УДК 658.58 **DOI:** *10.26731/1813-9108.2017.4(56).19-27*

С. Ю. Трутаев

АО «ИркутскНИИхиммаш», г. Иркутск, Российская Федерация
Дата поступления: *8 сентября 2017 г.*

ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА БОКСА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ МАКРОДЕФЕКТОВ ОБОРУДОВАНИЯ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. *На основе проведенного анализа отмечена актуальность применения экспрессных методов технического диагностирования в целях повышения качества оценки технического состояния промышленного оборудования предприятий нефтепереработки, химии и нефтехимии, нефте- и газодобычи. Определена возможность использования спектров собственных частот колебаний для нужд технической диагностики объектов машиностроения. Предложена расчетно-экспериментальная методология экспресс-диагностики макродефектов промышленного оборудования на основе мониторинга отклонений от «эталонного» спектра собственных частот колебаний объекта в процессе эксплуатации. Для этих целей предложено использовать метод конечных элементов в сочетании с методами оптимального проектирования конструкций. При этом минимизацию целевой функции предложено выполнять с использованием комплексного метода Бокса. Для улучшения сходимости процедуры поиска оптимального решения исходный алгоритм метода модифицирован в части учета явных ограничений за счет введения коэффициента «отскока». Экспериментальным путем определено оптимальное значение коэффициента «отскока», обеспечивающее максимальную скорость сходимости. Проведена апробация и верификация методологии на ряде тестовых задач, а также на различных образцах промышленного оборудования в стендовых условиях и действующих технологических установках АО «Ангарская нефтехимическая компания» и АО «Ангарский завод полимеров». Для иллюстрации продемонстрированы результаты стендового тестирования расчетно-экспериментальной методологии экспрессной диагностики макродефектов на примере модели трубопровода DN 25 (33,5×3,2). Показана возможность использования для экспериментального исследования собственных характеристик трубопровода шагового метода возбуждения колебаний (stepped sine excitation).*

Ключевые слова: *метод конечных элементов, спектр собственных частот, методы оптимального проектирования, минимизация, целевая функция, метод Бокса, мониторинг, граничные условия, макродефект.*

S. Yu. Trutaev

IrkutskNIIkhimmash JSC, Irkutsk, the Russian Federation
Received*: September 8, 2017*

APPLICATION OF THE MODIFIED BOX METHOD FOR IDENTIFYING THE EQUIPMENT MACRODEFECTS AT HAZARDOUS PRODUCTION FACILITIES

Abstract. *On the basis of a conducted analysis it was noted that it was relevant to apply rapid methods of technical diagnosis in order to improve the quality of technical state evaluation for industrial equipment of refinery, chemical, petrochemical, oil and gas extraction plants. It is possible to use the spectra of machinery facilities natural vibration frequencies for conducting their technical diagnosis. A calculating and experimental methodology for rapid diagnosis of industrial equipment macrodefects is suggested. It is based on the monitoring of deviations from the "reference" spectrum of natural vibration frequencies during the operation. For these purposes, it is suggested to use the finite element method in combination with the methods of optimal design of the constructions. However, it is suggested to minimize the target function with Box complex method. To improve convergence in finding the best solution, the original algorithm of the method has been modified to reflect explicit limitations by introducing a bounce factor. The best value of the bounce factor, which provides the highest rate of convergence, is determined by experimental means. The methodology has been tested and verified using a number of test tasks, as well as using various industrial equipment during the bench testing and using the operating process units of JSC "Angarsk petrochemical company" and JSC "Angarsk polymer plant". For illustration, the results of the bench testing of the calculating and experimental diagnostic methodology of macrodefects are shown with the example of the DN 25 pipeline model (33.5×3.2). It is shown that stepped sine excitation method can be used for the experimental investigation of the pipeline's own characteristics.*

Keywords: *a finite element method, a spectrum of natural frequencies, optimal design methods, a minimization, a target function, the Box method, monitoring, boundary conditions, a macrodefect.*

Введение

Используемые сегодня при техническом диагностировании промышленного оборудования традиционные методы неразрушающего контроля (ультразвуковой, магнитный, вихретоковый и др.) в общем позволяют решить задачу оценки технического состояния оборудования, однако, в силу выборочности (дискретности) такого контроля, его конечный результат напрямую зависит от квалификации эксперта, определяющего места расположения точек для контроля и осуществляющего выбор методов дефектоскопии. При этом в ряде случаев даже полное соблюдение рекомендаций нормативных документов, например требований

© С. Ю. Трутаев, 2017

[1], не гарантирует достоверность оценок технического состояния объекта, базирующихся на результатах такой диагностики. С учетом изложенного для повышения качества оценки технического состояния оборудования целесообразным является применение различных техник экспрессного контроля дефектов, позволяющих быстро выполнить контроль исследуемого объекта на предмет идентификации «проблемных» зон, чтобы в дальнейшем соответствующим образом скорректировать программу обследования традиционными методами НК. К таким методам, в частности, можно отнести метод магнитной памяти металла (МПМ) [2-5], метод акустической эмиссии [6-8], метод акустической импульсной рефлектометрии (АИР) [9, 10] и др.

Одним из перспективных методов, позволяющим выполнить экспрессную оценку технического состояния оборудования, является метод, использующий в своей основе собственные характеристики исследуемого объекта [11, 12]. В настоящее время такие методы успешно применяются, например, для контроля колесных пар на железнодорожном транспорте [13], оценки состояния лопаток турбин и компрессоров [14], диагностики конструкций зданий [15] и т. д.

Методология диагностирования дефектов промышленного оборудования по «эталонному» спектру собственных частот

Многолетний опыт АО «ИркутскНИИхиммаш» по обеспечению промышленной безопасности технологического оборудования предприятий нефтепереработки, химии и нефтехимии, нефте- и газодобычи, а также специальные лабораторные исследования [16] позволили предложить универсальную методологию экспрессной диагностики технического состояния оборудования, базирующейся на использовании современных численных методов и методов оптимального проектирования конструкций. Методология может применяться в рамках технологии расчетно-экспериментальной оценки технического состояния оборудования опасных производственных объектов, регламентированной в [17], а также при осуществлении мониторинга состояния оборудования согласно [18].

Методология основана на мониторинге отклонений от «эталонного» спектра собственных частот колебаний объекта в процессе эксплуатации и включает в себя процедуры:

а) автоматической коррекции граничных условий математической модели для обеспечения соответствия «эталонному» спектру собственных частот;

б) идентификации местоположения и размеров макродефектов в оборудовании.

В общем случае указанные задачи могут быть сформулированы по аналогии с формулировкой задач оптимального проектирования конструкций (ОПК) в виде задачи оптимизации: найти вектор переменных проектирования

$$\{x(x_1,...,x_i)\},\ i=1,\,2,...,\,m. \qquad (1)$$

доставляющий минимальное значение целевой функции

$$F(x)\to\min \qquad (2)$$

при явных ограничениях на вектор переменных проектирования

$$l_i \le x_i \le u_i \text{ при } i=1,2,...,\,m. \qquad (3)$$

В выражениях (1)-(3) приняты следующие обозначения:

m – число переменных проектирования;

l_i, u_i – ограничения на диапазон изменения i-й переменной проектирования снизу и сверху соответственно.

В качестве целевой функции удобно использовать сумму квадратов невязок между заданным вектором собственных частот $\{f^*\}$ и вектором собственных частот $f_j^*(x)$, соответствующим вектору $\{X(x_1,...,x_i)\}_j$ на j-м шаге оптимизации:

$$F(x)=\{\{f^*\}-\{f_j^*(x)\}\}^T\{\{f^*\}-f_j^*(x)\}. \qquad (4)$$

В качестве переменных проектирования $x_1,...,x_i$ для процедуры типа а) выступают граничные условия математической модели, для процедуры типа б) – координаты местоположения дефекта, его размеры (глубина, площадь) и др.

Решение поставленной задачи оптимизации в общем может быть выполнено с использованием одного из методов математического программирования, предназначенных для поиска глобального экстремума функции многих переменных [19-22]. В разработанном в АО «ИркутскНИИхиммаш» ПО «COMPASS» [23] для указных целей применяется комплексный метод Бокса [24]. При этом метод модифицирован в части учета явных ограничений для обеспечения наилучшей сходимости решения.

В частности, в классическом методе [24] при выходе узлов комплекса за границы, определенные вектором ограничений, производится возврат узла в область допустимых значений путем назначения ему координаты, равной координате границы диапазона $\pm10^{-6}$. Проведенные исследования показали, что использование фиксированной константы для возврата узлов комплекса в область допустимых значений является неэффективным

приемом, замедляющим процесс сходимости решения. В этой связи было предложено использовать так называемый коэффициент «отскока», определяющий глубину возврата узла комплекса в % от диапазона допустимых значений. При этом экспериментально установлено, что оптимальным значением коэффициента «отскока» для класса рассматриваемых задач является величина, принимаемая на уровне 25 % от диапазона изменения переменных проектирования (рис. 1).

Модифицированный алгоритм комплексного метода Бокса

Итоговый алгоритм применения модифицированного комплексного метода Бокса с учетом использования коэффициента «отскока» выглядит следующим образом:

1. Формируется начальный комплекс с числом узлов, равным $n = 2m$, где m – число переменных проектирования. Координаты каждого узла назначаются с учетом удовлетворения ограничениям на диапазон изменения переменных проектирования (3). В общем случае они могут быть получены по формуле:

$$x_{ij} = l_i + r(u_i - l_i),\ j = 1, 2, ..., n,\ i = 1, 2, ..., m, \quad (5)$$

где r – псевдослучайная равномерно распределенная переменная в интервале (0, 1).

2. В каждом узле комплекса вычисляется значение целевой функции и осуществляется упорядочивание узлов по возрастанию ее величины:

$$F(\{x\}_1) \le ... \le F(\{x\}_j),\ j = 1, 2, ..., n \quad (6)$$

3. Вычисляется центр тяжести всех узлов комплекса, за исключением узла n, соответствующего наибольшему значению целевой функции $F(\{x\}_n)$:

$$x_i^* = \sum_{k=1}^{n-1} \frac{x_{ik}}{(n-1)},\quad j = 1, 2, ..., n \quad (7)$$

4. Вычисляются координаты отраженного через центр тяжести «наихудшего» узла комплекса с коэффициентом отражения $\alpha > 1$:

$$x_i^r = x_i^* - \alpha(x_n - x_i^*),\quad j = 1, 2, ..., n. \quad (8)$$

5. Вычисляется целевая функция для центра тяжести $F(\{x\}^*)$.

6. Выполняется проверка на допустимость отраженного узла:

– если не выполняются ограничения на l_i, $i = 1, 2, ..., m$, то:

$$x_i^r = l_i + \Delta(u_i - l_i),\ i = 1, 2, ..., m; \quad (9)$$

– если не выполняются ограничения на u_i, $i = 1, 2, ..., m$, то:

$$x_i^r = u_i - \Delta(u_i - l_i),\ i = 1, 2, ..., m, \quad (10)$$

При этом коэффициент «отскока» принимается равным $\Delta = 0{,}25$.

7. Вычисляется значение целевой функции для отраженного узла $F(\{x\}^r)$.

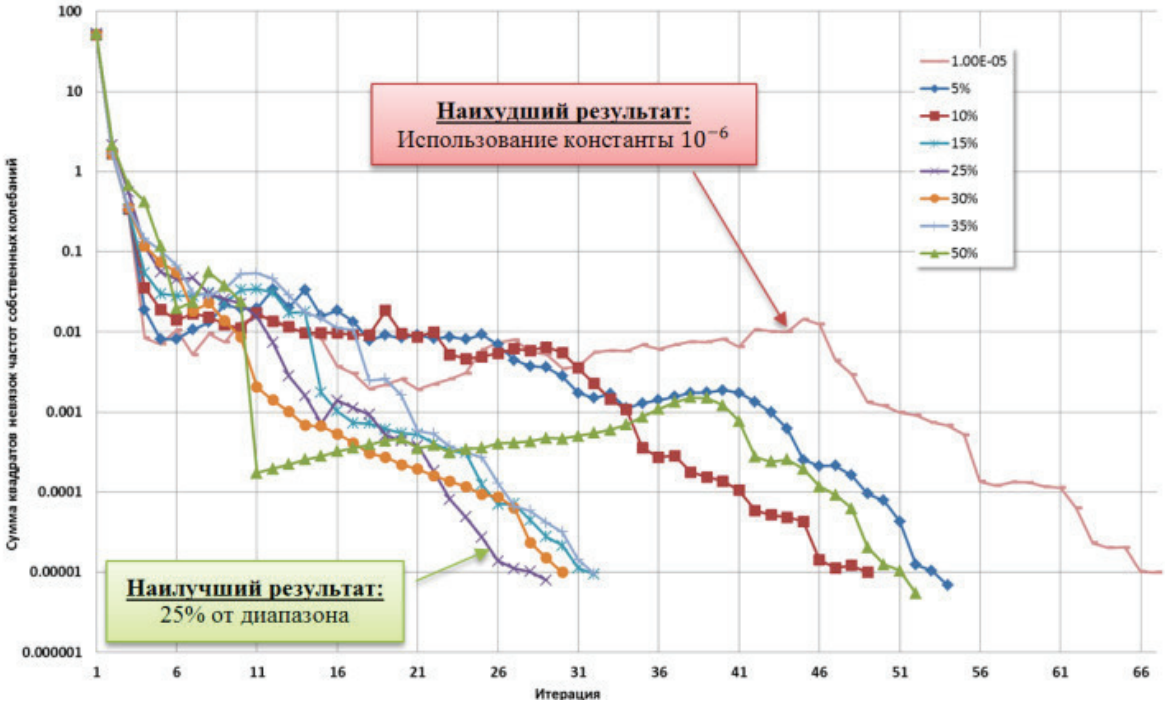

Рис. 1. Определение оптимального значения коэффициента «отскока»

8. Выполняется проверка на улучшение отраженного узла:

– если $F(\{x\}^r) \geq F(\{x\}_n)$, то отраженный узел перемещается в узел с координатами:

$$x_i^{r'} = \frac{x_i^r + x_i^*}{2},\ i = 1,2,...,m \qquad (11)$$

а процесс возвращается к шагу № 6;

– если $F(\{x\}^r) < F(\{x\}_n)$, то «наихудший» узел с координатами $\{x\}_n$ заменяется узлом с координатами $\{x\}^r$, после чего полученный комплекс вновь упорядочивается по (6) в соответствии со значениями целевой функции.

9. Выполняется проверка сходимости процесса, например по условию:

$$\left(\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(F(\{x\}_k) - F(\{x\}^*))^2\right)^{0,5} \leq \xi, \qquad (12)$$

где ξ – достаточно малое число, например $\xi = 10^{-6}$.

Если требуемая точность не достигнута, то процесс возвращается на этап № 2.

В случае многоэкстремальной целевой функции процедура минимизации может «застрять» в одном из локальных минимумов, что приведет к получению ложных результатов. В этом случае целесообразным является введение в алгоритм дополнительных проверок, обеспечивающих поиск глобального экстремума. Так, например, после шага 5 может быть введен дополнительный шаг 5`, целью которого является проверка целевой функции на выпуклость [25]:

$$F(\{x\}^*) < F(\{x\}_{n-1}). \qquad (13)$$

При удовлетворении условию (13) выполняется переход к следующему шагу 6. В противном случае выполняется замена центра тяжести на «наилучшую» точку комплекса $\{x\}^* = \{x\}_1$.

Для ускорения процесса сходимости процедуры поиска предусмотрено также предварительное «грубое» исследование целевой функции методом случайного поиска (Монте-Карло) [26], по результатам которого начальный комплекс размещается не случайным образом по (5), а в окрестности найденного экстремума.

Пример использования метода Бокса для идентификации дефектов трубопроводов

Ниже продемонстрированы результаты стендового тестирования расчетно-экспериментальной методологии экспресс-диагностики макродефектов на примере модели трубопровода DN 25 (33,5×3,2) (рис. 2).

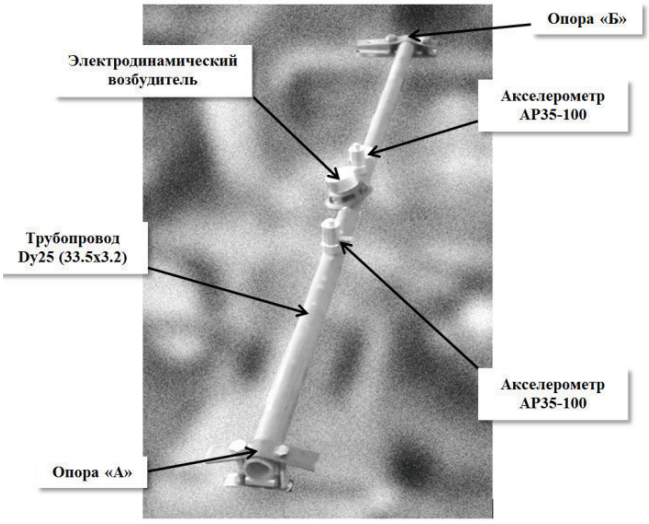

Рис. 2. Экспериментальный трубопровод DN 25 (33,5×3,2)

Для экспериментального исследования собственных характеристик трубопровода использовался шаговый метод возбуждения колебаний (stepped sine excitation) [27]. Для этих целей применялся аппаратно-программный комплекс, включающий в себя электродинамический возбудитель, цифровой генератор синусоидального сигнала, набор пьезоэлектрических акселерометров, усилитель датчиков, многоканальный сборщик данных на базе портативного компьютера со специализированным ПО, а также синхронный детектор.

Расчетная модель трубопровода выполнялась с использованием прямолинейных стержневых конечных элементов ПО «COMPASS» [23]. Граничные условия накладывались на крайние узлы модели и в начальном приближении соответствовали «шарнирно-неподвижному» опиранию трубопровода. При этом расчетный вектор собственных частот составил:

$$\{f\} = \{38,18 \quad 157,74 \quad 344,11\}^T. \qquad (14)$$

Экспериментально определенный спектр собственных частот трубопровода (рис. 3) показал, что математическая модель трубопровода требует коррекции граничных условий по вектору:

$$\{f\} = \{46,97 \quad 172,39 \quad 358,08\}^T. \qquad (15)$$

Для достижения этой цели на угловые степени свободы крайних узлов модели были дополнительно наложены упругие связи, параметры которых были приняты в качестве переменных проектирования (1). Для поиска экстремального значения целевой функции (4) и соответствующего ему сочетания граничных условий был использован модифицированный комплексный метод Бокса. В результате работы алгоритма автоматической коррекции граничных условий был определен вектор переменных проектирования (значения жест-

костей упругих связей, наложенных по угловым степеням свободы опорных узлов модели), обеспечивающий минимальное отклонение расчетного спектра собственных частот от экспериментального спектра.

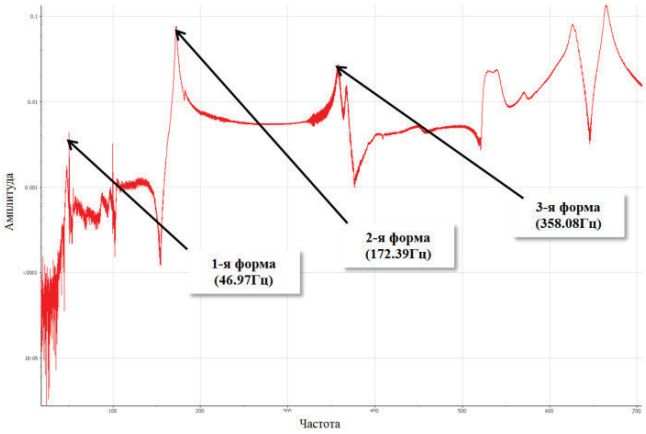

Рис. 3. Экспериментально определенный спектр собственных частот

Процедура минимизации при значении критерия завершения $\xi = 10^{-6}$ и коэффициенте «отскока» $\Delta = 25\,\%$ сошлась за 23-й итерации, что проиллюстрировано на рис. 4. Дополнительно на рисунке показана поверхность, иллюстрирующая изменение целевой функции во всем диапазоне изменения варьируемых граничных условий. Для ее построения был использован метод прямого сканирования по сетке [26].

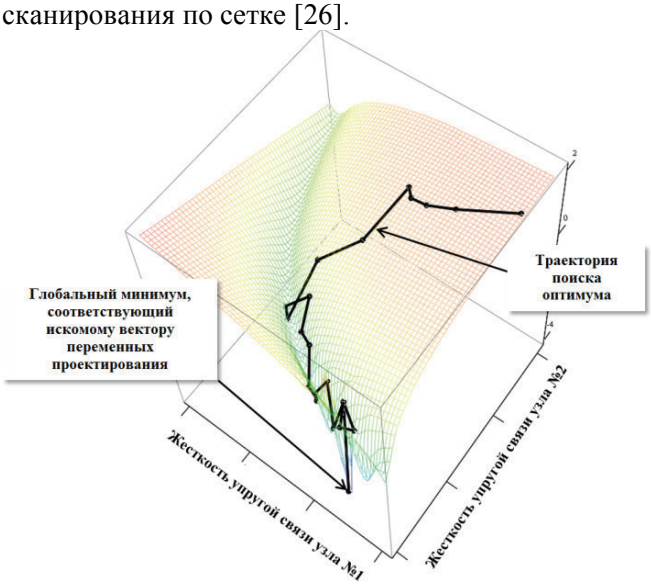

Рис. 4. Результат работы алгоритма минимизации по идентификации граничных условий модели трубопровода

Полученные в ходе решения задачи минимизации значения жесткостей опорных связей были введены в математическую модель, после чего уже корректная модель была использована для верификации методологии идентификации местоположения и размеров дефектов.

Дефект тип «потеря сечения» моделировался посредством локального утонения стенки трубопровода с использованием углошлифовальной машинки на расстоянии 800 мм от опоры (рис. 5). При этом глубина дефекта составила 80 % от толщины стенки.

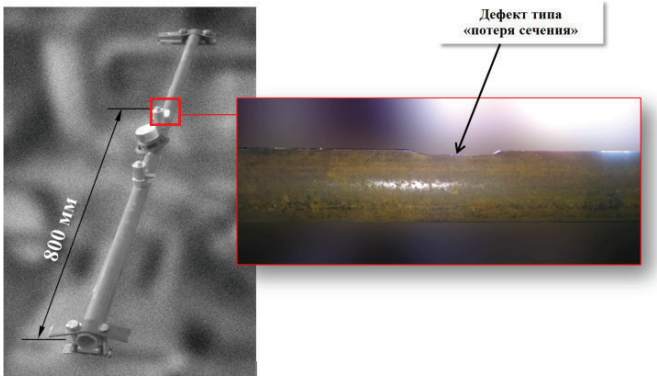

Рис. 5. Модельный дефект типа «потеря сечения»

Анализ экспериментально определенного спектра собственных частот для «дефектного» состояния трубопровода показал существенное его изменение по сравнению со спектром, характерным для бездефектного состояния (рис. 6).

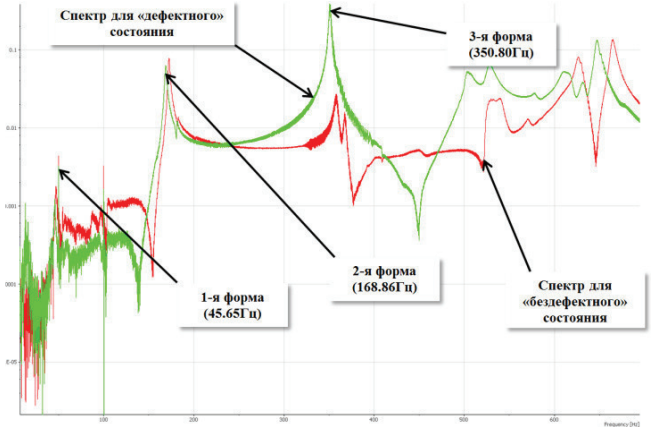

Рис. 6. Сравнение спектров для «дефектного» и «бездефектного» состояния модельного трубопровода

При этом вектор собственных частот, участвующий в процедуре идентификации, составил:

$$\{f\} = \{46{,}97 \quad 172{,}39 \quad 358{,}08\}^T. \qquad (16)$$

В качестве переменных проектирования для идентификации местоположения и оценки размеров дефекта был принят вектор размерностью $m = 2$:

$$\{x\} = \{a \quad b\}^T, \qquad (17)$$

где a – расстояние от предполагаемого дефекта до опоры;

b – толщина стенки трубопровода в зоне дефекта.

Целевая функция принималась по (4).

Решение задачи выполнялось в автоматическом режиме с использованием модифицированного метода Бокса. При этом был использован коэффициент «отскока», равный 25 % от диапазона изменения переменных. Для наглядной иллюстрации процесса поиска дефекта в модельном трубопроводе, наряду с использованием модифицированного метода Бокса, был применен также метод прямого сканирования по сетке [26], позволивший получить значения целевой функции (4) во всем диапазоне изменения переменных проектирования.

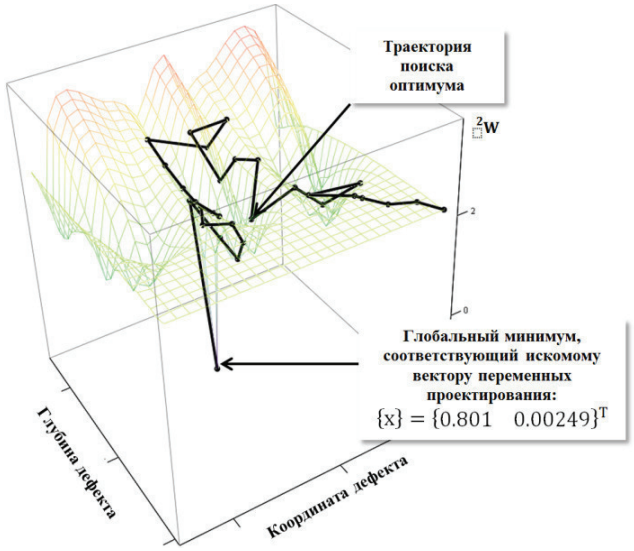

Рис. 7. Результат работы алгоритма минимизации по идентификации местоположения и размеров модельного дефекта

Результат работы алгоритма идентификации местоположения и размера дефекта в модельном трубопроводе показан на рис. 7. При значении критерия завершения процедуры минимизации $\xi = 10^{-6}$ и коэффициенте «отскока» $\Delta = 25\,\%$ процедура сошлась за 29 итераций. При этом найденный оптимум соответствовал расположению модельного дефекта глубиной 2,499 мм (79 % от толщины) на расстоянии ≈800 мм от опоры.

Выводы

В целях повышения качества оценки технического состояния промышленного оборудования предприятий нефтепереработки, химии и нефтехимии, нефте- и газодобычи предложен расчетно-экспериментальный метод экспресс-диагностики макродефектов оборудования на основе мониторинга отклонений от «эталонного» спектра собственных частот колебаний объекта в процессе эксплуатации, включающий процедуры:

а) автоматической коррекции граничных условий математической модели для обеспечения соответствия «эталонному» спектру собственных частот;

б) идентификации местоположения и размеров макродефектов.

Выполнена модификация алгоритма, реализующего комплексный метод минимизации Бокса, путем введения в него коэффициента «отскока», зависящего от диапазона явных ограничений на варьируемые параметры.

Экспериментально определена величина коэффициента «отскока» ($\Delta = 0{,}25$), обеспечивающая максимальную скорость сходимости процедуры минимизации для класса рассматриваемых задач.

Проведена апробация и верификация методологии на ряде тестовых задач, а также на различных образцах промышленного оборудования в стендовых условиях и действующих технологических установках АО «Ангарская нефтехимическая компания» и АО «Ангарский завод полимеров».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СТО–СА–03–004–2009. Трубчатые печи, резервуары, сосуды и аппараты нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств. Требования к техническому надзору, ревизии и отбраковке : утв. ОАО ВНИКТИнефтехимоборудование протокол № 5 от 16.12.2008. Волгоград, 2010. 75 с.
2. Власов В.Т., Дубов А.А. Физические основы метода памяти металла. М. : ТИССО, 2004. 424 с.
3. ГОСТ Р ИСО 24497–1–2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Ч. 1. Термины и определения : утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7.12.2009. № 586. Ст. 2010.
4. ГОСТ Р ИСО 24497–2–2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Ч. 2. Общие требования : утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7.12.2009. № 587. Ст. 2010.
5. ГОСТ Р ИСО 24497–3–2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Ч 3. Контроль сварных соединений : утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10.10.2009. № 499. Ст. 2010.
6. Иванов В.И., Власов. И.Э. Неразрушающий контроль: справочник. Т. 7. Метод акустической эмиссии. М. : Машиностроение, 2006. 829 с.

7. Комбинированный метод исследования деформации и разрушения образцов из углеро - углеродного композиционного материала по данным акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и тензометрии / С. В. Панин и др. // Вестник науки Сибири. 2012. № 4 (5). С. 129–138.
8. ПБ 03–593–03. Правила организации и проведения акустико - эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов : утв. постановлением Госгортехнадзора России от 9.06.2003 № 77.
9. Быков С.П., Иншаков Д.В., Кузнецов К.А. Применение акустической импульсной рефлектометрии в неразрушающем контроле труб теплообменников // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2014. № 10. С. 41–43.
10. СТО 00220227–043–2016. Трубопроводные системы. Методы акустического контроля. Метод акустической импульсной рефлектометрии. Иркутск : ИркутскНИИхиммаш, 2016. 26 с.
11. Коновалов А.М., Кугушев В.И., Яковлев А.Ю. Два перспективных направления для дефектоскопии трещин с использованием собственных колебаний объекта контроля // Контроль. Диагностика. 2017. № 8. С. 52–58.
12. Московенко И.Б., Коварская Е.З. Использование частот собственных колебаний при неразрушающем контроле физико-механических свойств материалов и изделий // В мире неразрушающего контроля. 2012. № 4 (58). С. 13–16.
13. Когушев В.И. Методика обнаружения значительных дефектов железнодорожных колес по результатам измерения частот их собственных колебаний // В мире неразрушающего контроля. 2010. №2(48). С. 72–74.
14. Равин А.А., Проскуряков К.Б. Анализ вибрационных характеристик рабочих лопаток осевых компрессоров // Судостроение. 2012. № 2. С. 54–56.
15. Савин С.Н. Ситников И.В., Данилов И.Л. Современные методы технической диагностики и мониторинга как средство безопасной эксплуатации строительных конструкций // В мире неразрушающего контроля. 2008. № 4 (42). С. 14–18.
16. Отчет НИР. Разработка методологии экспресс-диагностики дефектов промышленного оборудования по спектру собственных частот колебаний / С. Ю. Трутаев и др. Иркутск : ИркутскНИИхиммаш, 2017. 62 с.
17. СТО–00220227–044–2016. Оборудование опасных производственных объектов. Расчетно-экспериментальные методы исследования. Введ. 01.09.2016. Иркутск : ИркутскНИИхиммаш, 2016. 52 с.
18. Пат. 2626391C1 Рос. Федерация, МПК G01M 7/00 (2006.01). Способ мониторинга напряженно - деформированного состояния объектов повышенной опасности / С. Ю. Трутаев, К. А. Кузнецов ; заявитель и патентообладатель Иркутский научно-исследовательский и конструкторский институт химического и нефтяного машиностроения № 2016135360/28(055362) ; заявл. 30.08.2016, Бюл. № 21. 7 с.
19. Минашина И. К., Захарова Е.М. Обзор методов многомерной оптимизации // Информационные процессы. 2014. Т. 14., № 3. С. 256–274.
20. Моисеев Н.Н., Иванилов Ю.П., Столярова Е.М. Методы оптимизации. М. : Наука, 1979. 352 с.
21. Ниордсон Ф.П., Педерсон П. Обзор исследований по оптимальному проектированию конструкций // Механика. 1973. № 2. С. 136–152.
22. Рейтман М.И. Шапиро Г.С. Методы оптимального проектирования деформируемых тел: постановки и способы решения. М. : Наука, 1976. 265 с.
23. Безделев В.В., Буклемишев А.В. Программная система COMPASS. Руководство пользователя. Иркутск : Иркут. гос. техн. ун т, 2000. 120 с.
24. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс. М. : Радио и связь, 1988. 128 с.
25. Савин А. Н. Параллельный вариант алгоритма условной оптимизации комплексным методом Бокса // Изв. Сарат. гос. ун-та. 2012. Т.12., № 3. С. 109–117.
26. Гилл Ф. Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М. : Мир, 1985. 509 с.
27. Ewins D. J. Modal testing: theory, practice and applications. 2nd edition. 2000. 400 p.

REFERENCES

1. STO–SA–03–004–2009. Trubchatye pechi, rezervuary, sosudy i apparaty neftepererabatyvayushchikh i neftekhimicheskikh proizvodstv. Trebovaniya k tekhnicheskomu nadzoru, revizii i otbrakovke : utv. OAO VNIKTIneftekhimoborudovanie protokol No. 5 ot 16.12.2008 [STO–SA–03–004–2009. Tubular furnaces, tanks, vessels and apparatuses of oil refining and petrochemical industries. Requirements for technical supervision, revision and rejection: approved by OAO VNIKTINEFTEHimoborudovanie, protocol No. 5 dated 16.12.2008]. Volgograd, 2010, 75 p.
2. Vlasov V.T., Dubov A.A. Fizicheskie osnovy metoda pamyati metalla [The physical basis of the metal memory method]. Moscow: TISSO Publ., 2004, 424 p.
3. GOST R ISO 24497–1–2009. Kontrol' nerazrushayushchii. Metod magnitnoi pamyati metalla. Ch. 1. Terminy i opredeleniya : utv. prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 7.12.2009 [GOST R ISO 24497–1–2009. Non-destructive testing. Method of magnetic memory of metal. Part 1. Terms and definitions: approved by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 7.12.2009]. No. 586. St. 2010.
4. GOST R ISO 24497–2–2009. Kontrol' nerazrushayushchii. Metod magnitnoi pamyati metalla. Ch. 2. Obshchie trebovaniya : utv. prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 7.12.2009 [GOST R ISO 24497–2–2009. Non-destructive testing. Method of magnetic memory of metal. Part 2. General requirements: approved by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 7.12.2009]. No. 587. St. 2010.
5. GOST R ISO 24497–3–2009. Kontrol' nerazrushayushchii. Metod magnitnoi pamyati metalla. Ch 3. Kontrol' svarnykh soedine-nii : utv. prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 10.10.2009 [GOST R ISO 24497–3–2009. Method of magnetic memory of metal. Part 3. Inspection of welded joints: approved by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 10.10.2009]. No. 499. St. 2010.
6. Ivanov V.I., Vlasov. I.E. Nerazrushayushchii kontrol': spravochnik. Vol. 7. Metod akusticheskoi emissii [Non-destructive testing: A reference book. Vol. 7. Method of acoustic emission]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2006, 829 p.

7. Panin S. V. et al. Kombinirovannyi metod issledovaniya deformatsii i razrusheniya obraztsov iz uglero - uglerodnogo kompozitsionnogo ma-teriala po dannym akusticheskoi emissii, korrelyatsii tsifrovykh izobrazhenii i tenzometrii [Combined method for studying deformation and fracture of samples of the carbon-carbon compositional material from acoustic emission data, correlation of digital images and strain gauges]. *Vestnik nauki Sibiri* [*Siberian Journal of Science*], 2012, No. 4 (5), pp. 129–138.
8. PB 03–593–03. Pravila organizatsii i provedeniya akustiko - emissionnogo kontrolya sosudov, apparatov, kotlov i tekhnologicheskikh truboprovodov : utv. postanovleniem Gosgortekhnadzora Rossii ot 9.06.2003. No. 77. [PB 03-593-03. Rules for the organization and conduct of acoustic and emission control of vessels, apparatuses, boilers and technological pipelines: Decree of the Gosgortechnadzor of Russia of 9 June 2003 No. 77].
9. Bykov S.P., Inshakov D.V., Kuznetsov K.A. Primenenie akusticheskoi impul'snoi reflektometrii v nerazrushayushchem kon-trole trub teploobmennikov [Application of acoustic pulse reflectometry in non-destructive control of heat exchanger tubes]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [*Chemical and petroleum engineering*], 2014, No. 10, pp. 41–43.
10. STO 00220227–043–2016. Truboprovodnye sistemy. Metody akusticheskogo kontrolya. Metod akusticheskoi impul'snoi reflektometrii [STO 00220227-043-2016. Pipeline systems. Methods of acoustic control. Method of acoustic pulse reflectometry]. Irkutsk: IrkutskNIIkhimmash Publ., 2016, 26 p.
11. Konovalov A.M., Kugushev V.I., Yakovlev A.Yu. Dva perspektivnykh napravleniya dlya defektoskopii treshchin s ispol'zovaniem sobstvennykh kolebanii ob"ekta kontrolya [Two perspective directions for defect inspection of cracks using the natural oscillations of the object of control]. *Kontrol'. Diagnostika* [*Control. Diagnostics*], 2017, No. 8, pp. 52–58.
12. Moskovenko I.B., Kovarskaya E.Z. Ispol'zovanie chastot sobstvennykh kolebanii pri nerazrushayushchem kontrole fiziko-mekhanicheskikh svoistv materialov i izdelii [The use of natural frequencies for non-destructive control of physical and mechanical properties of materials and products]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya* [*NDT World*], 2012, No. 4 (58), pp. 13–16.
13. Kogushev V.I. Metodika obnaruzheniya znachitel'nykh defektov zheleznodorozhnykh koles po rezul'tatam izmereniya chastot ikh sobstvennykh kolebanii [A technique for detecting significant defects of railway wheels based on the results of measuring the frequencies of their natural oscillations]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya* [*NDT World*], 2010, No.2(48), pp. 72–74.
14. Ravin A.A., Proskuryakov K.B. Analiz vibratsionnykh kharakteristik rabochikh lopatok osevykh kompressorov [Analysis of vibration characteristics of working blades of axial compressors]. *Sudostroenie* [*Shipbuilding*], 2012, No. 2, pp. 54–56.
15. Savin S.N. Sitnikov I.V., Danilov I.L. Sovremennye metody tekhnicheskoi diagnostiki i monitoringa kak sredstvo bezopasnoi ekspluatatsii stroitel'nykh konstruktsii [Modern methods of technical diagnostics and monitoring as a means of safe operation of building structures]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya* [*NDT World*]. 2008, No. 4 (42), pp. 14–18.
16. Trutaev S. Yu. et al. Otchet NIR. Razrabotka metodologii ekspress-diagnostiki defektov promyshlennogo oborudovaniya po spektru sobstvennykh chastot kolebanii [Research report. Development of a methodology for express diagnostics of defects in industrial equipment from the spectrum of natural frequencies of oscillations]. Irkutsk: IrkutskNIIkhimmas Publ., 2017, 62 p.
17. STO–00220227–044–2016. Oborudovanie opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov. Raschetno-eksperimental'nye metody issledovaniya. Vved. 01.09.2016 [STO-00220227-044-2016. Equipment of hazardous industrial facilities. Calculation-experimental methods of research. Introd. 01/09/2016.]. Irkutsk: IrkutskNIIkhimmash Publ., 2016. 52 p.
18. Trutaev S. Yu., Kuznetsov K. A. *Sposob monitoringa napryazhenno - deformirovannogo sostoyaniya ob"ektov povyshennoi opasnosti* [*A way of monitoring the stress-strain state of high risk facilities*]. Patent RF no. 2626391S1, MPK G01M 7/00 (2006.01); patent applicant and holder is Irkutsk Research and Design Institute of Chemical and Petroleum Engineering No. 2016135360/28(055362) ; applied Aug 30, 2016, Bull. No. 21, 7 p.
19. Minashina I. K., Zakharova E.M. Obzor metodov mnogomernoi optimizatsii [The review of methods of multidimensional optimization]. *Informatsionnye protsessy* [*Information processes*], 2014, Vol. 14., No. 3, pp. 256–274.
20. Moiseev N.N., Ivanilov Yu.P., Stolyarova E.M. Metody optimizatsii [Optimization methods]. Moscow: Nauka Publ., 1979, 352 p.
21. Niordson F.P., Pederson P. Obzor issledovanii po optimal'nomu proektirovaniyu konstruktsii [Review of research on the optimal design of structures]. *Mekhanika* [*Mechanics*], 1973, No. 2, pp. 136–152.
22. Reitman M.I. Shapiro G.S. Metody optimal'nogo proektirovaniya deformiruemykh tel: postanovki i sposoby resheniya [Methods of Optimal Design of Deformable Bodies: Formulations and Solutions]. Moscow: Nauka Publ., 1976, 265 p.
23. Bezdelev V.V., Buklemishev A.V. Programmnaya sistema COMPASS. Rukovodstvo pol'zovatelya [COMPASS software system. User guide]. Irkutsk: Irkutsk state techn. univ. Publ., 2000, 120 p.
24. Bandi B. Metody optimizatsii. Vvodnyi kurs. [Basic optimization methods. An introductory course]. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1988, 128 p.
25. Savin A. N. Parallel'nyi variant algoritma uslovnoi optimizatsii kompleksnym metodom Boksa [Parallel variant of the algorithm of conditional optimization by the complex Box method]. *Izv. Sarat. gos. un-ta* [*News of Saratov University*], 2012, Vol.12., No. 3, pp. 109–117.
26. Gill Ph. E., Murray W., Wright M.H. Practical Optimization. Emerald Group Publishing Limited, 1982, 418 p. (Russ.ed.: Gill, F. Myurrei U., Rait M. Prakticheskaya optimizatsiya. Moscow: Mir Publ., 1985, 509 p.).
27. Ewins D. J. Modal testing: theory, practice and applications. 2nd edition, 2000, 400 p.

Информация об авторах

Трутаев Станислав Юрьевич - к. т. н., заведующий отделом инновационных разработок, АО «ИркутскНИИхиммаш», г. Иркутск, e-mail: stas@himmash.irk.ru

Authors

Stanislav Yurievich Trutaev – Ph.D. in Engineering Science, Head of Innovation Development Subdepartment, IrkutskNIIhimmash JSC, Irkutsk, e-mail: stas@himmash.irk.ru

Для цитирования

Трутаев С. Ю. Применение модифицированного метода бокса для идентификации макродефектов оборудования опасных производственных объектов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2017. - Т. 56, № 4. - С. 19–27. - DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).19-27.

For citation

Trutaev S.Yu. Primenenie modifitsirovannogo metoda boksa dlya identifikatsii makrodefektov oborudovaniya opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov [Application of the modified box method for identifying the equipment macrodefects at hazardous production facilities]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2017. Vol. 56, No. 4, pp. 19–27. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).19-27.

УДК *539.421* ***DOI:*** *10.26731/1813-9108.2017.4(56).27-33*

К. А. Вансович, И. П. Аистов

Омский государственный технический университет, г. Омск, Российская Федерация
Дата поступления: *25 сентября 2017 г.*

АНАЛИЗ ТРЕХМЕРНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ВЕРШИНЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН

Аннотация. *В работе выполнен анализ трехмерного упругопластического напряжённого состояния в вершине поверхностных трещин на примере стали 40Х при различных видах двухосного нагружения. Приведены результаты усталостных испытаний крестообразных образцов с поверхностной трещиной при двухосном нагружении. Исследовано изменение нормальных напряжений впереди фронта трещины при нагружении образцов до максимальной нагрузки и их разгрузке в дальнейшем до нуля. Установлена зависимость вида нагружения образцов с раскрытием трещины. Предложено характеризовать разрушение в вершине трещины суммой нормальных напряжений. Предложена характеристика напряженного состояния в вершине трещины, коррелирующая со скоростью роста трещины при различных видах нагружения. В результате исследований получены аналитические формулы для вычислений скорости роста усталостных трещин, развивающихся по типу нормального отрыва, при одноосном и двухосном нагружении металла в области поверхностной трещины.*

Ключевые слова: *двухосное нагружение, поверхностная трещина, скорость роста трещины, циклические напряжения, коэффициент изменения средних напряжений за один цикл нагружения.*

K. A. Vansovich, I. P. Aistov

Omsk State Technical University, Omsk, the Russian Federation
Received*: September 25, 2017*

THE ANALYSIS OF THREE-DIMENSIONAL STRESS CONDITION AT THE TOP OF THE SURFACE FATIGUE CRACKS

Abstract. *The analysis of the three-dimensional elastoplastic stress state at the top of surface cracks is made using the example of steel 40X for various types of biaxial loading. Results of fatigue tests of cruciform specimens with a surface crack at biaxial loading are presented in the paper. The change in the normal stresses before the crack front is investigated when the samples are loaded to the maximum load and then unloaded to zero. Relation of the type of loading of the samples with crack opening is installed. It is proposed to characterize the fracture at the crack tip by the sum of normal stresses. The characteristic of the stressed state at the crack tip correlating with the rate of crack growth at various loading types is proposed. Formulas are obtained for calculating the rate of growth of fatigue cracks developing as normal detachment under uniaxial and biaxial loading of metal in the region of the surface crack.*

Keywords: *a biaxial loading, a surface crack, cyclic stresses, a crack growth rate, a coefficient of variation of average stresses per loading cycle.*

Введение

В современных условиях при эксплуатации резервуаров, сосудов и аппаратов высокого давления, магистральных трубопроводов, работающих при высоком внутреннем давлении, отраслевые регламенты требуют проведения периодической оценки их прочности и остаточного ресурса работы при наличии различных дефектов металла. Рост поверхностных трещин в процессе работы таких конструкций приводит к их критическому состоянию [1-6]. Необходимо отметить, что проблема разрушения и предельных состояний для сосудов давления, имеющих поверхностные трещины, решается с использованием трех подходов: разработка аналитических решений [2-4, 7]; использование численных методов анализа напряжений и деформаций [5, 9, 11]; экспериментальные исследования [8, 13], которые позволяют оце-

© К.А. Вансович, И.П. Аистов, 2017