

УДК 626.422.23

Мониторинг технических конструкций на основе редуцированных конечно-элементных моделей

И.А. Мещихин¹, С.С. Гаврюшин², Е.А. Зайцев³

¹ ИНЭУМ им. И.С. Брука, 119334, Москва, Российская Федерация, Вавилова ул., д. 24

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

³ Московская государственная академия водного транспорта, 117105, Москва, Российская Федерация, Новоданиловская наб., д. 2, корп. 1

Monitoring of Engineering Structures Using Reduced Finite Element Models

I.A. Meshchikhin¹, S.S. Gavriushin², E.A. Zaitsev³

¹ Bruk Institute of Electronic Controlling Machines, 119334, Moscow, Russian Federation, Vavilov St., Bldg. 24

² BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

³ Moscow State Academy of Water Transport, 117105, Moscow, Russian Federation, Novodanilovskaya Nab., Bldg. 2, Block 1



e-mail: mefict@mail.ru, gss@bmstu.ru



Изложена численная методика, предназначенная для контроля состояния сложных технических конструкций. В случае сложных условий работы (возможность загрязнений зоны наблюдения, работа в агрессивной среде, подвижность элементов конструкции, сезонность работы и пр.) особенно востребована методика, регистрирующая состояние конструкции дистанционно, без установки на объект мониторинга аппаратуры и маркеров. При выборе в качестве параметров идентификации перемещений объекта мониторинга возможна организация их дистанционной регистрации. В методике предусмотрена редукция исходной конечно-элементной модели, что существенно сокращает объем контролируемой информации. Предложен критерий назначения параметров идентификации для восстановления с минимальной погрешностью априори не известных по значению нагрузок, действующих на конструкцию. Рассмотрена процедура, позволяющая на основе измеренных перемещений оценивать актуальное напряженно-деформированное состояние конструкции, а также выявлять наличие неучтенного нагружения. Формат предлагаемой методики предполагает разработку оригинальной редуцированной модели, учитывающую индивидуальные особенности работы конструкции для каждого объекта мониторинга.

Ключевые слова: технический объект, мониторинг, метод конечных элементов, статическая конденсация, редуцированная модель, очувствление конструкций.



The authors present a numerical method designed for the control of complex engineering structures. The method that can register the condition of a structure remotely, without installing monitoring equipment and markers on the structure, is particularly sought after. It can be used in arduous operating conditions such as a contaminated observation zone, corrosive environment, shifting structural elements, work seasonality, etc. When choosing generalized displacements of the monitoring object as identification parameters, it is possible to organize their distant registration. The technique uses a reduction of the initial finite element model, which helps to significantly reduce the amount of the controlled information. The authors propose a criterion for the allocation of the identification parameters in order

to determine with minimum errors a priori unknown loads acting on the structure. The article describes a procedure that uses measured displacements to evaluate the actual stress-strain condition of the structure and identify the presence of unaccounted loading. The format of the proposed method involves the development of an original reduced model that considers the specifics of individual structures for each monitoring object.

Keywords: technical object, monitoring, finite element method, static condensation, reduced model, sensitive designs.

При мониторинге сложных технических конструкций и сооружений, для принятия обоснованного решения о возможности дальнейшей эксплуатации, необходимо оперативно определять и оценивать текущие значения их прочностных характеристик. В качестве примера сложной конструкции можно привести затвор шлюза (рис. 1). Задача оперативной оценки напряженного состояния элементов гидрозпорных сооружений в процессе эксплуатации актуальна ввиду значительной изношенности фонда конструкций [1], дороговизны и значительных издержек при нештатном блокировании судопропуска.

Методы и приемы оценки состояния конструкции непосредственно в процессе эксплуатации имеют следующие особенности:

- недостаточный объем информации о состоянии конструкции, что связано с ограничением количества и мест установки датчиков и других устройств регистрации параметров объекта;
- необходимость оперативной оценки состояния конструкции.

Целью работы является разработка расчетно-экспериментальной методики мониторинга напряженно-деформированного состоя-

ния (НДС) сложных конструкций на основе ограниченного объема информации, полученной по результатам контрольных измерений объектов.

Систему мониторинга состояния объекта используют для принятия обоснованного решения о пригодности конструкции к дальнейшей эксплуатации. Система обеспечивает возможность оперативного реагирования в случае нештатной (аварийной) ситуации. Под *нештатной ситуацией* подразумевается невыполнение ограничений по прочности и жесткости.

Применение редуцированной математической модели объекта мониторинга, полученной по излагаемой далее процедуре, является естественным компромиссом между сохранением достаточной для анализа информации об объекте и возможностью ее оперативной обработки.

Для регистрации факта предельного состояния необходимо фиксировать определенный набор контролируемых параметров, характеризующий состояние конструкции. К данному набору предъявляются требования технической реализуемости измерений входящих в него параметров и возможности достоверной оценки состояния объекта по их численным значениям.

Для гидротехнических сооружений характерны длительные сроки эксплуатации, значительные габаритные размеры сооружения, эксплуатация датчиков в условиях водно-воздушной среды, поэтому наиболее предпочтительна дистанционная регистрация обобщенных перемещений конструкции. Отдельной задачей является определение числа и расположения локальных зон конструкции, измерения перемещений в которых наиболее эффективно.

Для обеспечения мониторинга требуется располагать процедурой, которая позволяет на основе ограниченного объема информации, полученной в результате измерений, оценить состояние конструкции. Процедура мониторинга, с одной стороны, должна быть как можно более простой и удобной, а с другой — позволять достоверно оценивать текущее НДС объекта.



Рис. 1. Общий вид конструкции шлюзового затвора

Для создания виртуальной модели объекта мониторинга рационально воспользоваться методом конечных элементов (МКЭ) [2]. При линейном статическом описании объекта его *полномасштабная* (подробная) модель формулируется в виде системы линейных уравнений высокого порядка [3], решение которой в режиме реального времени затруднительно. Дополнительные сложности связаны с необходимостью коррекции вектора узловых сил, поскольку действующие на объект актуальные нагрузки в процессе эксплуатации могут изменяться. В целях сокращения времени расчета используют реализуемый методом статической конденсации [4] переход от полномасштабной модели к *редуцированной*. Редукция исходной системы линейных алгебраических уравнений существенно уменьшает число неизвестных [5] и позволяет выбрать в качестве последних наиболее информативные параметры для последующего мониторинга объекта [6].

Таковыми параметрами, характеризующими состояние объекта, могут быть обобщенные перемещения или другие пригодные для измерения величины, называемые далее *параметрами идентификации*. Следует подчеркнуть, что качество и достоверность информации об объекте, восстановленной по результатам измерений, существенно зависит от выбора параметров идентификации. Поэтому процедура рационального назначения параметров идентификации является одним из важнейших положений, обсуждаемых в работе.

Выбор параметров идентификации. В предположении линейного поведения объекта в про-

цедуре оценки НДС конструкции использован принцип суперпозиции, что ограничивает возможности мониторинга, однако позволяет получить информацию, достаточную для практической оценки поведения объекта в заданном диапазоне значений контролируемого набора нагрузок. Под *контролируемым набором нагрузок* понимается субъективно определяемая (характерная) совокупность нагрузок различной физической природы, действующих на объект мониторинга. В контролируемый набор входят все возможные сочетания одновременно действующих на объект внешних воздействий.

Алгоритм мониторинга включает два основных этапа:

1) выбор параметров идентификации и проведение замеров соответствующих им обобщенных перемещений;

2) определение по измеренным обобщенным перемещениям значений действующих на объект контролируемых нагрузок и расчет НДС объекта по полномасштабной модели.

Схема предлагаемого алгоритма, согласно стандарту IDEF0 [7], представлена на рис. 2.

Выбор параметров идентификации состояния объекта. К параметрам, используемым для идентификации объекта, предъявляются следующие требования:

1) максимальная чувствительность для заданного набора действующих нагрузок;

2) способность обеспечивать линейно независимый отклик конструкции для заданного набора нагружений.

Под *набором нагружений* понимается некоторая совокупность различных сочетаний од-

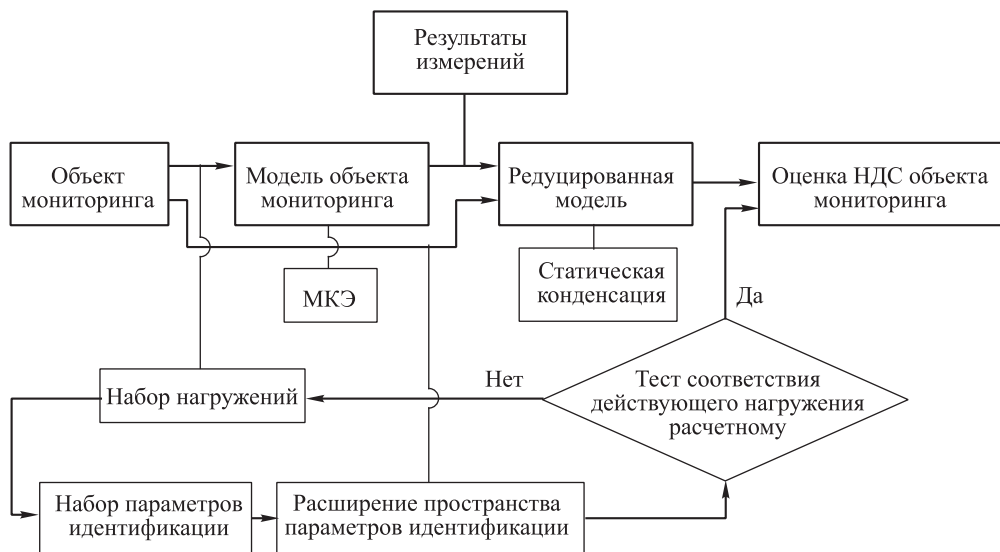


Рис. 2. Блок-схема предлагаемого алгоритма оценки максимальных напряжений в объекте мониторинга

новременно действующих на объект воздействий, определяемая по условиям функционирования объекта.

Параметры идентификации измеряют с определенной точностью, зависящей от способа измерения.

Указанным требованиям удовлетворяет выбор n измеряемых обобщенных перемещений, который доставляет максимум детерминанту матрицы откликов на n нагружений. Матрица откликов $[\delta]$ формируется по столбцам. Каждый ее столбец представлен в виде вектора в пространстве обобщенных перемещений. Компонента матрицы откликов δ_{ij} численно равна i -му обобщенному перемещению, вызванному действием j -го нагружения. Численное значение детерминанта интерпретируется как ориентированный объем параллелепипеда [8], ребра которого заданы векторами-столбцами матрицы $[\delta]$.

Геометрическая интерпретация для матрицы откликов размером 2×2 представлена на рис. 3. Матричный оператор $[\delta]$ осуществляет линейное отображение из пространства нагружений в пространство измерений. В частности, он отображает единичную окружность в эллипс, длины главных осей которого равны модулям собственных значений матрицы $[\delta]$, а их ориентация совпадает с направлением ее собственных векторов.

Предполагается, что для измеряемых величин задан уровень шума, определяемый погрешностью $\pm \Delta a$ используемых средств измерений. Принимается, что сигнал пригоден для идентификации нагрузки, если все компоненты вектора измерений превосходят по модулю Δa . Качество выбора оператора $[A]$ удобно оценивать с помощью отношения модуля его минимального собственного значения λ_{\min} к уровню шума Δa . В дальнейшем для оценки погрешности идентификации параметров нагружения будем использовать условие

$$\left| \frac{\Delta a}{\lambda_{\min}} \right| \leq [\beta], \quad (1)$$

где $[\beta]$ — допускаемый приемлемый уровень отношения шум/сигнал.

Процедура выбора параметров идентификации сводится к последовательному перебору всех возможных сочетаний измеряемых обобщенных перемещений для нахождения комбинации, доставляющей максимум детерминанту матрицы $[\delta]$. Важно отметить, что анализу подлежат не все множество степеней свободы, а только предварительно отобранные обобщен-

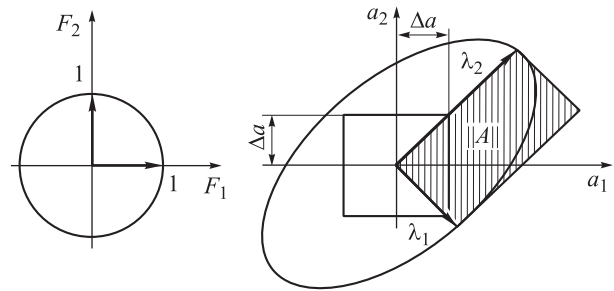


Рис. 3. Геометрическая интерпретация процедуры выбора множества информативных параметров для $n = 2$

ные перемещения, заведомо пригодные для измерения. Например, в случае дистанционного замера прогибов таким условием является наличие прямой видимости с позиции установки дальномера. Для сложных конструкций предварительный отбор степеней свободы может проводиться по субъективным критериям, определяемым на основе экспертной оценки [9].

Количество переборных комбинаций может быть сокращено при использовании следующей стратегии. Сначала необходимо провести предварительное ранжирование нагрузок из контролируемого набора по их значимости. Процедуру перебора начинаем с определения двух обобщенных степеней свободы, позволяющих наиболее точно оценить масштабный фактор для двух субъективно выбранных наиболее значимых случаев нагружения (о способе оценки будет сказано далее). Затем продолжаем процедуру, последовательно добавляя по одной обобщенной степени свободы на каждый дополнительный фактор нагрузки.

С использованием окончательно выбранного набора параметров идентификации вычисляем масштабные коэффициенты для нормированных нагрузок, входящих в состав контролируемого набора.

Реальное значение нагрузки находим путем умножения каждой нормированной нагрузки на соответствующий масштабный коэффициент. Расчетный набор нагрузок, действующих на конструкцию, определяем методом суперпозиции.

Располагая редуцированной конечно-элементной моделью и матрицами восстановления (ОТМ — Output Transformation Matrix) [10], можно на основе измеренных параметров идентификации восстановить значения компонент тензора напряжений в наборе элементов, который, согласно предварительно проведенному анализу, характеризует НДС конструкции в целом.

Оценка точности расчета. Предлагаемая методика дает возможность оценить погрешность восстановленного по параметрам идентификации расчетного набора нагрузок относительно реально действующего набора нагрузок и, как следствие, погрешность в определении НДС объекта.

Причиной возникновения погрешностей в оценке набора нагрузок являются процессы деградации конструкции в процессе эксплуатации, что сказывается на результатах измерений, а также появление дополнительных нагрузок, изначально не включенных в контролируемый набор.

Оценка погрешности контролируемого набора нагрузок осуществляется с помощью приема расширения пространства параметров идентификации. Суть приема заключается в следующем. Значения n параметров идентификации, возникающие при действии произвольного набора из n нагрузок, образуют множество в пространстве R^n . Расширим пространство параметров идентификации до R^{n+1} путем добавления дополнительного параметра, такого, чтобы минимальное значение минора расширенной матрицы откликов (прямоугольная матрица размером $n \times (n+1)$) было максимальным.

Мера близости результата измерений в пространстве R^{n+1} к множеству R^n определяет соответствие модельного расчетного нагружения реальным нагрузкам, действующим на конструкцию. В качестве меры близости используется кратчайшее евклидово расстояние [8] от точки, компонентами которой являются результаты измерений, до n -мерного множества. В пространстве R^2 (рис. 4) расстояние от точки $P(a_1, a_2)$, представляющей собой результаты измерений, до прямой L , представляющей собой одномерное множество R^1 , определяется как перпендикуляр, опущенный из точки P на прямую L . Мерой близости служит длина перпендикуляра

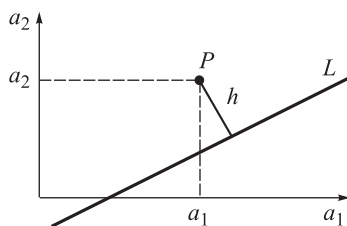


Рис. 4. Геометрическая интерпретация оценки близости модельного расчетного нагружения реальным нагрузкам в пространстве R^2

$$h = \sqrt{\frac{|\Gamma([\delta], \{P\})|}{|\Gamma([\delta])|}}. \quad (2)$$

Здесь $\Gamma([\delta], \{P\})$ и $\Gamma([\delta])$ — матрицы Грама:

$$\Gamma([\delta], \{P\}) = \begin{bmatrix} (\{\delta_1\}, \{\delta_1\}) & (\{\delta_1\}, \{\delta_2\}) & \dots & (\{\delta_1\}, \{\delta_n\}) & (\{\delta_1\}, \{P\}) \\ (\{\delta_2\}, \{\delta_1\}) & (\{\delta_2\}, \{\delta_2\}) & \dots & (\{\delta_2\}, \{\delta_n\}) & (\{\delta_2\}, \{P\}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (\{\delta_n\}, \{\delta_1\}) & (\{\delta_n\}, \{\delta_2\}) & \dots & (\{\delta_n\}, \{\delta_n\}) & (\{\delta_n\}, \{P\}) \\ (\{\delta_1\}, \{P\}) & (\{\delta_2\}, \{P\}) & \dots & (\{\delta_n\}, \{P\}) & (\{P\}, \{P\}) \end{bmatrix};$$

$$\Gamma([\delta]) = [\delta][\delta]^T.$$

Тогда условие

$$\frac{h}{\Delta a} < \varepsilon \quad (3)$$

(где ε — задаваемая точность измерений) характеризует соответствие расчетной и фактической моделей нагружения.

Если результат измерения удовлетворяет условию (3), можно сделать вывод о том, что расчетная модель и набор контролируемых нагружений с заданной точностью соответствуют реальному состоянию объекта мониторинга, а значения дополнительных сил пренебрежимо малы. В противном случае следует повторить процедуру приема расширения пространства параметров идентификации.

Определение НДС конструкции по измеренным перемещениям. Разделим степени свободы системы на внутренние (o -set) и внешние (a -set) степени свободы интерфейса [11], тогда:

$$\begin{Bmatrix} F_o \\ F_a \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{oo} & K_{ao} \\ K_{ao}^T & K_{aa} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_o \\ a_a \end{Bmatrix}, \quad (4)$$

где $\{F\}$ — вектор обобщенных сил; $[K]$ — матрица жесткости; $\{a\}$ — вектор обобщенных перемещений.

Первая строка субматриц определяет соотношение $F_o = K_{oo}a_o + K_{ao}a_a$ и позволяет вычислить перемещения внутренних степеней свободы по заданным перемещениям и силам в узлах интерфейса [12]:

$$\{a_o\} = [K_{oo}]^{-1} [K_{oa}] \{a_a\} + [K_{oo}]^{-1} \{F_o\}.$$

Вектор обобщенных сил

$$\{F\} = \sum_{i=1}^n \{F_i\} \pi_i,$$

где $\{\pi\} = \{a\}[\delta]^{-1}$ — восстановленный вектор масштабных коэффициентов для нормированных нагрузок.

Зная перемещения в узлах конечного элемента, можно найти компоненты тензора напряжений:

$$\{\sigma\} = [D][B]\{a\},$$

где $\{\sigma\}$ — псевдовектор напряжений; $[D]$ — матрица физических констант; $[B]$ — матрица функций формы деформаций.

Решение тестовых задач. Рассмотрим предложенную методику на примере тестовой модели нагружения конструкции, состоящей из поверхности А и двух стоек Б. На конструкцию действуют следующие виды нагружения: рав-

номерное давление p (рис. 5, а), кинематическое смещение w стоек (рис. 5, б), а также сосредоточенная сила F в точке В (рис. 5, в). В качестве возможных значений нагрузки используем $p = 300$ Па, $w = 0,003$ м, $F = 1$ Н.

Основные характеристики пластины

Толщина, м	0,05
Модуль Юнга, Па	$2 \cdot 10^{11}$
Коэффициент Пуассона	0,3
Плотность материала, кг/м ³	7 800

Предположим, что в качестве параметров идентификации можно использовать только

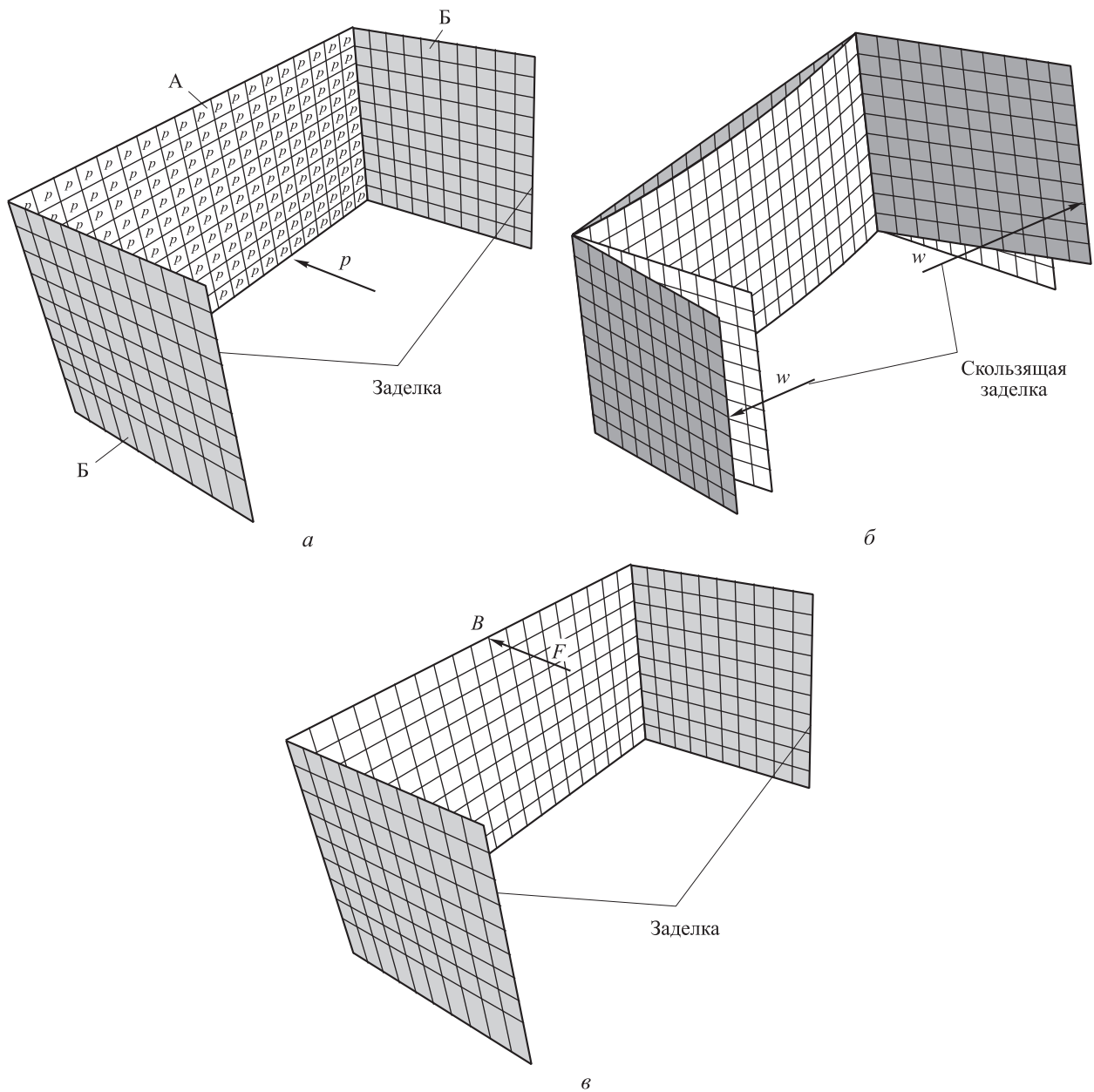


Рис. 5. Общий вид тестовой модели: а — равномерное давление; б — кинематическое смещение стоек; в — верификационное нагружение

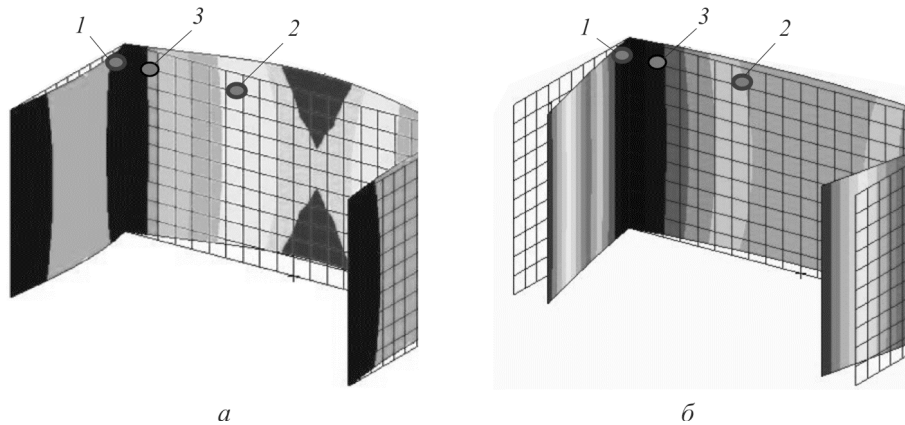


Рис. 6. Прогибы тестовой модели, вызванные действием равномерного давления (а) и кинематическим смещением стоек (б)

перемещения точек, принадлежащих поверхности А (см. рис. 5, а).

Определим, согласно изложенной методике, два параметра идентификации: прогибы в точках 1 и 2 (рис. 6). Сначала используем полномасштабную модель при действии полного набора нагрузений ($p = 0,1$ МПа, $w = 5$ мм, $F = 20$ Н). В этом случае значения прогибов в точках 1 и 2, а также в точке 3, о которой будет сказано далее, составят $w_1 = 1,52$ мм, $w_2 = 0,89$ мм и $w_3 = 0,63$ мм.

Затем определим прогибы в этих точках, используя редуцированную модель 2×2 , при действии двух наборов нагружения: $[p] = 300$ Па, $[w] = 3$ мм (см. рис. 6).

Матрица $[\delta]$ для данного набора степеней свободы представлена в таблице.

Модули собственных значений матрицы откликов равны 2,25 и 0,147 мм. Принимая $[\beta] = 1$, заключаем, что действующая нагрузка идентифицируема, поскольку выполняется условие (1):

$$\left| \frac{\Delta a_{\max}}{\lambda_{\min}} \right| = 0,68 < [\beta] = 1.$$

Используя результаты измерений, найдем значения масштабных коэффициентов

$$\begin{Bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \end{Bmatrix} = [\delta]^{-1} \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{Bmatrix}$$

и определим действующее нагружение:

$$p = \pi_1 [p] = 283 \text{ Па}; \quad w = \pi_2 [w] = 2,2 \text{ мм}.$$

Матрица откликов $[\delta]$

Вид нагружения	a_1 , мм	a_2 , мм
Равномерное давление	-1,27	-0,0585
Кинематическое смещение	-1,896	-1,131

Действие третьего нагружения не учтено, поэтому восстановленные значения нагрузок отличаются от истинных. Поскольку истинные нагружения неизвестны, необходимо провести оценку точности расчета. Для этого воспользуемся приемом расширения пространства измерений. В качестве дополнительного параметра идентификации возьмем прогиб в точке 3. Выполним необходимые вычисления для проверки соотношения (3). Вычисленные матрицы Грама имеют следующий вид:

$$\Gamma([\delta]) = \begin{bmatrix} 5,22 \cdot 10^{-3} & 2,9 \cdot 10^{-3} \\ 2,9 \cdot 10^{-3} & 1,62 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix};$$

$$\Gamma([\delta], \{P\}) = \begin{bmatrix} 5,22 \cdot 10^{-3} & 2,89 \cdot 10^{-3} & -3,62 \cdot 10^{-2} \\ 6,84 \cdot 10^{-4} & 1,62 \cdot 10^{-3} & -1,23 \cdot 10^{-2} \\ -3,62 \cdot 10^{-2} & -1,23 \cdot 10^{-2} & 3,1 \cdot 10^{-1} \end{bmatrix}.$$

Подставляя значения определителей матриц Грама в формулу (2), находим значение h . Затем проверяем соотношение (3) при $\varepsilon = 1$:

$$\frac{h}{\Delta a} = 154 > \varepsilon = 1.$$

Как отмечалось ранее, параметр ε имеет смысл точности измерений линейного размера, в данном случае прогибов в точках 1, 2 и 3. Таким образом, на основе теста (3) можно сделать вывод о действии дополнительного нагружения. Используя редуцированную модель $[\delta']$ (3×3), включающую нагружение F, найдем масштабные коэффициенты нормированных наборов нагружения

$$\begin{Bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \end{Bmatrix} = [\delta']^{-1} \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{Bmatrix}$$

и определим действующее нагружение:

$$p = \pi_1[p] = 100 \text{ Па}; \quad w = \pi_2[w] = 5 \text{ мм};$$

$$F = \pi_3[F] = 20 \text{ Н},$$

которое совпадает с истинным.

При необходимости тест (3) можно повторить для четырех параметров идентификации. Дальнейшее увеличение числа параметров можно продолжать до выполнения условия (3).

Выводы

1. Изложен подход, позволяющий проводить оценку напряженно-деформированного состояния конструкции при ограниченном числе

параметров идентификации, представляющих собой результаты измерения обобщенных перемещений в удобных для этого точках конструкции.

2. Разработан алгоритм выбора и предложен критерий назначения параметров идентификации, которые позволяют восстанавливать априори неизвестные по значению действующие на конструкцию нагрузки с минимальной погрешностью.

3. Предложена процедура восстановления на основе измеренных перемещений реального напряженно-деформированного состояния конструкции, позволяющая в необходимых случаях идентифицировать изменение используемого набора нагружения.

Литература

- [1] Зайцев Е.А., Мещихин И.А. Мониторинг прочности металлоконструкций запорных СГТС. *Речной транспорт (XXI век)*, 2011, № 4, с. 70–74.
- [2] *MSC Nastran 2013.1. DMAP Programmer's Guide*–M. MSC, 2013. 1732 с.
- [3] Гаврюшин С.С., Барышникова О.О., Борискин О.Ф. *Численный анализ элементов конструкций приборов и машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 479 с.
- [4] Мещихин И.А., Сахненко М.А., Сосенушкин Е.Н. Применение метода внешних суперэлементов и ОТМ-матриц при мониторинге состояний шлюзовых затворов. *Речной транспорт (XXI век)*, 2013, № 5, с. 52–55.
- [5] Геча В.Я., Канунникова Е.А., Мещихин И.А., Бордадымов В.Е., Даниловский Н.Н. Создание редуцированных матриц жесткостей и масс для совместного анализа нагрузок. *Тр. НИИ ВНИИЭМ. Вопросы электромеханики*, 2011, № 121, с. 27–30.
- [6] Миронов С.Б. *Использование языка PCL в среде MSC/Patran для создания специальных приложений*. Москва, MSC, 1999. 64 с.
- [7] Гусев Н.Н. *Методология создания и эксплуатации информационной системы мониторинга безопасности зданий и сооружений опасных производственных объектов и гидротехнических сооружений*. Дис. д-ра техн. наук, Санкт-Петербург, 2008. 185 с.
- [8] Гантмахер Ф.Р. *Теория матриц*, Москва, Наука, 1988. 552 с.
- [9] Statnikov R.B., Gavriushin S.S., Dang M.H., Statnikov A.R. Multicriteria Design of Composite Pressure Vessels. *International Journal of Multicriteria Decision Making*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 252–278.
- [10] *MSC Nastran 2013.1. Superelements User's Guide*–M. MSC, 2013. 956 с.
- [11] Канунникова Е.А., Мещихин И.А. Применение суперэлементов в прочностных расчетах космических аппаратов. *Тр. НИИ ВНИИЭМ. Вопросы электромеханики*, 2011, № 121, с. 31–34.
- [12] *Patran 2013. PCL and Customization*–M. MSC, 2013. 1010 с.

References

- [1] Zaitsev E.A., Meshchikhin I.A. Monitoring prochnosti metallokonstruktsii zapornykh SGTS [Monitoring the strength of steel structures locking SGTS]. *Rechnoi transport (XXI vek)* [River transport (XXI century)]. 2011, no. 4, pp. 70–74.
- [2] *MSC Nastran 2013.1. DMAP Programmer's Guide*–M. MSC, 2013. 1732 p.
- [3] Gavriushin S.S., Baryshnikova O.O., Boriskin O.F. *Chislennyi analiz elementov konstruktsii priborov i mashin* [Numerical analysis of structural elements of devices and machines]. Moscow, Bauman Press, 2014. 479 p.

- [4] Meshchikhin I.A., Sakhnenko M.A., Sosenushkin E.N. Primenenie metoda vneshnikh super-elementov i OTM-matrits pri monitoringe sostoianii shliuzovykh zatvorov [Application of external superelement and OTM-matrices for monitoring states sluice gates]. *Rechnoi transport (XXI vek)* [River transport (XXI century)]. 2013, no. 5. pp. 52–55.
- [5] Gecha V.Ia., Kanunnikova E.A., Meshchikhin I.A., Bordadymov V.E., Danilovskii N.N. Sozdanie redutsirovannykh matrits zhestkosti i mass dlia sovmestnogo analiza nagruzok [Creating the reduced stiffness and mass matrices for the joint analysis of loads]. *Voprosy elektromekhaniki* [Questions Electromechanics]. 2011, no. 121, pp. 27–30.
- [6] Mironov S.B. *Ispol'zovanie iazyka PCL v srede MSC/Patran dlia sozdaniia spetsial'nykh prilozhenii* [Using the PCL language among MSC/Patran for special applications]. Moscow, MSC publ., 1999. 64 p.
- [7] Gusev N.N. *Metodologiya sozdaniia i ekspluatatsii informatsionnoi sistemy monitoringa bezopasnosti zdaniy i sooruzhenii opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov i gidrotekhnicheskikh sooruzhenii*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Methodology for the creation and operation of an information system for monitoring the safety of buildings and structures of hazardous industrial facilities and waterworks. Dr. tech. sci. diss.]. Sankt-Peterburg, 2008. 185 p.
- [8] Gantmakher F.R. *Teoriya matrits* [Matrix Theory]. Moscow, Nauka publ., 1988. 552 p.
- [9] Statnikov R.B., Gavriushin S.S., Dang M.H., Statnikov A.R. Multicriteria Design of Composite Pressure Vessels. *International Journal of Multicriteria Decision Making*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 252–278.
- [10] *MSC Nastran 2013.1. Superelements User's Guide*–M. MSC, 2013. 956 p.
- [11] Kanunnikova E.A., Meshchikhin I.A. Primenenie super-elementov v prochnostnykh raschetakh kosmicheskikh apparatov [Applying superelements in sc parts strength calculations]. *Voprosy elektromekhaniki* [Questions Electromechanics]. 2011, no. 121, pp. 31–34.
- [12] *Patran 2013. PCL and Customization*–M. MSC, 2013. 1010 p.

Статья поступила в редакцию 23.06.2015

Информация об авторах

МЕЩИХИН Илья Александрович (Москва) — младший научный сотрудник ИНЭУМ им. И.С. Брука (119334, Москва, Российская Федерация, Вавилова ул., д. 24, e-mail: mefict@mail.ru).

ГАВРЮШИН Сергей Сергеевич (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: gss@bmstu.ru).

ЗАЙЦЕВ Евгений Анатольевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика и компьютерные технологии». Московская государственная академия водного транспорта (117105, Москва, Российская Федерация, Новоданиловская наб., д. 2, корп. 1).

Information about the authors

MESHCHIKHIN Iliya Aleksandrovich (Moscow) — Junior Research Scientist. Bruk Institute of Electronic Controlling Machines (119334, Moscow, Russian Federation, Vavilov St., Bldg. 24, e-mail: mefict@mail.ru).

GAVRIUSHIN Sergey Sergeevich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Head of the Department, Computer Systems of Production Automation. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: gss@bmstu.ru).

ZAITSEV Evgeny Anatolievich (Moscow) — Candidate of Science, Associate Professor, Department of Information and Computer Technologies. Moscow State Academy of Water Transport (117105, Moscow, Russian Federation, Novodanilovskaya Nab., Bldg. 2, Block 1).