

УДК 626.422.23

Методы и приемы компактизации при решении задач мониторинга сложных конструкций

Мещихин И. А.^{1,*}, Гаврюшин С. С.²,
Зайцев Е. А.³

¹Институт Электронных Управляющих Машин имени И.С. Брука,
Москва, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

³Московская Государственная Академия Водного Транспорта,
Москва, Россия

В настоящее время особенно актуальна задача организации систем мониторинга сложных пространственных сооружений. Классическим представителем данного класса сооружений являются гидрозапорные сооружения, в частности шлюзовые затворы. Данный класс сооружений особенно интересен тем, что к системам мониторинга их эксплуатационного состояния предъявляются достаточно жесткие требования, обусловленные работой объекта мониторинга. В представленной статье представлена методика выбора оптимального, с точки зрения идентификации текущего нагружения, количества точек измерения и их взаимного расположения. Предложен подход, позволяющий восстанавливать по замеренным перемещениям действующие напряжения и определять элементы конструкции, жёсткость которых отлична от проектной. Материал статьи изложен на тестовых примерах и представлен результат выбора точек измерения для шлюзового затвора №7 канала имени Москвы.

Ключевые слова: мониторинг прочности, матрицы восстановления, редукция, метод суперэлементов, метод конечных элементов, гидросооружения

Введение

Методы и приемы компактизации при решении задач мониторинга сложных конструкций

При высокой стоимости реконструкции элементов контракции с одной стороны и риска внештатной работы объекта мониторинга с другой возникает острая необходимость в оперативном определении и оценке текущих эксплуатационных характеристик шлюзовых затворов для принятия рационального решения о возможности дальнейшей эксплуатации.

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

- ограниченный набор данных о состоянии конструкции;
- необходимость осуществить оперативную оценку.

Применение редуцированной модели объекта мониторинга является естественным компромиссом между сохранением максимума информации о жесткости элементов конструкции и обеспечения ее компактного размера.

Для принятия рационального решения о годности конструкции к эксплуатации в текущий момент необходима система мониторинга состояния, при помощи которой возможна оперативная регистрация факта достижения предельного состояния. В рамках текущей задачи под таковым подразумевается превышение максимальных напряжений предела текучести.

Для регистрации факта достижения предельного состояния необходимо фиксировать набор переменных состояния конструкции. Учитывая длительные сроки эксплуатации, значительные габариты сооружения и ее сложность организации надежной работы датчиков в условиях водно-воздушной среды наиболее предпочтительным является дистанционная регистрация прогибов конструкции.

В качестве отдельной задачи выступает определение таких мест в конструкции, измерения перемещений в которых наиболее эффективно, а также определение их необходимого количества.

Также весьма важными является комплекс вопросов связанных с интерпретацией полученных данных. В данной работе предлагается подход, который позволяет определять максимальные напряжения в конструкции по замеренным перемещениям.

При диагностике напряженного состояния пространственных конструкций непосредственная регистрация напряженного состояния которых затруднительна, одним из путей организации мониторинга состояния является регистрация косвенной величины, величина которого характеризует комплекс действующих сил.

Разрабатываемая процедура мониторинга с одной стороны должна быть как можно более простой и удобной для практического применения, а с другой позволять оценивать текущее напряженное состояние и области отклонения фактической жёсткости от проектной.

Для определения напряженного состояния предлагается дистанционно замерять прогибы (величины порядка 10 мм с точностью 0.1 мм) и по их величине определять действующие напряжения.

За счет измерения прогибов в избыточном (с точки зрения идентификации текущей комбинации расчетных случаев) количестве точек существует возможность определять факт действия либо неучтенных при моделировании комплекса сил, либо отклонения жёсткости конструкции от проектной. В данной работе предлагается производить параллельно две оценки, на основе которых дается как оценка сверху по действующим

напряжениям, так и выделяются элементы конструкции, жёсткость которых отлична от ожидаемой.

Возможность оперативного определения состояния конструкции возможна во многом за счет использования принципа суперпозиции, который актуален для линейных моделей. Здесь и далее предполагается возможность аппроксимации работы конструкции линейной моделью при диагностируемом диапазоне нагрузок.

Разобьем решаемый объем задач на две группы:

- выбор точек, замеры прогибов в которых позволяют минимизировать доверительный диапазон оценки максимальных напряжений;
- определение по замеренным перемещениям действующих нагрузок и соответствующим им напряжений.

Выбор точек измерения

Предъявим измеряемой величине ряд требований:

1. Отклик в измеряемых точке должен быть максимальным (для возможности диагностировать наименьшее значение действующих нагрузок);
2. Отклики конструкции на воздействия должны быть близки к линейно независимым (для возможности отличать действия различных нгружений).

Данным требованиям удовлетворяет такой выбор точек измерения, который соответствует максимуму детерминанта, составленного из компонент перемещений при действии n независимо действующих нагрузок (см. рисунок 1).

Очевидно, что если действующий комплекс нагрузок можно представить как сумму n независимо действующих, то для их идентификации необходимо не менее n точек измерения.



Рисунок 1 - Целевая функция при выборе точек измерения.

Следовательно, зная перемещения U и матрицу A можно определить вектор действующих нагрузок f . Причем если предположить что $f = A^{-1}U + A^{-1}\zeta$, где $|\zeta| \leq \zeta_{\max}$ - погрешность измерения, то при фиксированном f минимальное влияние погрешности измерения будет достигаться при таком выборе точек измерения, при которых A^{-1} будет минимальным. При том оценка погрешности определения действующих сил можно представить в виде $\zeta_{\max} \sqrt{n}$, где n - количество независимо действующих нагружений.

Данная задача сводится к последовательному перебору всех возможных сочетаний точек измерения и поиска максимума детерминанта матрицы A . Несмотря на значительный объем вычислений данная задача успешно распараллеливается, что позволяет оперативно решать задачи данного класса.

Стоит отметить, что анализу подлежат не всё множество точек конструкции, а лишь те, которые заведомо пригодны для измерения (в данном случае дистанционного замера прогибов таким условием является наличие прямой видимости с позиции установки дальномера).

Также при наличии ранжированного по значимости набора действующих факторов предлагается сначала найти точки оптимальные для идентификации первых двух факторов, а затем последовательно добавлять по точке для каждого последующего нагружения.

По выбранным точкам предлагается определить действующие нагрузки. Зная нагрузки при помощи матриц восстановления определить действующие напряжения.

Также предъявленный набор точек измерения прогибов должен позволять не только диагностировать текущее напряженное состояние конструкции, в случае если фактический комплекс нагружений соответствует расчетному, но и идентифицировать наличие неучтенного в расчете фактора нагружения и диагностировать возможное отклонение расчетной модели от реальной модели. Под отклонением расчетной модели от реальной понимается изменение матрицы жесткости конструкции в процессе наблюдений. Стоит отметить, что рассматриваемый подход не предусматривает задание дополнительно действующих сил для целей идентификации компонент матрицы жесткости. Суждение о соответствии матрицы жесткости производится на основе анализа отклика конструкции на действующую комбинацию основной нагрузки и эксплуатационных факторов.

Идентификация неучтенного в расчете фактора нагружения возможно лишь при расширении пространства измерения сверх минимально необходимого.

При размерности пространства измерений большей количества независимо действующих нагрузок возможно оценить расстояние между фактически измеренными перемещениями и расчетным множеством значений измерений (см. рисунок 2).

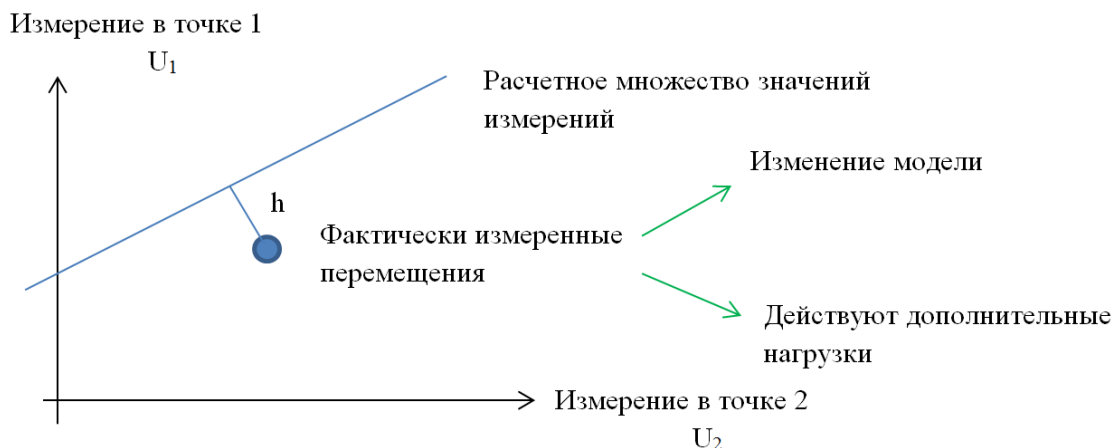


Рисунок 2 - оценка достоверности выбранных факторов нагружения и расчетной модели

Полученное отклонение h можно интерпретировать как комбинацию изменения конструкции и действия дополнительных сил. Рассмотрим сначала последовательно каждую из представленных интерпретаций отклонения h .

Предположим что существующее отклонение вызвано действием неучтенной силы. Стоит отметить, что для оценки напряжений в конструкции необходимо знать действующий комплекс сил. По замеренному отклонению h возможно лишь диагностировать факт действия неучтенного нарушения, но нельзя вынести точное суждение в его распределении по конструкции (редукция правой части при конденсировании осуществляется за счет умножения на прямоугольную матрицу, обратная к которой не существует). Тем не менее, можно дать оценку сверху. Найдем комплекс точек, которые удовлетворяют следующим требованиям:

1. При приложении сосредоточенной силы в данной точке в конструкции развивается максимум напряжений.
2. Комплекс откликов конструкции на действие дополнительных сил близок к линейно независимому.

Для определения наиболее чувствительной к воздействию единичной силы степени свободы достаточно найти максимальный элемент матрицы GD :

$$\sigma = GU = GK^{-1}F = GDF ,$$

где σ - компоненты тензора напряжений i -того узла, G - матрица трансформации (MES), K - матрица жёсткости, D - матрица податливости.

Процесс поиска расположения дополнительных точек представляет собой последовательные вычисления. Процесс останавливается тогда, когда:

$$1. \frac{\|A_{i+q}\|}{\|A_{i+q-1}\|} \approx \frac{\left\| \prod_{j=1}^{i+q} \lambda_j \right\|}{\left\| \prod_{j=1}^{i+q-1} \lambda_j \right\|} = \|\lambda_q\| \leq \zeta ;$$

$$2. \frac{\max(GD)_i}{\max(GD)_1} \leq \xi.$$

Последовательность $\|\lambda_q\| \frac{\max(GD)_q}{\max(GD)_1}$ сходится, сопоставляя конструкции две

точечные системы:

- 1) Множество изолированных степеней свободы, действие сосредоточенных сил в которых соответствуют максимуму напряжений;
- 2) Множество точек, в которых наиболее эффективно производить измерения.

Интерпретируя результаты измерений в $i + q$ точках как действие основной нагрузки в совокупности с откликом на набор сосредоточенных сил возможно дать оценку сверху на действующие в конструкции напряжения.

Определив $[A]_{i_x(q+i)}$ и измерив вектор перемещений U , разделим его на вектор, лежащий

в плоскости оператора A и ортогональный ему n .

Тогда

$$\|n\| = \sqrt{\frac{\Gamma(A_i, U)}{\Gamma(A_i)}},$$

где $\Gamma(A_i) = AA^T$, $\Gamma(A_i, U) = \left\| \begin{pmatrix} (A_1, A_1) & \dots & (A_1, A_m) & (A_1, U) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ (A_1, A_m) & \dots & (A_m, A_m) & (A_m, U) \\ (A_1, U) & \dots & (A_m, U) & (U, U) \end{pmatrix} \right\|$ - матрицы Грама. Тогда

отношение $K = \frac{\|n\|}{\|U\|}$ характеризует степень соответствия расчетной модели нагружения и фактической.

Предположим что отклонение h вызвано изменением жёсткости конструкции.

Тогда задача сводится к оценке коэффициентов матрицы податливости K по замеренным перемещениям при известной правой части, т.е.:

$$f = Ku$$

При этом измерения производится в m степенях свободы из l и оценке подлежат не все элементы матрицы податливости.

Так как искомыми величинами является компоненты матрицы жёсткости перенумеруем их в компоненты вектора k . Тогда:

$$\begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix} = Bk, B = \begin{bmatrix} U_1 & \dots & U_n & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & U_1 & \dots & U_n \\ & & 1 & -1 & & \\ \vdots & & & & & \vdots \end{bmatrix}.$$

Первые n условий следуют из исходного уравнения, вторые $\frac{m(m-1)}{2}$ - условия симметрии коэффициентов матрицы податливости.

Разделим матрицу на два блока:

$$B_{\frac{m(m+1)}{2} \times \frac{m(m+1)}{2}}^{oo}, B_{\frac{m(m+1)}{2} \times l}^{ob}.$$

Тогда

$$k_o' B^{oo} + k_b' B^{ob} = f, k_o' = (B^{oo})^{-1} f - (B^{oo})^{-1} B^{ob} k_b'$$

Оценим элементы k_b' из условия минимума отклонения коэффициентов g' и g по методу наименьших квадратов:

$$\sum (k_i - k_i')^2 = \min;$$

$$\sum_{i=1}^{\frac{m(m+1)}{2}} \left(k_i + \sum_{k=1}^{\frac{m(m+1)}{2}} \left((B^{oo})^{-1} B^{ob} \right)_{k,j} k_k' - \sum_{k=1}^{\frac{m(m+1)}{2}} (B^{oo})_{k,j}^{-1} f_k \right) \left((B^{oo})^{-1} B^{ob} \right)_{i,j} + \sum_{i=1+\frac{m(m+1)}{2}}^l (k_i - k_i') = 0.$$

Которое в компактной форме можно представить как:

$$Ck' = v, k' = vC^{-1},$$

где $C =$
$$\begin{bmatrix} B'_{1,j} \left(\sum_{k=1}^{\frac{m(m+1)}{2}} B'_{k,j} \right) + 1 & \left(\sum_{k=1}^{\frac{m(m+1)}{2}} B'_{k,j} \right) + 1 & \dots \\ & B'_{2,j} \left(\sum_{k=1}^{\frac{m(m+1)}{2}} B'_{k,j} \right) + 1 & \\ & & \dots \\ & & & B'_{l-\frac{m(m+1)}{2},j} \left(\sum_{k=1}^{\frac{m(m+1)}{2}} B'_{k,j} \right) + 1 \end{bmatrix};$$

$v = B'k_o + (B^{oo})^{-1} B'f + Ek_b$, где E - единичная матрица;

$$B' = (B^{oo})^{-1} B^{ob}.$$

Зная оценку k' построим матрицу податливости K' и определим разницу значений матриц K и K' . По виду данной матрицы можно вынести суждения о том, в каких элементах конструкции произошло изменение жёсткости.

Стоит отметить, что в контексте данной задачи правая часть известна с точностью до n параметров и представима в виде:

$$F = \sum_{i=1}^n \alpha_i F_i.$$

Тогда множество решений уравнения $Ck' = v(F_1, \dots, F_n)$ образуют плоскость с базисом $(F_1, F_1 - F_2)$ (См. рисунок 3). Оптимальной оценкой g' будет проекция g на данную плоскость, которая равна:

$$k'(C, g) = \begin{bmatrix} (C_1, C_1) & \dots & (C_1, C_m) & (C_1, k) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ (C_1, C_m) & \dots & (C_m, C_m) & (C_m, k) \\ (C_m, k) & \dots & (C_m, k) & (k, k) \end{bmatrix}.$$

Представленный подход особенно актуален при работе с редуцированной матрицей жёсткости. При этом в качестве узлов редукции выступают ключевые точки для выделения элементов конструкции и множество степеней свободы, в которых производится измерение.

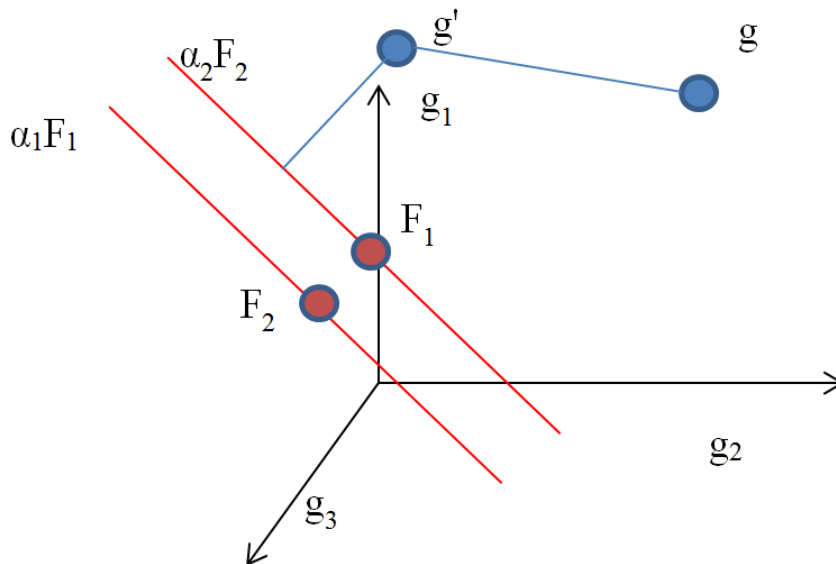


Рисунок 3 - оценка g'

Определение по замеренным перемещениям действующих нагрузок и соответствующим им напряжений.

Представим связь компонентов тензора напряжений элементе i с действующими нагрузками в виде $\sigma_i = \Psi_i f$. Тогда существует такой элемент, максимуму напряжений в котором соответствует некоторый телесный угол в пространстве нагрузок.

Множеству элементов, максимуму напряжений в которых соответствует все пространство нагрузок можно сопоставить набор Ψ_i . Тогда задача определения

максимальных напряжений по данным замеренных перемещений решается в виде

$$\sigma = \max_i (\psi_i A^{-1} U)_{ecv}$$

Таким образом, задача определения максимальных напряжений в конструкции по данным мониторинга сводится к определению набора Ψ_i и геометрического места точек оптимальных для измерения.

Для решения поставленных задач необходимо определить форму прогиба и картину напряженного состояния при действии единичных нагрузок. В случае если при действии единичных нагрузок максимальные напряжения развиваются в одном элементе задача определения набора Ψ_i тривиальна. В противном случае требуется построить в постпроцессоре набор различных сочетаний отклика конструкции от единичных нагрузок и определить множество элементов, в которых достигается максимум напряжений.

Решение тестовых задач

Далее рассмотрен тестовый пример, на котором продемонстрирован предлагаемый подход.

В качестве такового рассмотрена пластина П-образной формы под действие двух видов нагрузок:

- действие давления (рисунок 2б);
- перемещение стоек (рисунок 2а).

В качестве верификационного нагружения выступает действие сосредоточенной силы в центре пластины.

Все виды нагружений имеют схожую картину прогибов.

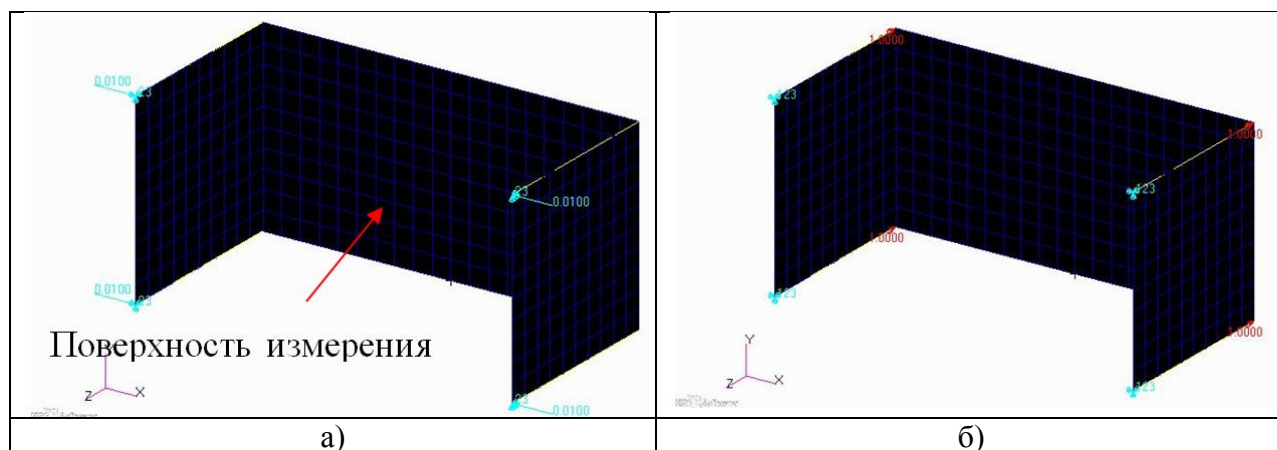
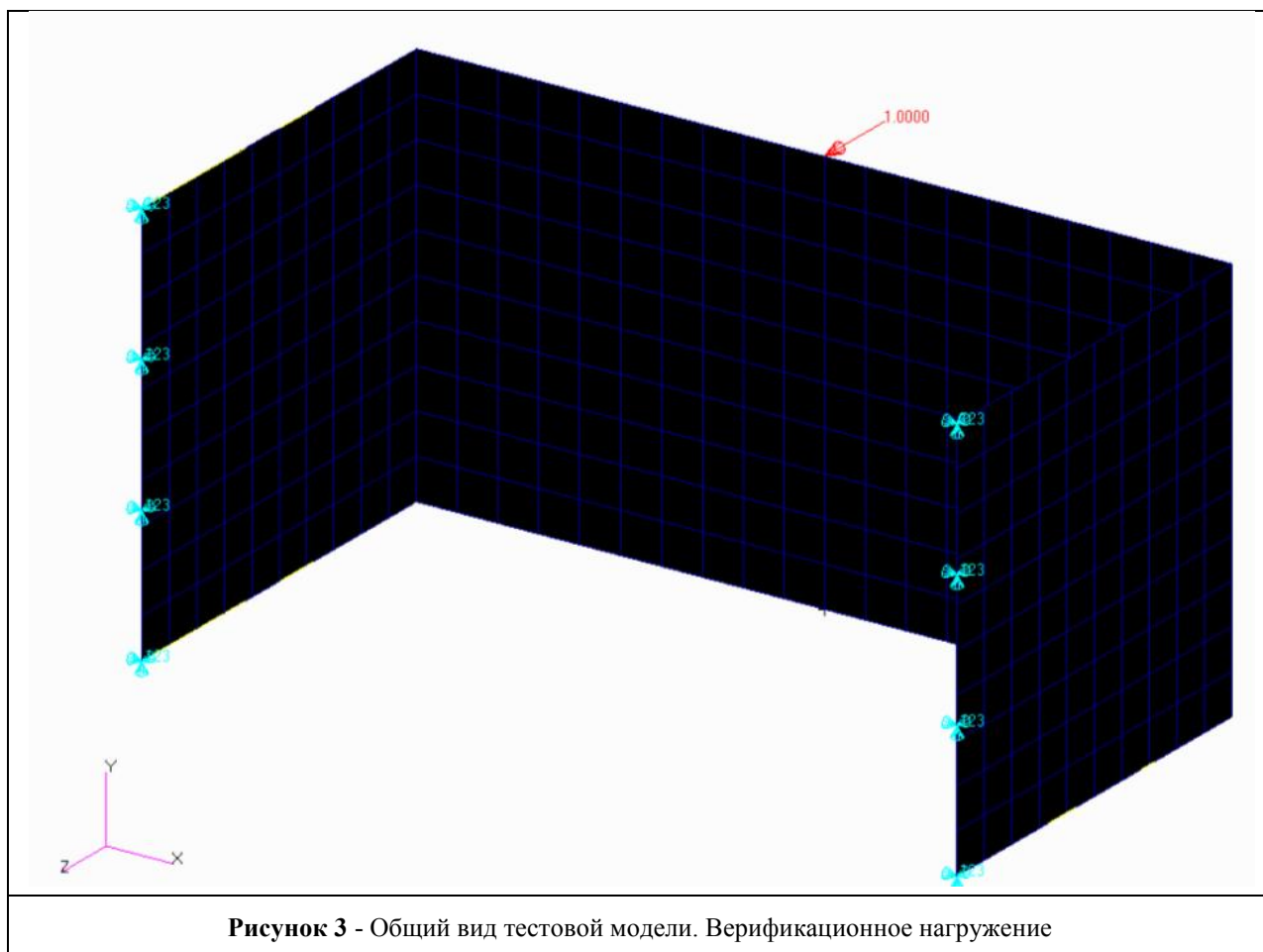


Рисунок 2 - Общий вид тестовой модели. Основные виды нагружения



Основные характеристики модели представлены в таблице 1

Таблица 1 - характеристики материала

Толщина, м	Модуль Юнга, Па	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м ³
0.05	2E11	0.3	7800

После определения формы прогибов под действием набора факторов импортируем их в matlab с целью дальнейшей обработки. Стоит отметить что, как правило, нет возможности произвести замер прогибов в каждой точке конструкции (ввиду особенностей расположения либо условий эксплуатации)

В данном случае импорту подлежат формы лишь тех точек, которые могут выступать в качестве кандидатов на измерение (см. на рисунок 2).

На рисунке 1 представлены формы прогибов и набор точек наилучшим образом подходящих для измерения.

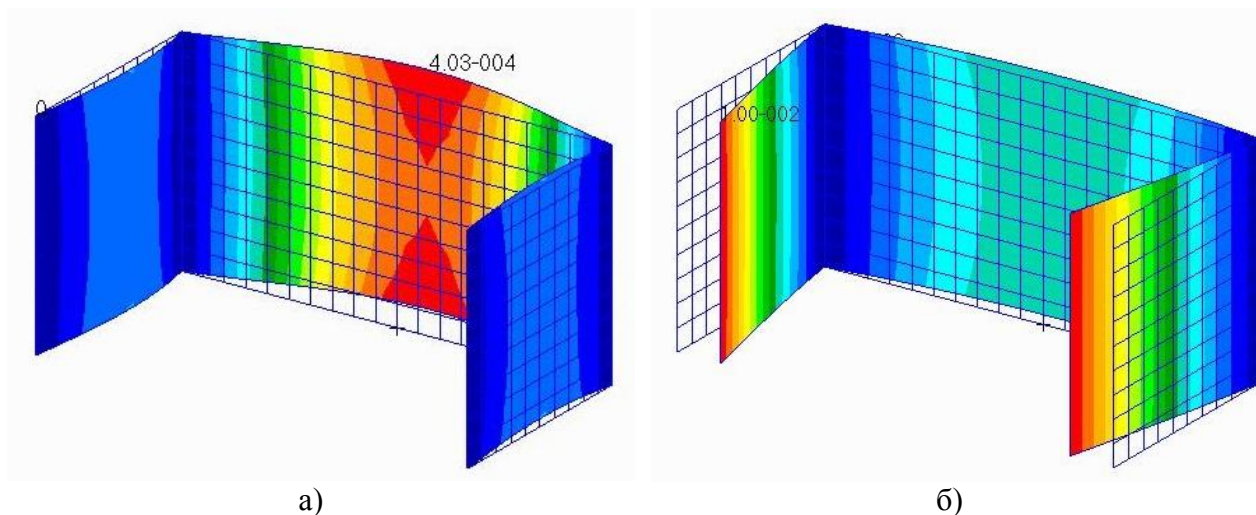


Рисунок 4 - Прогибы тестовой модели под действием: а- действие перепада давления; б - подвижка опор.

Стоит добавить, что под прогибом понимается проекция вектора перемещений на некоторое фиксированное направление. В условиях данной задачи предполагается, что такое измерение возможно.

Матрица А для данного набора точек представлена в таблице 3.

Таблица 3 - матрица А

	Точка 1	Точка 2
Подвижка опор	-0,00194	-1,40E-04
Действие давления	-0,00398	-4,00E-04

Модуль собственных значений данной матрицы составляют 0.0044 и 0.000184 м/Н., т.е. при произвольном сочетании единичных нагрузок норма вектора в пространстве измерений будет лежать в диапазоне (0.000184 - 0.0044) м. Причем согласно рассуждениям в начале статьи нижняя грань будет максимальной из всех возможных сочетаний геометрических мест точек измерений. Действующая нагрузка идентифицируема если $\|\lambda\| > \zeta$, где ζ - погрешность измерения, причем отношение $\frac{\|\lambda\|}{\zeta}$ - суть отношение сигнал/шум.

Соответственно при $\zeta \leq 0.0001$ м минимальное значение масштабного фактора действующих нагрузок составляет 0.544.

Предположим, что конструкция находится в условиях нештатной эксплуатации, которая характеризуется действием дополнительных сил.

Исходя из вышесказанного, определим набор дополнительных сосредоточенных сил из условия максимума напряжений и соответствующие им формы прогибов. Отношение

$\frac{\|A_{i+q}\|}{\|A_{i+q-1}\|}$ для первого набора (дополнительные формы 1, 2, 10) составляет $4.84 \cdot 10^{-16}$, что

существенно меньше ζ . Дальнейшее увеличение точек измерения не приведет к улучшению оценки $K = \frac{\|n\|}{\|U\|}$

Таким образом, для определения соответствия расчетных нагрузок фактическим необходимо произвести замеры в 5 точках, расположение которых представлено на рисунке 3

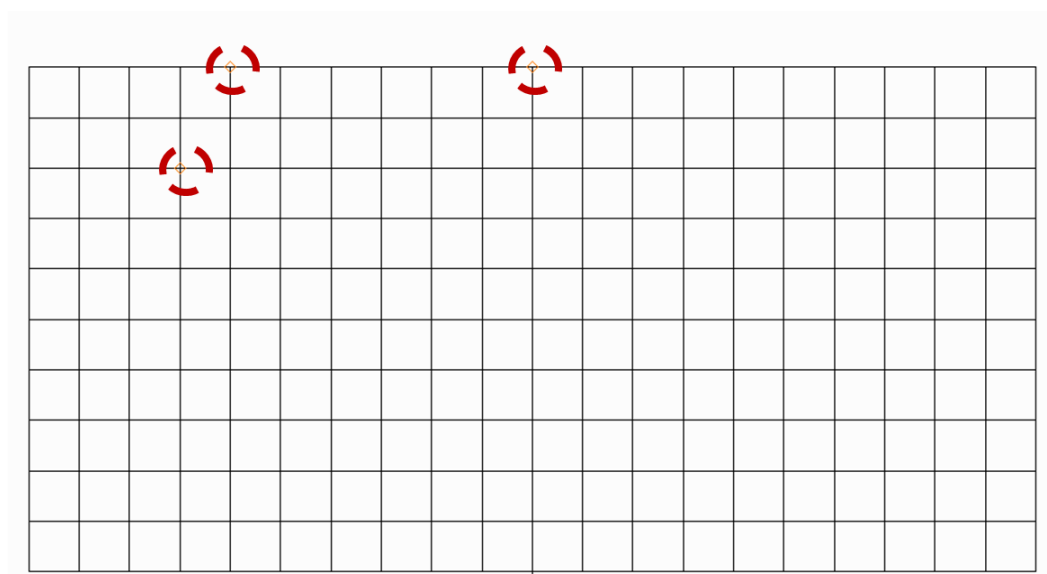
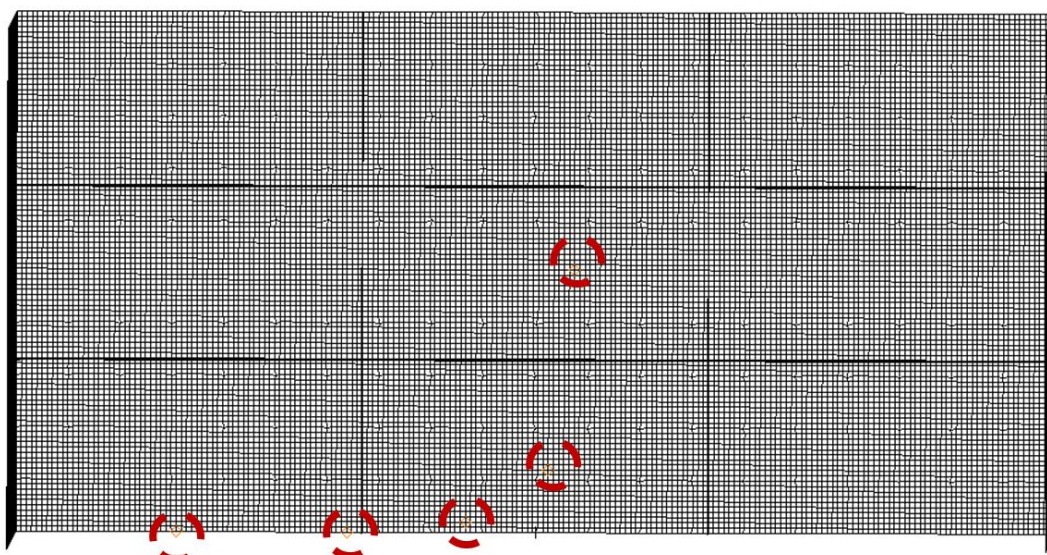
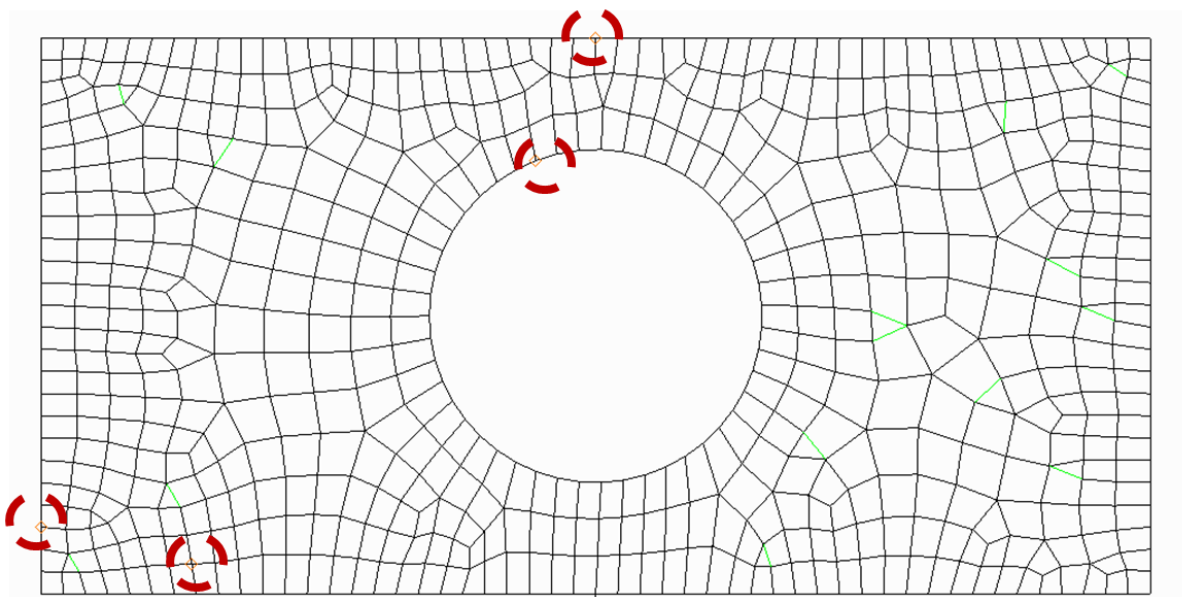


Рисунок 5 - Расположение точек измерений

*-стоит отметить, что учитывая симметрию относительно осей X и Y, существуют еще 4 эквивалентных наборов точек измерения.





Из представленного выше видно, что для определения соответствия расчетного нагружения фактическому для исходной конструкций необходимо 3 точки. При добавлении ребер жесткости - 5 точек, а для конструкции с отверстием 4 точки.

Верифицируем полученную модель для исходной конструкции.

Для данных целей определим детерминант матрицы Грама U' исходного базиса $A_{5 \times 2}$ и расширенного n измеренным для верификационного расчетного случая $A'_{5 \times 3}$ (матрицы n, U' представлены в таблицах 4, 5 соответственно)

Таблица 4 - матрица Грама (n)

3,46E-05	3,06E-06	-3,08E-07
3,06E-06	2,76E-07	-2,99E-08
-3,08E-07	-2,99E-08	4,92E-09

Таблица 5 - матрица Грама (U')

3,46E-05	3,06E-06
3,06E-06	2,76E-07

$$K = \sqrt{\frac{\|n\|}{\|U\|}}, \text{ верификационный расчетный случай возможно идентифицировать } (K > \zeta$$

) при значении действующей силы 10.8 Н.

Описание конструкции

Конструкция шлюзового затвора нагружена шестиметровым напором воды и силой собственного веса. Затвор является сварной конструкцией из 12 и 15 мм листового металла марки М16С. Толщина листов щита затвора и его ребер жесткости 12 мм., толщина листов сектора затвора - 15 мм.

На рисунке 1 представлен общий вид конструкции затвора и его модели.

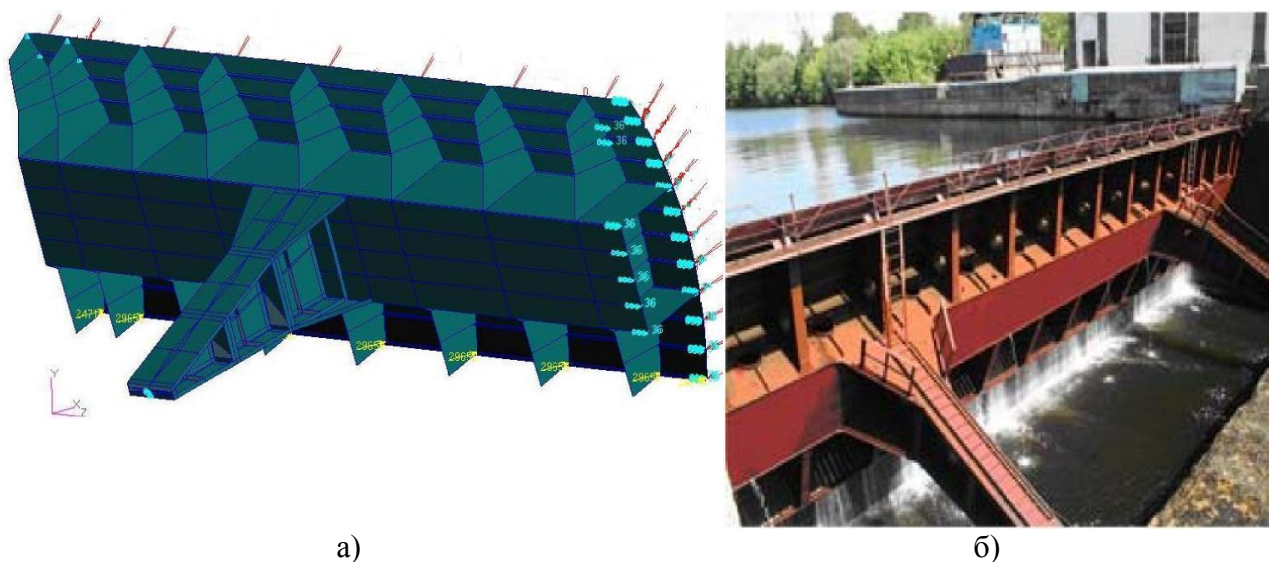


Рисунок 1 - общий вид конструкции затвора и его модели

Результат расчета для шлюзового затвора

После определения точек для измерения необходимо разработать модель, которая позволяет по замеренным перемещениям восстанавливать действующие максимальные напряжения. На данный момент практически во всех расчетных программах существует функционал, позволяющий выполнять данную операцию. Ниже представлено краткое описание процедуры редукции матрицы жесткости, в ходе которой возможно экспортировать матрицу восстановления. Стоит отметить, что обычно метод суперэлементов и матрицы восстановления (ОТМ) применяется при анализе совместного нагружения сборок большой размерности. В данной работе предлагается применить данный подход к другой проблеме - мониторинг НДС гидросооружений. Учитывая значительный опыт применения данного подхода к решению задач не только статики, но и динамики (метод Крейга-Бемптона и пр.) [1,2] можно заключить о возможности разработки методики определения НДС конструкции не только при действии описанных нагрузок, но и при произвольном нагружении.

Предварительный анализ работы шлюзового затвора [3] показал о сильном влиянии возможных подвижек подшипника и перекоса щита затвора на напряженное состояние

конструкции. Геометрическое место точек, оптимальных для идентификации действующих нагрузок представлено на рисунке 6.

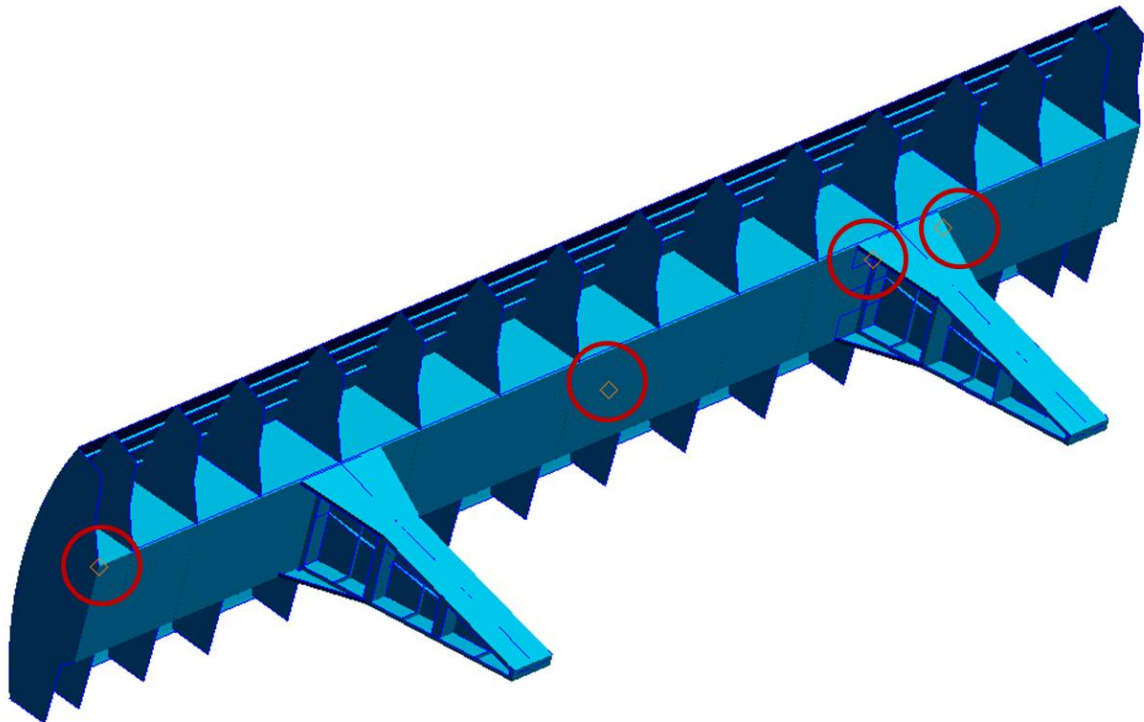


Рисунок 6 -точки измерения прогибов

Так как действие данных эксплуатационных факторов возможно выразить в виде перемещения некоторого набора точек, что можно применить следующий подход:

Разделим степеней свободы системы на внутренние (o-set) и внешние (степени свободы интерфейса a-set). Тогда исходная системы уравнений представляется в следующем виде:

$$K_{aa} = G_{fa}^T K_{ff} G_{fa}$$

Рассмотрим метод статической конденсации:

$$\begin{bmatrix} P_o \\ P_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{oo} & K_{oa} \\ K_{ao} & K_{aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_o \\ U_a \end{bmatrix}$$

Схожая процедура актуальная и для матрицы масс.

Первая строка (субматриц) определяет соотношение:

$$P_o = K_{oo}U_o + K_{oa}U_a$$

И позволяет определить перемещения внутренних степеней свободы по заданным перемещениям и силам в узлах интерфейса:

$$U_o = -K_{oo}^{-1}K_{oa}U_a + K_{oo}^{-1}P_o$$

В случае если к внутренним степеням не приложены силы, перемещения в них определяются следующим образом:

$$U_o = -K_{oo}^{-1}K_{oa}U_a$$

При этом полный набор перемещений в всех степенях свободы определяется как:

$$U_f = \begin{bmatrix} U_o \\ U_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_{oo}^{-1}K_{oa} \\ I \end{bmatrix} U_a,$$

где матрица трансформации при конденсации представляется как:

$$G_{faGuyan} = \begin{bmatrix} -K_{oo}^{-1}K_{oa} \\ I \end{bmatrix}$$

Построим матрицу масс для восстановления перемещений в точках замера (B) и матрицу восстановления напряжений в окрестности экстремумов при действии возможных сочетаний эксплуатационных факторов (A).

Тогда зависимость наибольших напряжений от перемещений в точках измерения будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \cdot \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = AB^+ \begin{Bmatrix} x_1 \\ \cdot \\ x_n \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \sigma^p_{xx} \\ \cdot \\ \sigma^p_{xy} \end{Bmatrix},$$

где $\begin{Bmatrix} \sigma^p_{xx} \\ \cdot \\ \sigma^p_{xy} \end{Bmatrix}$ - компоненты тензора напряжений группы элементов при действии

гидростатического давления, B^+ - псевдообратная [4] матрице B , $\begin{Bmatrix} x_1 \\ \cdot \\ x_n \end{Bmatrix}$ - множество

замеренных перемещений x .

Стоит отметить, что множество решений x , соответствующие различным сочетанием действующих эксплуатационных факторов, представляет собой плоскость (Ω) в $\square^n$. В случае если вектор x не лежит в плоскости решений, то $B^+x = B^+x_\perp$, где $x_\perp$ - проекция x на Ω .

В качестве результата (AB^+) для данной задачи были получены две (число элементов в которых достигается максимум при различных сочетаниях) матриц размерности $(2*3)*4$. Где 4 - число точек измерения, 3 - ненулевые компоненты тензора напряжений (XX, YY, XY), 2 - стороны оболочки.

Результаты, полученные в рамках представленного подхода, актуальны лишь при наличии соответствия между расчетной моделью и объекта эксплуатации. Для подтверждения корректности используемой модели предлагается использовать изменение прогибов конструкции при опорожнении камеры шлюза.

Предположим, что весь комплекс эксплуатационных факторов при работе затвора под напором постоянен.

Тогда при опорожнении камеры шлюза переменна только величина гидростатического давления, которая легко определяется по разности уровней воды в шлюзе и верхнем бьефе. При опорожнении камеры шлюза центр давления меняет свое положение, что позволяет не только судить от отклонении жесткости конструкции от расчетной, но и локализовать области повышенного коррозионного износа.

При измерении прогиба конструкции во время опорожнения камеры шлюза полученные осредненные значения прогибов сравниваются с расчетной оценкой и определяется степень соответствия жёсткости наблюдаемого участка конструкции с расчетной. Условия постоянства прочих эксплуатационных факторов позволяет определить их суммарное воздействие в момент наполнения камеры шлюза (когда разница уровней в верхнем и нижнем бьефах равна нулю) и исключить их из замеренной зависимости прогиба от разности уровней в верхнем и нижнем бьефах. Для исключения динамической составляющей отклика конструкции необходимо взять скользящее среднее с интервалом, равным максимальному периоду собственных колебаний конструкции учетом присоединенных масс.

Выводы

1. Разработан подход, который позволяет определить возможность идентификации напряженного состояния конструкции по замеренным перемещениям в наборе точек и определять их необходимое количество;
2. Выбраны геометрическое место точек, оптимальных для идентификации нагружения конструкции;
3. Сформирована методика, которая позволяет на основе замеренных перемещений восстанавливать текущее напряженное состояние;
4. Предложен подход, который позволяет определять элементы, жесткость которых отлична от проектной непосредственно по результатам измерения в процессе эксплуатации.

Список литературы

1. Канунникова Е.А., Мещихин И.А. Применение суперэлементов в прочностных расчетах космических аппаратов // Вопросы электромеханики Труды НПП ВНИИЭМ. 2011. № 121. С. 31-34.
2. 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 // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. 2011. № 121. С. 27-30.
3. Зайцев Е. А., Мещихин И. А. Мониторинг прочности металлоконструкций запорных СГТС // Речной транспорт (XXI век). 2011. № 4. С. 70-74.

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. 52-56.
5. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 1988. С. 31-33.
6. Шатров А.В. Миронов С.Б. Использование языка PCL в среде MSC/Partan для создания специальных приложений. М.: MSC, 1999. 64 с.
7. MSC Nastran 2013.1. DMAP Programmer's Guide. М.: MSC, 2013. 1732 с.
8. MSC Nastran 2013.1. Superelements User's Guide. М.: MSC, 2013. 956 с.
9. Patran 2013. PCL and Customization. М.: MSC, 2013. 1010 с.
10. Гаврюшин С.С., Барышнекова О.О., Борискин О.Ф. Численный анализ элементов конструкций приборов и машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 479 с.
11. Доугерти К. Введение в эконометрику: пер. с англ. М.: ИНФРА-М, 1999. 402 с.
12. Гусев Н.Н. Методология создания и эксплуатации информационной системы мониторинга безопасности зданий и сооружений опасных производственных объектов и гидротехнических сооружений: дис. ... докт. техн. наук. СПб, 2008. 185 с.
13. Зайцев Е. А., Мещихин И. А. Численное моделирование методом конечных элементов с использованием информационных технологий: отчет о НИР / МГАВТ. М., 2011. 53 с.

Methods and Techniques for Solving Problems of Compaction Monitoring of Complex Structures

I.A. Meschikhin^{1,*}, S.S. Gavriushin²,
E.A. Zaitsev³

^{*}mefict@mail.ru

¹Institute of Electronic Control Machines n.a. I.S. Brook, Moscow, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³Moscow State Academy of Water Transport, Moscow, Russia

Keywords: monitoring the strength, matrix recovery, reduction, Superelements method, finite element method, hydroconstruction

Currently, organization of monitoring complex spatial structures is a particularly relevant task. A classical representative of this class of structures is hydraulic valve ones, in particular floodgates. This class of structures is of particular interest in the fact that systems for monitoring their operational state must meet rather strict requirements because of the monitoring object operation:

- structure operates at the air-water media junction;
- has long lifetime;
- has movable structural elements;
- has significantly different operating conditions within the navigation and inter-navigation period.

This paper offers to meet requirements through the remote design of deflection measurement (no sensors on the object for monitoring), and evaluate rapidly due to data processing, using reduced models and matrix recovery.

The paper presents a technique for selecting the optimum in terms of identifying the current load, the number of measurement points and their relative position. It suggests an approach that allows us to recover the active stresses by measured displacements and determine design elements, the stiffness of which is different from the project stiffness. With available model of design and active forces it is possible to determine a residual error of actual measurements and calculation results by measuring the displacement at the points the number of which exceeds the number of linearly independent loading. This residual error can be interpreted as a result of unsuspected active force or as a deviation of structure rigidity from the project one. This paper gives an upper estimate of stresses and defines possible places of stiffness degradation simultaneously using the same set data.

The presented material is based on the test cases and shows the results of choosing measurement points for the floodgate No 7 of Moscow Canal.

References

1. Kanunnikova E.A., Meshchikhin I.A. Applying superelements in SC parts strength calculations. *Voprosy elektromekhaniki Trudy NPP VNIIE*, 2011, no. 121, pp. 31-34. (in Russian).
2. Gecha V.Ya., Kanunnikova E.A., Meshchikhin I.A. Bordadymov V.E., Danilovskiy N.N. Creating toughness and mass reduced matrices for simultaneous analysis of loads. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy NPP VNIIE*, 2011, no. 121, pp. 27-30. (in Russian).
3. Zaytsev E. A., Meshchikhin I. A. The stress monitoring of rotary discharger. *Rechnoy transport (XXI vek) = River transport (XXIst century)*, 2011, no. 4, pp. 70-74. (in Russian).
4. Meshchikhin I.A., Sakhnenko M.A., Sosenushkin E.N. Using external super elements method and OTM-matrixes in monitoring condition of rotary valves. *Rechnoy transport (XXI vek) = River transport (XXIst century)*, 2013, no. 5, pp. 52-56. (in Russian).
5. Gantmakher F.R. *Teoriya matrits* [The Theory of Matrices]. Moscow, Nauka Publ., 1988, pp. 31-33. (in Russian).
6. Shatrov A.V. Mironov S.B. *Ispol'zovanie yazyka PCL v srede MSC/Partan dlya sozdaniya spetsial'nykh prilozheniy* [Using PCL (Patran Command Language) in MSC/Patran environment for special applications]. Moscow, MSC Publ., 1999. 64 p. (in Russian).
7. MSC Nastran 2013.1. DMAP Programmer's Guide. Moscow, MSC Publ., 2013. 1732 p.
8. MSC Nastran 2013.1. Superelements User's Guide. Moscow, MSC Publ., 2013. 956 p.
9. Patran 2013. PCL and Customization. Moscow, MSC Publ., 2013. 1010 p.
10. Gavryushin C.C., Baryshnekova O.O., Boriskin O.F. *Chislennyy analiz elementov konstruktsiy priborov i mashin* [Numerical analysis of structural elements of devices and machines]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 479 p. (in Russian).
11. Dougherty C. *Introduction to Econometrics*. Oxford University Press, 1992. (Russ. ed.: Dougherty C. *Vvedenie v ekonometriku*. Moscow, INFRA-M Publ., 1999. 402 p.).
12. Gusev N.N. *Metodologiya sozdaniya i ekspluatatsii informatsionnoy sistemy monitoringa bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy opasnykh proizvodstvennykh ob'ektov i gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. Dokt. dis.* [Methodology for the creation and operation of information system for monitoring the safety of buildings and constructions of hazardous industrial facilities and hydrotechnical constructions. Dr. diss.]. St. Petersburg, 2008. 185 p. (in Russian).
13. Zaytsev E. A., Meshchikhin I. A. *Chislennoe modelirovanie metodom konechnykh elementov s ispol'zovanie informatsionnykh tekhnologiy: otchet o NIR* [Numerical simulation based on the finite element method with the use of information technology: report on scientific research works]. Moscow, Moscow State Academy of Water Transport, 2011. 53 p. (in Russian).