b\} = \sum_n x_n \{a_n\}, \quad (4)$$

или в матричном виде

$$[A]\{x\} = \{b\}, \quad (5)$$

где  $[A]$  — матрица, столбцы которой составляют показания «модельных» датчиков по каждой из типовых нагрузок;  $\{x\}$  — вектор искомых коэффициентов комбинирования типовых нагрузок;  $\{b\}$  — вектор показаний модельных или реальных датчиков деформации в условиях комбинированной нагрузки на сооружение.

На следующем этапе производится преобразование исходной матрицы СЛАУ к виду:

$$[\tilde{A}] = [A]^T [W] [A], \quad (6)$$

$$\{\tilde{b}\} = [A]^T [W] \{b\}, \quad (7)$$

где  $[W]$  — матрица весовых коэффициентов для датчиков деформации. В общем случае, это единичная матрица. В случае отказа или сбоя в работе какого-либо датчика соответствующий диагональный элемент  $[W]$  принимается равным нулю и показания данного датчика исключаются из рассмотрения (эквивалентно сокращению длины вектора  $\{b\}$  и размерности  $[A]$ ). Вместе с тем операция перемножения прямоугольных матриц  $[A]^T [A]$  стабильно дает квадратную матрицу  $[\tilde{A}]$  с размерами  $N \times N$ , где  $N$  — количество типовых нагрузок.

По сути, в рамках решения обратной задачи вместо исходной системы уравнений (5) решается родственная система уравнений вида:

$$[\tilde{A}]\{x\} = \{\tilde{b}\}. \quad (8)$$

Исследованы два способа решения системы (8): прямой метод и итерационный.

В рамках прямого метода решение находится путем обращения матрицы  $\tilde{A}$  в виде:

$$\{x\} = [\tilde{A}]^{-1} \{\tilde{b}\}. \quad (9)$$

Другим способом получения решения системы (5) является итерационный метод с минимизацией невязки решения:

$$\|\{\tilde{b}\} - [\tilde{A}]\{x\}\| < \varepsilon, \quad (10)$$

где:  $\varepsilon$  — заданная точность решения.

В рамках прямого метода наилучшее решение получается при помощи LU-разложения, где приведение матрицы  $[G]$  к треугольному виду приводит к накоплению ошибок округления и неверному вычислению значения вектора  $\{x\}$ . Хороший результат для решения уравнения (10) дает метод (BICGSTAB).

В обоих рассмотренных случаях задача с большим числом степеней свободы решается в доли секунды, поскольку в поиске решения участвуют не все точки расчетных вариантов НДС, а только точки, соответствующие местам установки датчиков измерительной системы.

Работа системы мониторинга основана на следующем алгоритме: на основе СНиП 2.06.04-82 и регулярных наблюдений за эксплуатацией причала выбраны возможные варианты его нагружения; с использованием созданной КЭ-модели причала получено распределение смещений и напряжений по всей конструкции пирса для выбранных «стандартных» случаев. Кроме того, с использованием КЭ-модели причала получено соответствие между значениями деформаций в местах установки датчиков и внешней нагрузкой. По данным датчиков смещений и деформаций определяется текущий вид и сила воздействия. По уже имеющейся зависимости распределения напряжений от внешнего воздействия картина деформаций по всей конструкции пирса восстанавливается и приводится в удобном для восприятия пользователем виде в разработанной системе визуализации.

## **ПРЕДСТАВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ДАННЫХ ТЕНЗОМЕТРИИ В ПРОЦЕССЕ ПРОВЕДЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ**

*Д. В. Курулюк*

*ЦАГИ, Жуковский, Московская обл., Россия*

Целью настоящей работы было создание удобного и наглядного способа визуализации, при котором специалист, ведущий статические испытания самолета, смог бы быстро получить и оценить интересующие его данные, а также сориентироваться в картине эксперимента в целом. Для этого был создан «Модуль визуализации тензометрии», ниже как Модуль.

Основной концепцией Модуля является отображение данных тензометрии не только в табличной форме, но и на схемах расположения датчиков, которые для каждого конкретного изделия подготавливаются заранее в среде AutoCad и переводятся в графический формат.

На рис. 1 представлен интерфейс Модуля. При работе с Модулем у оператора имеется возможность выбрать необходимую схему и наблюдать за данными тензометрии в режиме реального времени. Каждый отдельный тензодатчик обозначается цветным прямоугольником, причем его местоположение на схеме соответствует реальному положению датчика на конструкции.

Как правило, для отдельных элементов конструкции известна заранее расчетная максимальная нагрузка. На основании этих данных реализована визуализация тензодатчиков на схеме с использованием градиентного перехода цвета: светло-зеленые оттенки — для обозначения датчиков с низким напряжением, желтые — со средним, а красные — с большим, близким к критическому.

Как известно, при статических испытаниях тензодатчики объединяются в розетки, что позволяет получать более подробную информацию о сложнапряженном состоянии в локальных частях конструкции. Модуль обеспечивает визуализа-