
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 620.16

ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ ПО ПОЛЯМ ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫМ КОГЕРЕНТНО-ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

© 2019 г. И. А. Разумовский^{1,*}, А. С. Чернятин^{1,2}

¹ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия

² ООО “Транснефть”, г. Москва, Россия

*e-mail: murza45@gmail.com

Поступила в редакцию 09.07.2019 г.

Принята к публикации 26.08.2019 г.

Приведен анализ современных когерентно-оптических и оптико-цифровых методов для регистрации полей перемещений при статическом, вибрационном и динамическом нагружении. Рассмотрен методический подход к оценке геометрических параметров дефектов (включая скрытые подповерхностные дефекты) на основе математической обработки экспериментальной информации в виде полей амплитудных перемещений поверхности исследуемого объекта, соответствующих собственным формам колебаний.

Ключевые слова: размеры скрытых дефектов, модальный анализ, обратная задача

DOI: 10.1134/S0235711919070101

В связи с постоянно возрастающими требованиями к повышению прочности и надежности ответственных конструкций современной техники (тепловой и ядерной энергетики, авиакосмических конструкций и др.) активно разрабатываются методики, обеспечивающие возможность обнаружения скрытых дефектов, изменения геометрических параметров дефектов в процессе их дальнейшего развития на всех стадиях жизненного цикла. Это открывает возможности проведения расчетов на прочность и остаточный ресурс элементов конструкций непосредственно в процессе эксплуатации с учетом накопленных повреждений.

Постоянно развивающиеся возможности вычислительной техники и компьютерных технологий позволяют не только существенно расширить круг задач расчетного анализа квазистатических и нелинейных динамических процессов, но и обеспечить значительное повышение уровня экспериментальных исследований, включая характер, объемы, скорости проведения измерений, точности получаемой экспериментальной информации, корректную интерпретацию результатов экспериментов. В первую очередь это относится к когерентно-оптическим методам (голографии, цифровой голографии, электронной цифровой спекр-интерферометрии – ЭЦСИ), оптико-цифровому методу корреляции цифровых изображений (КЦИ) [1–7]. Эти методы позволяют проводить регистрацию полей статических, вибрационных и динамических перемещений исследуемого объекта в режиме реального времени, получая информацию непосредственно в цифровом виде. Современное оборудование позволяет проводить регистрацию полей деформационного отклика в виде полей перемещений поверхности исследуемого объекта в лабораторных и в натурных условиях. В зависимости от типа оптической схемы оборудования рассматриваемые методы позволяют получить

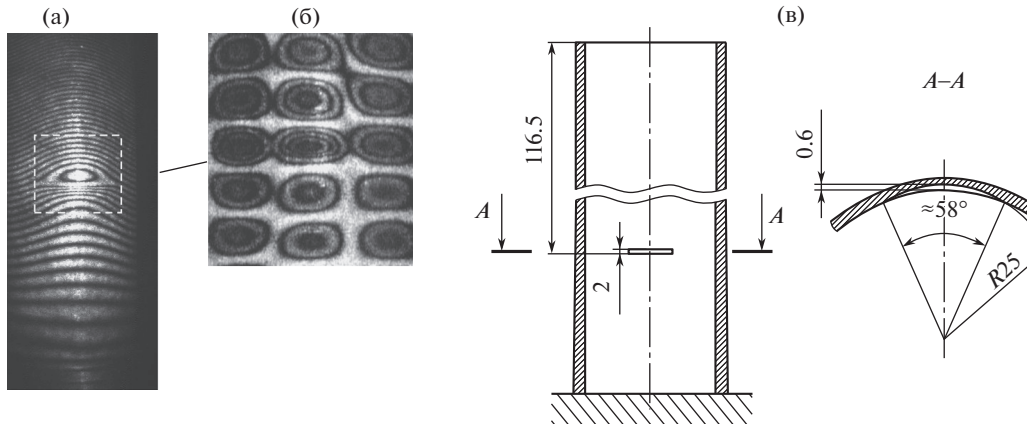


Рис. 1. Результаты тестового эксперимента по оценке положения и размеров дефекта на внутренней поверхности оболочки (v): (a) картина амплитудных перемещений на собственной частоте $f = 2850$ Гц; (б) картина амплитудных перемещений в зоне дефекта на частоте $f = 77000$ Гц.

как отдельные, так и все три компоненты вектора перемещений. Это практически снимает ограничения на минимальные размеры исследуемых дефектов (до нескольких миллиметров).

Важнейшим фактором применения когерентно-оптических и оптико-цифровых методов для задач дефектоскопии, относящихся к классу обратных задач, является высокая чувствительность (в методах голографии и ЭЦСИ ≈ 0.1 мкм/полосу интерференции) и практически неограниченный объем экспериментальной информации. Эти методы нашли эффективное применение для исследования статических, динамических задач (включая быстропротекающие процессы), вибрационных процессов [8]. В работе [9] представлены результаты исследования процесса динамического развития трещины с применением специализированной аппаратуры, позволяющей с использованием метода КЦИ проводить регистрацию полей тангенциальных перемещений со скоростью 2 млн кадров в секунду. Эти методы можно эффективно использовать для модального анализа конструкций, включающего высокоточные измерения собственных частот и форм колебаний.

Модальный анализ (определение собственных частот и форм колебаний способом осреднения по времени) является наиболее простым с точки зрения требований к экспериментальному оборудованию когерентно-оптическим методом, т.к. при его применении существенно снижаются требования к жесткости оптической схемы [2, 3, 8].

На рис. 1а, б представлены результаты тестового эксперимента [10], связанного с оценкой размеров дефекта, расположенного на недоступной для регистрации поля перемещений внутренней поверхности цилиндрической оболочки (рис. 1в). Исследования проводились методом голографической интерферометрии с применением способа осреднения по времени для получения картин амплитудных перемещений, соответствующих собственным формам колебаний [2, 3].

Из интерференционных картин (рис. 1) можно определить зону расположения дефекта и установить, что дефект не “выходит” на наружную поверхность оболочки (в противном случае интерференционные полосы имели бы разрывы).

Целью настоящей статьи является оценка возможностей надежного определения размеров дефектов в элементах конструкций на основе математической обработки полей амплитудных перемещений, соответствующих собственным формам колебаний.

Применяемый для решения задачи методический подход является развитием общего метода оценки параметров, характеризующих нагруженность, локальные напряжения и размеры дефектов в элементах конструкций, основанного на минимизации комплексного расхождения (определяемого целевой функцией) между зарегистрированными экспериментально полями статических (квазистатических) перемещений и их расчетными значениями, полученными путем расчета с использованием метода конечных элементов (МКЭ) при текущих значениях искомых параметров. Необходимым условием практической реализации такого подхода, является использование для решения задачи значительных объемов экспериментальной информации (в виде полей перемещений или деформаций), что может быть обеспечено только на основе современных оптических методов [1–8].

Методический подход реализован в “гибком” вычислительном комплексе (ВК) в ПК MATLAB, в который входят управляющие программы (с графическим интерфейсом), позволяющие выполнить весь процесс расчета: от формирования массива экспериментальных данных, решения серии прямых задач расчета НДС исследуемого объекта (в среде ANSYS) с помощью высоко параметризованных и адаптивных моделей исследуемых объектов и алгоритмов решения и, наконец, решения обратной задачи определения искомых параметров путем минимизации целевой функции, при различных настройках и условиях. Разработанный ВК содержит программу, позволяющую оценивать влияние на результат погрешностей экспериментальных данных, а также устойчивость решения при варьировании количества точек измерений, зон их локализации и прочих параметров модели. Вычислительный комплекс охватывает все этапы решения реальных прикладных задач с высокой степенью автоматизации этапов, которая обеспечивается благодаря разработанному алгоритму непрерывного обмена данными между программными средами ANSYS и MATLAB [11, 12].

Эффективность применения метода и вычислительного комплекса для решения задачи механики деформируемого твердого тела показана в работах [11–16].

Постановка задачи. В качестве объекта исследования рассматривается модель газотурбинной лопатки (рис. 2а) в виде профилированной пластины, жестко закрепленной у основания (в сечении $x = 0$) и имеющей размеры: длина $L = 0.1$ м; ширина $W = 0.05$ м; максимальная толщина профиля $t = 0.01$ м. Материал пластины (сталь): модуль упругости $E = 2 \times 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0.3$; плотность $\rho = 7800$ м³/кг. В лопатке имеется дефект в виде распространяющейся от нижней поверхности лопатки $z = 0$ полуэллиптической плоской трещины длиной $2a$ и глубиной b (a, b – оси полуэллипса). Положение трещины, ортогональной к нижней плоской поверхности пластины, определяется параметрами x_c, y_c (рис. 2б).

Необходимо оценить возможность определения параметров дефекта a, b, x_c, y_c (образующих вектор неизвестных $P = \{a, b, x_c, y_c\}$), на основе математической обработки картин полей амплитудных перемещений $w(x, y)$ точек, расположенных на верхней (неповрежденной) поверхности лопатки, соответствующих формам колебаний рассматриваемого объекта на собственных частотах.

Модальный анализ не позволяет непосредственно получать реальные величины амплитуд колебаний точек (они определяются с точностью до константы). Предлагается несколько вариантов нормировки полей перемещений, соответствующих собственным формам колебаний.

Проблему невозможности определения собственных форм при численном решении с точностью до размерного числа можно разрешить на основе использования в качестве исходной экспериментальной информации вместо поля перемещений поля их градиентов (и даже кривизн). Поясним это. Имея равномерную прямоугольную сетку точек измерений с шагом s , с количеством N_x, N_y вдоль каждой оси, можно для

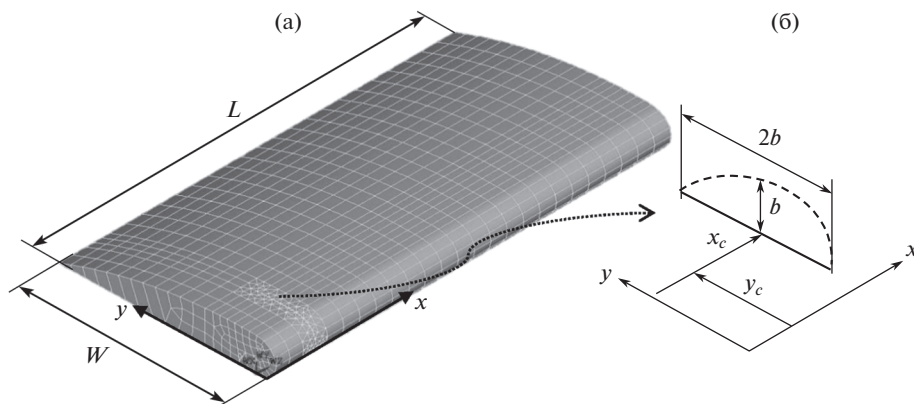


Рис. 2. Конечно-элементная модель исследуемого объекта (а) с плоской трещиной (б).

произвольной точки i, j ($i = 1, \dots, N_x, j = 1, \dots, N_y$) и для любой компоненты вектора перемещений u_k ($k = x, y, z$) определить нормированный полный дифференциал gu_k

$$gu_k(i, j) = \frac{1}{I(i, j)} [(u_k(i+1, j) - u_k(i-1, j))/(x(i+1, j) - x(i-1, j)) + ((u_k(i, j+1) - u_k(i, j-1))/(y(i, j+1) - y(i, j-1))] \times 2s, \quad (1)$$

где нормировочный и одновременно “обезразмеривающий” коэффициент можно представить в виде

$$I(i, j) = u_k(i, j),$$

$$I(i, j) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} |u_k(i, j)|,$$

$$I(i, j) = \frac{\max_{i=1, N_x, j=1, N_y} (u_k(i, j)) - \min_{i=1, N_x, j=1, N_y} (u_k(i, j))}{2s}.$$

Первый вариант предпочтительнее, поскольку gu_k становится полным относительным дифференциалом в точке, но при этом возникает проблема “деления на ноль” (или близких к нему величин). Второй и третий равнозначны, поскольку обеспечивают масштабирование всего поля на число (размерное).

В статье использовался второй вариант нормировочного коэффициента. Рассчитываемые таким образом полные дифференциалы для различных компонент вектора перемещения будут одного порядка, что неприемлемо, поскольку в рассматриваемой задаче (рис. 2) поля перемещений u_x, u_y пренебрежимо малы (по уровню) по сравнению с u_z , а полный дифференциал, рассчитываемый по (3), их “уравнивает”. Для каждого поля перемещения введем весовой коэффициент W

$$W_x = I_x/I_z, \quad W_y = I_y/I_z, \quad W_z = 1.$$

Независимо от того, какое правило построения форм используется в ПК ANSYS, при варьировании параметров дефекта получаемые собственные полные дифференциалы собственных форм (одного порядкового номера) будут увязаны, что дает возможность построить гладкие интерполирующие их функции, образующие банк откликов [10, 11].

Введенный полный дифференциал полей перемещений собственных форм – величина (по модулю) пропорциональна плотности интерференционных полос.

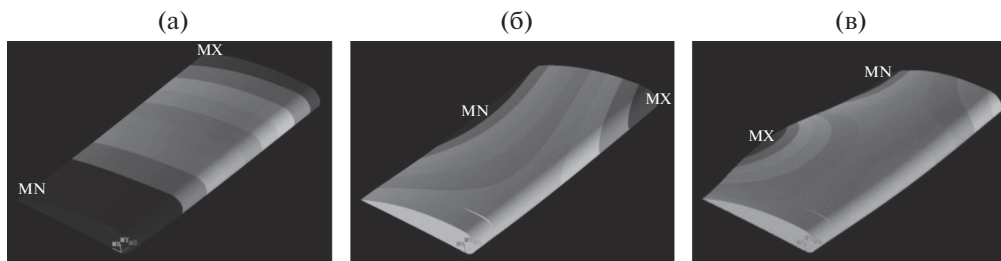


Рис. 3. Собственные формы колебаний объекта при частотах: 672 Гц (а), 3236 Гц (б) и 8345 Гц (в).

КЭ-модель исследуемого объекта в среде ANSYS, построенная с использованием 3D-элементов изопараметрических с квадратичной аппроксимацией, показана на рис. 2а. Модель разбита на две зоны: зона с дефектом и основная часть. Вдоль фронта трещины сетка имеет сгущение, средний размер элементов $(L+W)/100$. КЭ-модель является параметрической и для ее построения и последующего расчета собственных частот и форм используется специально разработанный макрос, написанный на языке APDL.

Процедура расчета. Предлагаемый подход к определению вектора $P = \{a, b, x_c, y_c\}$ на основе обработки экспериментально зарегистрированных полей перемещений, включает в себя этапы: 1) решение задачи модального анализа исследуемого объекта – для формирования так называемого “банка откликов” [11, 12]; 2) решение задачи определения искомых параметров дефекта на основе математической обработки полей перемещений (экспериментально зарегистрированных интерференционных картин), соответствующих собственным формам колебаний объекта, как многопараметрической нелинейной задачи оптимизации [11, 12]; 3) оценка влияния погрешностей экспериментальных данных на точность и устойчивость определения параметров, характеризующих размеры и положение дефекта.

Модальный анализ, выполняемый с целью определения собственных частот и форм колебаний на основе решения задачи на собственные значения, является “отправной точкой” для более сложных исследований динамических откликов системы, которые могут быть использованы для идентификации дефектов. При определении собственных частот и форм колебаний использовался метод предобусловленных сопряженных градиентов (ПСГ) в сочетании с алгоритмом Lanczos. Этот метод предпочтительнее прямых методов решения уравнений с разреженными матрицами, т.к. требует значительно меньше ресурсов и обладает суперлинейной скоростью сходимости (даже в задачах большой размерности и с плохой обусловленностью).

На рис. 3 представлены расчетные формы колебаний, соответствующие первой, третьей и пятой собственным частотам для лопатки с дефектом, имеющим параметры $P_0^* = \{10; -5; 10; 5\}$ мм.

При решении задачи модального анализа исследуемого объекта для “наполнения” банка откликов решается серия задач об определении амплитудных перемещений точек поверхности исследуемого объекта $w(x, y)$, соответствующих каждой используемой для решения задачи собственной частоте, при варьировании определенным образом компонент вектора P . На основе полученных гиперсплайновых поверхностей для каждой i -й компоненты вектора e выстраивается аппроксимация вида $e_i = F(P)$, где вектор e – совокупность gu_k .

На следующем этапе производится определение компонент вектора P по экспериментально полученному полю перемещений $w^*(x, y)$, представляемому через вектор e^*

Таблица 1. Результаты определения параметров дефекта

Условия проведения расчета				x_c		y_c		a		b	
№	N_i	№ формы колебаний	Δe	M	D	M	D	M	D	M	D
1	81	1, 2, 3, 4, 5	$\pm 10\%$	Назначались точные величины				0.249	0.702	0.124	0.100
2	81	1, 2, 3, 4, 5	$\pm 15\%$	9×10^{-4}	2×10^{-4}	1.067	0.362	0.050	0.037	0.681	0.027
3	289	1		Назначались точные величины				0.131	0.231	1.124	0.240
4	289	1, 2		0.927	0.082	1.031	0.048				
5	289	1, 2, 3		0.964	0.007	1.023	0.002				
6	289	1, 2, 3, 4		0.995	0.003	1.002	0.002				
7	289	1, 2, 3	1.000	0.000	1.016	0.005	0.952	0.007	1.037	0.006	
8	289	1, 2, 3, 4, 5	1.000	0.000	1.000	0.006	0.996	0.005	1.002	0.003	

значений дифференциала g_w в конкретных точках измерений, на основе минимизации целевой функции I , отражающей комплексное расхождение между e^* и e , рассчитываемого с помощью сформированного банка откликов. В рамках настоящей статьи выполняется численный эксперимент, когда w^* определяются на основе численного моделирования МКЭ. В качестве определяемого был принят дефект с параметрами P_0^* , а точки измерений, в которых вычисляется w^* , расположены в узлах прямоугольной сетки, соответствующей неповрежденной поверхности лопатки (рис. 1а). Таким образом, дефект является “скрытым” по отношению к поверхности измерений. В качестве целевой функции принимаем среднеквадратическое отклонение. Для исследования влияния погрешности измерений величин w на точность определения параметров P выполнялась численная процедура “зашумления” вектора e^* путем введения для каждой компоненты вектора случайных отклонений из диапазона $\pm \Delta e$ с последующим применением указанного подхода определения вектора P . Для получения статистических параметров данная процедура повторялась многократно.

С целью оценки влияния объема исходной информации на точность результатов рассмотрены два варианта использованных в расчете точек “измерений” перемещений: $N_1 = 9 \times 9 = 81$, $N_2 = 17 \times 17 = 289$.

Результаты исследований. Результаты численного эксперимента по определению параметров дефекта в виде математического ожидания M и дисперсии D компонент вектора P , отнесенных к истинным (соответствующим P_0^*) значениям, приведены в табл. 1 и на рис. 4.

Из представленных в табл. 1 данных следует, что в случаях, когда разброс относительной погрешности экспериментальных данных лежит в пределах $\pm 10\%$, принятой в первой серии расчетов величины количества “точек измерений” $N_1 = 9 \times 9 = 81$ недостаточно для решения задачи.

Выводы. На основе полученных результатов можно сделать выводы: 1) при принятом в первой серии расчетов количестве “точек измерений” $N_1 = 81$ объем исходной информации не достаточен для решения задачи даже при величине разброса погрешностей $\Delta e = \pm 10\%$ (строки 1, 2 табл. 1); 2) использование для решения задачи картины амплитудных виброперемещений, соответствующей одной из собственных частот, даже при значительном объеме исходной информации ($N_2 = 289$) не позволяет оценить величины параметров дефекта (строка 3 табл. 1); 3) при использовании для решения задачи форм колебаний, полученных для нескольких собственных частот, и значительных массивов экспериментальной информации ($N_2 = 289$) рассматриваемый подход позволяет надежно и с высокой точностью определить локализационные и гео-

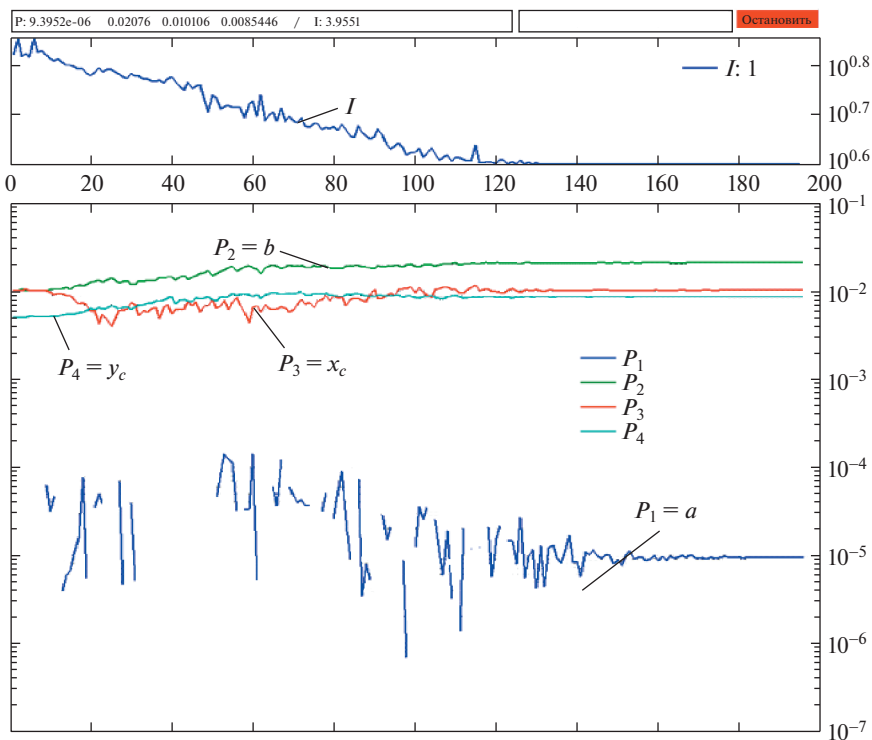


Рис. 4. Изменение значений целевой функции I и компонент вектора $P = \{a, b, x_c, y_c\}$ в процессе решения задачи минимизации.

метрические параметры дефекта, даже при значительном диапазоне разброса погрешностей $\Delta\epsilon = \pm 15\%$.

Таким образом, предлагаемая методика в совокупности с разработанным ВК позволяет надежно оценивать размеры “скрытых” дефектов на основе математической обработки картин виброперемещений поверхности исследуемого объекта, полученных для нескольких собственных частот. При этом требования к характеру необходимой экспериментальной информации (типу собственных форм колебаний), объему, точности и размерам зоны локализации исходной экспериментальной информации может быть определена на основе предварительных численных решений соответствующих модельных задач.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schnars U., Jueptner W. Digital Holography. Springer, 2005. P. 165.
2. Shchepinov V.P., Pisarev V.S. et al. Strain and Stress Analysis by Holographic and Speckle Interferometry. Chichester: John Wiley & Sons, 1996. P. 498.
3. Razumovsky Igor A. Interference-optical Methods of Solid Mechanics / Series: Foundations of Engineering Mechanics, 2011. Springer. P. 270.
4. Schreier N., Orteu J.-J., Sutton M. Image correlation for shape. Motion and deformation measurements. Basic concepts, theory and applications. Springer, 2009. P. 322.

5. *Гусев М.Е., Алексеев И.В.* Состояние, проблемы и перспективы цифровой голографической виброметрии. Голография: теоретические и прикладные вопросы // Материалы XXVIII Школы-симпозиума по голографии и когерентной оптике. 2013. Н. Новгород, 22–26 августа 2013. С. 51.
6. *Алексеев И.В., Гусев М.Е.* Цифровая голографическая интерферометрия широкого спектрального диапазона в системах неразрушающего контроля динамики микро- и макросистем // Известия вузов. Радиофизика. 2014. Т. LVII. № 8–9. С. 626.
7. *Bing Pan.* Digital Image Correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals // Measurement Science and Technology. V. 29. N 8, article id. 082001 (2018)
<https://doi.org/10.1088/1361-6501/aac55b>
8. *Одинцев И.Н., Разумовский И.А.* Методы когерентно-оптической виброметрии в практике механических испытаний // Приборы. 2010. № 10. С. 28.
9. *Kirugulige M.S., Tippur H.V.* Measurement of Fracture Parameters for a Mixed-Mode Crack Driven by Stress Waves using Image Correlation Technique and High-Speed Digital Photography. Strain. 2008. P. 108.
10. *Spirochkin Yu.K., Odintsev I.N.* On active diagnostics method for assessment of technical condition of nuclear facility components. Proceedings of the ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis. ESDA 2010. 2010. July 12–14. Istanbul. Turkey. No. ESDA2010-25089, p. 329.
<https://doi.org/10.1115/ESDA2010-25089>.
11. *Разумовский И.А., Чернятин А.С.* Методология и программа для исследования напряженно-деформированного состояния с использованием интерференционно-оптических и численных методов // Машиностроение и инженерное образование. 2009. № 4. С. 42.
12. *Chernyatin A., Razumovsky I.* Experimental and computational method for determining parameters of stress-strain state from the data obtainable by interference optical techniques / Proc. ICEM-14. Poitiers, France, 2010: EPJ Web of Conferences 6. 45003. (2010).
<https://doi.org/10.1051/epjconf/20100645003>.
13. *Чернятин А.С., Разумовский И.А.* Комплексный анализ элементов конструкций с поверхностными трещинами // Машиностроение и инженерное образование. 2011. № 3. С. 66.
14. *Чернятин А.С., Разумовский И.А.* Метод индентирования как способ оценки нагруженности и деградации механических характеристик материала // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 4. С. 40.
15. *Чернятин А.С., Разумовский И.А.* Последовательно углубляемый дисковый разрез – индикатор остаточных напряжений в пространственных телах // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 5. С. 93.
16. *Chernyatin A.S., Matvienko Y.G. and Razumovsky I.A.* A computational tool for estimating stress fields along a surface crack front // Fatigue and Fracture Engineering Materials and Structures. 2015. № 38. P. 180.