

А. В. Черпаков, В. А. Акопьян, А. Н. Соловьев

*Научно-исследовательский институт механики и прикладной математики  
им. И. И. Воровича, Южный Федеральный Университет  
Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, e-mail: [akop@math.rsu.ru](mailto:akop@math.rsu.ru)*

## Алгоритм многопараметрической идентификации дефектов стержневых конструкций

*Получена 27.12.2012, опубликована 22.03.2013*

В статье предложен, отличающийся от известных, алгоритм многопараметрической идентификации дефектов (ИД) стержневых конструкций. Новизна алгоритма заключается в том, что процедура ИД разделена на два этапа: на 1-м этапе определяется местоположение дефекта, а на втором — степень поврежденности. Дополнительной информацией к решению задачи реконструкции дефектов является набор собственных частот и форм колебаний исследуемой конструкции. При этом анализ форм колебаний позволяет решить задачу первого этапа, после чего строится аналитическая или конечно-элементная модель конструкции с дефектами и с помощью прямых расчетов решается задача второго этапа. Приведен пример расчета параметров дефекта в упругом консольном стержне на основе модельного эксперимента в КЭ комплексе. При использовании современных средств измерения перемещений точность предложенного метода реконструкции параметров дефекта не уступает точности, полученной в известных работах, например, с помощью искусственных нейронных сетей.

Ключевые слова: алгоритм, идентификация дефектов, местоположение дефекта, степень поврежденности стержня.

### ВВЕДЕНИЕ

Решению задач идентификации повреждений (ИД) в стержневых структурах посвящено большое количество работ, что видно из обзоров, опубликованных не только достаточно давно, но и в последние годы [1-7]. Среди ключевых вопросов, возникающих при исследовании поврежденных структур, важное место занимает построение алгоритмов решения задач ИД. При решении задач ИД в последнее время зачастую используется достаточно новый подход, заключающийся в разработке и применении эволюционных алгоритмов, нейронных сетей и методов оптимизации. Краткий обзор исследований в этом направлении приведен в работе S. Moradi et al [8]. Авторы этой работы разработали модифицированный вариант генетического алгоритма (т.н. bees algorithm (BA-алгоритм)) и эволюционной методики оптимизации (swarm-based evolutionary optimization technique). Этот алгоритм был применен для решения задач ИД в консольно-закрепленном упругом стержне с наличием дефекта. ИД

разрабатывалась на основе использования аналитической модели колебаний стержня (задача на основе однородной балки Эйлера, решение которой получено на базе принципа Гамильтона-Остроградского и функций Крылова). В этой модели [1,2], повреждение в стержне моделируется жесткостью эквивалентной пружины. Численный расчет параметров повреждения в стержне был проведен на базе исходных данных — значений характерных резонансных частот колебаний (параметры форм колебаний в расчете не принимались). Сравнение результатов численных расчётов, полученных с помощью ВА-алгоритма и натурального эксперимента, позволило оценить расхождение значений прогнозируемых и экспериментальных данных: по локации (от 3 до 7,5%) и по глубине надреза (от 3 до 15,5%).

Наряду с этим задача ИД в упругих элементах конструкций была решена также с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС) [9]. Была построена 3-х мерная конечно-элементная модель стержня прямоугольного сечения с открытой трещиной. В ходе решения задачи ИД (и в частности задачи оптимальной схемы размещения сенсоров на поверхности модели) был использован собственный программный продукт, причем в исходные данные для ИНС были включены не только собственные частоты, но и параметры форм колебаний и их комбинации. Решение задачи ИД в стержне с помощью разработанной ИНС показало, что при выборе оптимальной схемы расположения сенсоров и включении в исходные данные параметров АЧХ первых пяти форм собственных колебаний стержня, достигается точность в 99,16% в определении глубины трещины (надреза) и 99,82% в ее локации. Сравнение этих результатов с данными, приведенными в [8], показали, что подход к решению задачи идентификации повреждений, описанный в [9] дает лучшие по точности результаты. Из этого следует, что включение в алгоритм решения задачи ИД полного набора исходных данных (параметры АЧХ и форм колебаний) позволяет получить более точные результаты. Если же в алгоритме ИД использовать исходные данные по формам собственных колебаний стержня, полученные по результатам натурального эксперимента [4, 10], то степень достоверности результатов ИД в значительной степени повышается. Именно такой подход был использован нами в разработанном алгоритме идентификации повреждений в упругом стержне.

Известен также другой подход к решению задач ИД простых балочных структур на основе методов теории возмущений и построения алгоритмов минимизации индикаторов норм сходимости с использованием метода Дэвидона-Флетчера-Пауэлла [11]. В этом исследовании рассмотрены матрицы собственных векторов и собственных значений балочной конструкции. Показано, что разное число разбивки балки на нечётное число элементов позволяет обеспечить быструю сходимость счёта для повреждений (например, трещины) как малой, так и большой глубины. Результаты вычислений были сведены к определению изменений только одного параметра — модуля упругости различных элементов. Остается не исследованным вопрос, на сколько этот метод можно применить для анализа спектра частот и форм различных мод колебаний с учётом того, что алгоритм нелинейной оптимизации многих переменных (квази-ньютоновское приближение) имеет тенденцию «застевать» в

локальных минимумах. Исследования показывают, что для простой балки расчет одного параметра (локации) требует большого объема вычислений, при этом возникают неопределенности в уровне достоверности результатов. Вследствие этого преимущество этого метода ИД по сравнению с конечно-элементным или аналитическими методами не очевидно.

Среди различных методов решения задач ИД в простых стержневых элементах конструкций к наиболее исследованным относятся следующие:

– частотный метод ИД, основанный на анализе собственных частот колебаний элементов конструкций (FBDD — frequency-based damage detection);

– метод ИД, базирующийся на анализе форм различных мод колебаний (MSBDD — mode shape-based damage detection).

Анализ различных подходов к решению задач ИД показывает, что исследование параметров поврежденности вызывает значительные, в т.ч. вычислительные трудности. В связи с этим выбирается наиболее простой и одновременно с этим надежный диагностический признак идентификации, базирующийся на применении метода свободных колебаний [12], основанный на анализе частотных характеристик.

Авторами в [13] был предложен интегральный диагностический признак ИД в стержневых конструкциях. Показано, что на его основе с помощью модального анализа на примере использования КЭ метода можно решить задачу ИД в элементах стержневых конструкций с повышенной степенью достоверности. Для численной реализации такого подхода был разработан алгоритм многопараметрической идентификации дефектов стержневых конструкций, описана схема и пример его реализации с последующей графической визуализацией результатов определения резонансных частот, особенностей параметров собственных форм колебаний, местоположения дефектов и их размеров.

## 1. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ

Данный алгоритм реализован как часть комплекса вибродиагностики многопараметрической идентификации дефектов в рамных стержневых конструкциях.

Базовым блоком алгоритма является создание банка (массива) данных о динамическом состоянии конструкции. Параметры состояния конструкции могут быть получены путем совокупности расчетного моделирования и экспериментального подхода [10].

Процедура алгоритма идентификации дефектов описана как последовательность следующих этапов:

1. Проведение натурального эксперимента с помощью измерительно-информационного комплекса, включающего в себя: конструкцию с испытуемым образцом, датчики, устройство усиления, передающий тракт, устройства сбора и обработки информации с наличием программного обеспечения;
2. Возбуждение колебаний в испытуемом образце и сбор информации о собственных частотах и формах колебаний.
3. Обработка данных о параметрах колебаний, выдача результата измерений и модельного расчета.

Результатом являются: координаты местоположения дефекта и его величины.

На рис. 1 представлена схема алгоритма многопараметрической идентификации дефектов в стержневой конструкции (СК).

На первом этапе производится подготовка численной и натурной моделей, устройств управления колебаниями и сбора данных на базе компьютера. Происходит постановка задачи сбора первичной информации амплитудно-частотных характеристик СК. С помощью блока управления колебаниями происходит ударное или вынужденное возбуждение колебаний СК на частоте  $\omega_i$  в некоторой точке конструкции  $x_k$ . После стабилизации колебательного процесса осуществляется сбор параметров колебаний с помощью датчиков в нескольких точках модели. Итогом работы является массив данных  $U_i(x_k, \omega_i)$  в некоторой точке конструкции  $x_k$ , являющийся амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) конструкции в этой точке. На следующем этапе происходит вывод графического отображения зависимости  $U_i(x_k, \omega_i)$  и сохранение данных в файл, осуществляется обработка измеренных АЧХ  $U_i(x_k, \omega_i)$  и определяются резонансные частоты  $\omega_{ri}$ .

На следующем этапе производится сбор информации о формах собственных колебаний на выделенных резонансных частотах. С помощью блока управления колебаниями происходит возбуждение колебаний на соответствующей резонансной частоте  $\omega_{ri}$ . Измеряются амплитуды колебаний в точках с различным расположением по длине конструкции. Объединив в массив эти данные получаем форму колебаний конструкции в  $K$  точках  $U_i(x, y, z, \omega_i)$ ,  $V_i(x, y, z, \omega_i)$ ,  $W_i(x, y, z, \omega_i)$  на соответствующей резонансной частоте  $\omega_{ri}$ . Затем производится пересчет первичных амплитудных характеристик соответствующей формы колебаний для каждой точки модели путем расчёта углов между касательными в точках сбора амплитуд, и построение массива углов  $\varphi_{ri}(x_k, \omega_{ri})$  и кривизны  $U''_{ri}(x_k, \omega_{ri})$ . Далее осуществляется сохранение данных о соответствующей форме колебаний, углов касательных и ее резонансной частоте в банке данных о конструкции.

По завершению выполнения процедуры измерения параметров форм колебаний, расчета углов изгиба  $\bar{\varphi}_i(x, y, z, \omega_i)$  в точках модели и параметров кривизны  $\bar{U}''_i(x, y, z, \omega_i)$  графиков этих форм осуществляется переход к этапу определения локации дефекта конструкции.

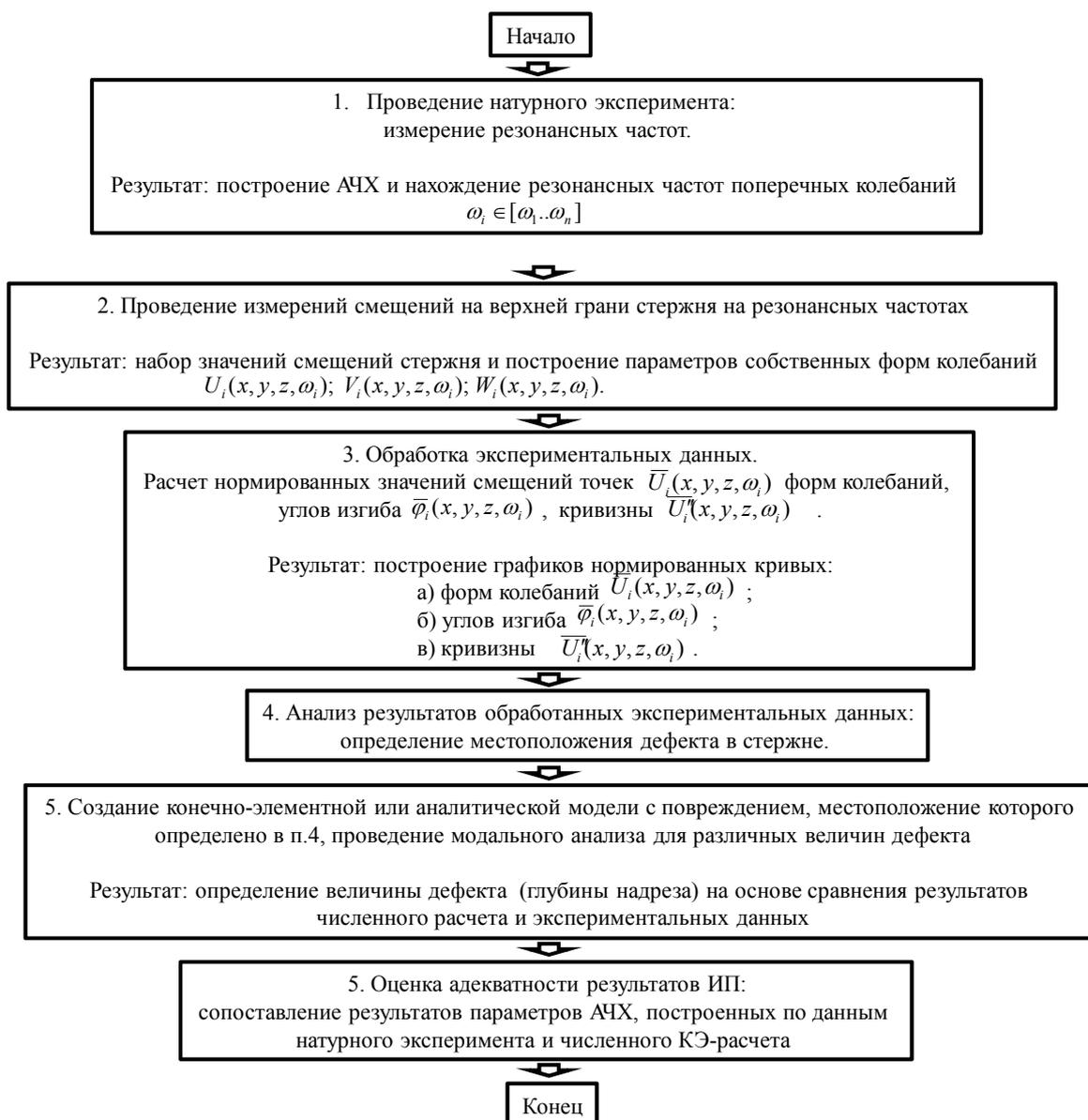


Рис. 1. Алгоритм многопараметрической идентификации дефектов в стержневой конструкции

На последующем этапе создается адекватная конечно-элементная модель конструкции с дефектом, локализованным в определенном ранее месте. На этапе моделирования колебаний конструкции решается задача об определении величины дефекта. При этом для данного расположения дефекта решается задача о собственных колебаниях конструкции при его различных размерах. Определяется чувствительность частот к наличию дефекта, выбираются для исследования наиболее чувствительные моды колебаний, производится анализ особенностей форм колебаний с целью определения местоположения  $L$  дефекта (в частности, надреза) в модели, его величины относительной жесткости  $C_{упр}$  и степени поврежденности (глубины  $\bar{t}$  надреза). В следующем блоке происходит исследование адекватности численной модели с

идентифицированными дефектами и экспериментальной. Результаты исследований выводятся в виде графической интерпретации о формах колебаний  $U_{ri}(x_k, \omega_{ri})$ , углов  $\varphi_{ri}(x_k, \omega_{ri})$ , кривизны  $U''_{ri}(x_k, \omega_{ri})$  в точках, вероятного местоположения  $L$  и глубины  $\bar{t}$  дефекта, производится сохранение в файл отчета о проделанной работе.

## 2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА

В качестве примера реализации алгоритма рассмотрена идентификация дефекта в стержневой конструкции, при этом данные натурального эксперимента заменялись результатами расчета в конечно-элементном комплексе ANSYS. Была построена полнотелая модель консольного стержня (длина  $L=250$  мм, высота поперечного сечения  $h=8$  мм, ширина  $a=4$  мм) с повреждением (дефект в виде поперечного надреза шириной 1 мм и абсолютной глубиной  $h_d=4$  мм), расположенным, в отстоящей от заземления точке стержня на расстоянии  $\bar{L}_d=0.25$ , где  $\bar{L}_d = L_d / L$ ,  $L_d$  — местоположение повреждения. Далее введем безразмерную координату  $\bar{x} = x / L$ . Относительная глубина повреждения  $\bar{t} = h_d / h = 0.5$  [6]. Рассматриваются поперечные колебания стержня.

Последующие действия выполняются, соответственно, по блокам алгоритма. В начале был проведен гармонический анализ колебаний стержня. Результаты этого анализа сохраняются в банке данных о параметрах амплитудно-частотных характеристик в различных точках стержня. На основе анализа АЧХ выявляются собственные резонансные частоты колебаний. На следующем этапе сохраняются значения поперечных смещений в различных точках стержня. Далее, анализируются смещения точек верхней поверхности стержня при собственных колебаниях. На рис. 2а приведена форма первой моды колебаний стержня с наличием повреждения. Вычисляются параметры форм колебаний (углы  $\varphi(\bar{x})$  между касательными (рис.2б) и кривизна  $U''(\bar{x})$  (рис.2в)). Аналогичные действия могут быть произведены при анализе других форм колебаний. Осуществляется их анализ с целью выявления характерных точек, в которых имеет место резкое («пикообразное») изменение на их графиках [14]. Координаты точек, имеющие выраженные изломы по длине стержня, совпадают с местоположением повреждения.

Анализ графиков параметров форм колебаний (рис.2 б, в) позволил сделать выводы о том, что с их помощью можно установить местоположение дефекта. В данном примере для случая 1-й моды колебаний определяем расположение дефекта в точке по длине стержня с максимальным перегибом в координате  $\bar{L}_d^* = 0.245$  (в данном случае звездочкой указывается найденная величина). Погрешность определения местоположения дефекта рассчитывается по формуле:

$$\Delta = \frac{|\bar{L}_d^* - \bar{L}_d|}{\bar{L}_d} 100\% = \frac{|0.245 - 0.25|}{0.25} 100\% = 2\% .$$

После идентификации местоположения дефекта производится идентификация величины дефекта. Для этого исследуем влияние величины дефекта на параметры формы колебаний. Для сопоставления параметров формы 1-й моды колебаний для различных величин дефекта (надреза) при выявленном местоположении строятся графики зависимости параметров формы колебаний (рис. 3а), зависимостей величины дефекта от угла  $\varphi(\bar{x})$  (рис. 3б) между касательными и кривизны  $U''(\bar{x})$  (рис. 3в).

Для оценки влияния глубины повреждения (надреза) на характер кривых параметров форм колебаний (рис. 3б, в) в зоне «излома» (вероятного местоположения дефекта) были построены графики зависимостей угла между касательными  $\varphi(\bar{L}_d)$  и кривизны  $U''(\bar{L}_d)$  (рис. 4).

Анализ значений угла между касательными, например, для 1-й формы колебаний, позволяет определить величину дефекта (надреза)  $\bar{t}$ . Из графика на рис. 2б видно, что в точке наибольшего перегиба («излома») формы колебаний ( $\bar{L}_d^* = 0.245$ ) угол между касательными в этой точке составляет  $\varphi(\bar{L}_d) = 167.8$  град, а кривизна в точке перегиба (рис. 2в)  $U''(\bar{L}_d) = 7.1$  усл. ед. Анализируя графики зависимостей угла между касательными и кривизны в зоне «излома» от относительной глубины надреза (рис. 4) определяем относительную величину дефекта (глубину надреза):  $\bar{t}^* = 0.48$ .

Погрешность определения величины дефекта (глубины надреза) для данного случая при сопоставлении с исходными данными ( $\bar{t} = 0.5$ ) вычисляется следующим образом:

$$\Delta = \frac{|\bar{t}^* - \bar{t}|}{\bar{t}} 100\% = \frac{|0.48 - 0.5|}{0.5} 100\% = 4\% .$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

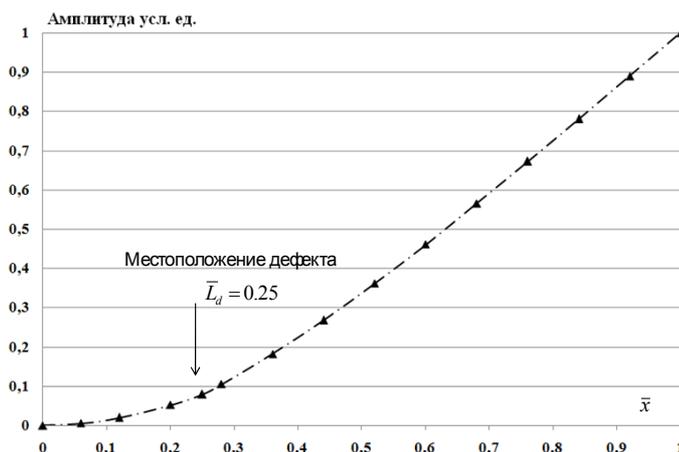
1. Разработанный алгоритм многопараметрической идентификации дефектов в стержневой конструкции позволяет рассчитать параметры трещины (открытого надреза) в консольно-закрепленном упругом стержне, в т.ч. глубину и местоположение трещины с меньшими погрешностями, чем при использовании других алгоритмов.

2. Снижение погрешности в определяемых параметрах идентификации стержня достигается благодаря использованию в алгоритме более широкого набора исходных (также и экспериментальных) данных (не только значений частот резонансов, но и параметров собственных форм колебаний стержня), а так же в силу применения в алгоритме интегрального диагностического признака идентификации.

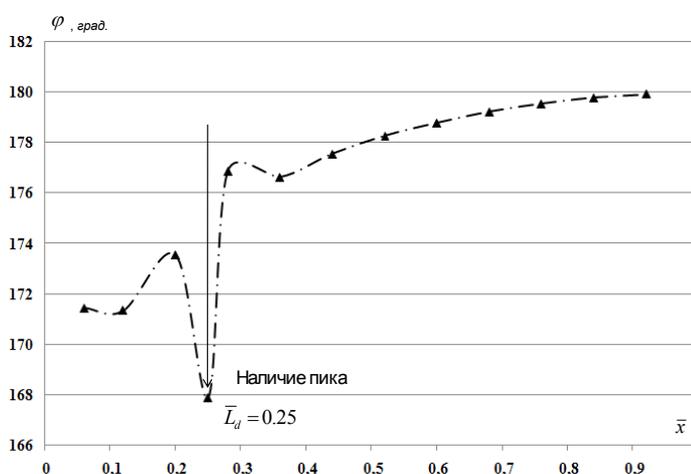
3. Предложенный алгоритм может быть положен в основу для разработки методики технической диагностики технического состояния строительных конструкций консольного типа.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 10-08-00093-а, 10-08-01296-а, 12-08-90815 мол\_рф\_нр).

а)



б)



в)

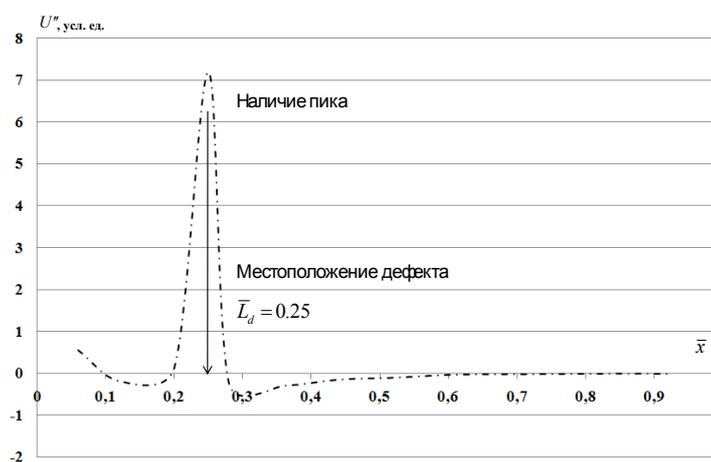


Рис. 2. а) форма 1-й моды колебаний стержня с наличием дефекта относительной глубиной  $\bar{i} = 0.5$  и его местоположении  $\bar{L}_d = 0.25$ ; б) углы различных в точках формы колебаний, образованные между касательными  $\varphi(\bar{x})$ ; в) кривизна в различных точках формы колебаний  $U''(\bar{x})$

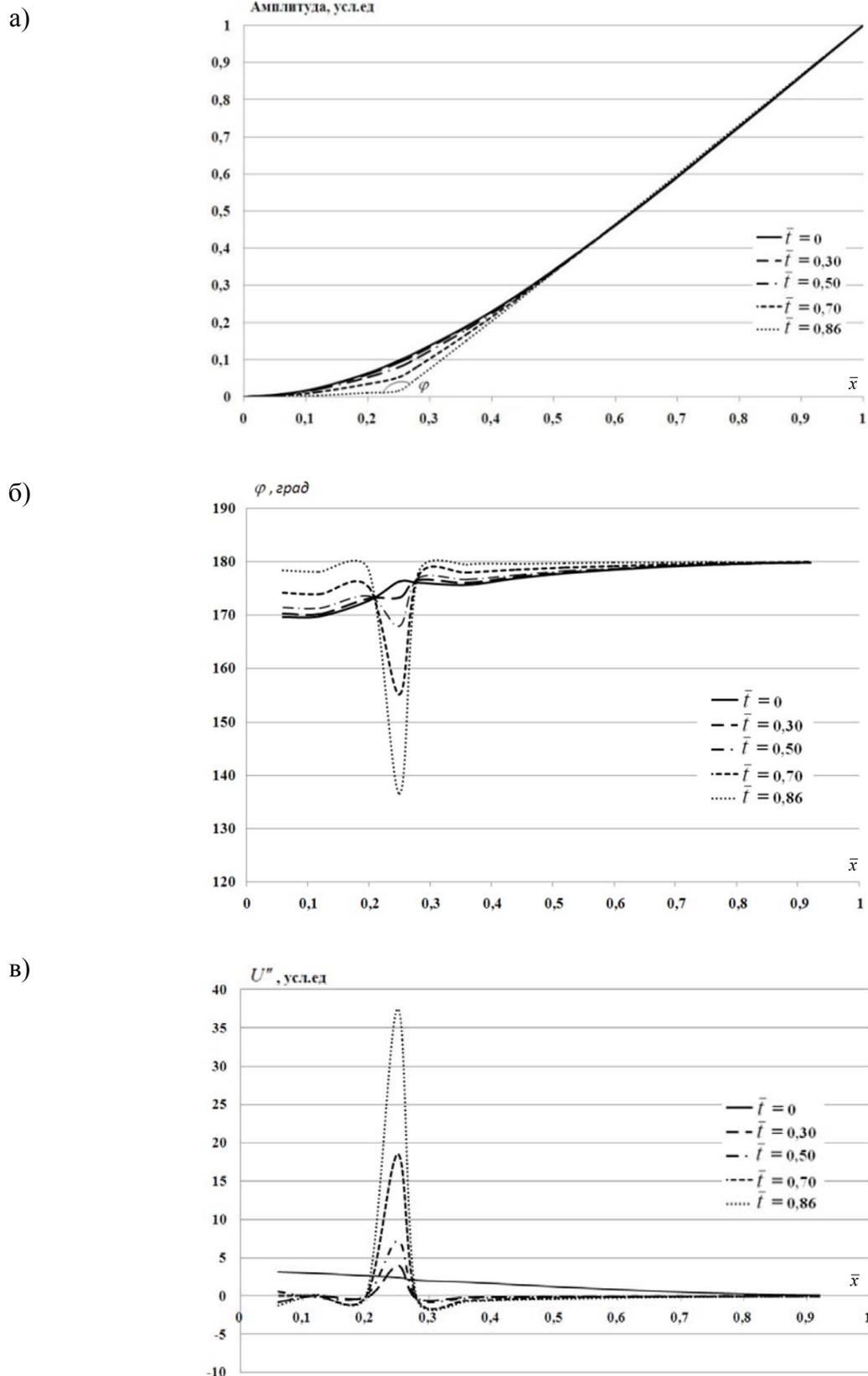


Рис. 3. Графики форм 1-й моды колебаний (а) и ее параметров: углов между касательными  $\varphi(\bar{x})$  (б) и кривизны  $U''(\bar{x})$  в различных точках (в) при разных значениях глубины надреза  $\bar{t}$  и его местоположении  $\bar{L}_d^* = 0.245$

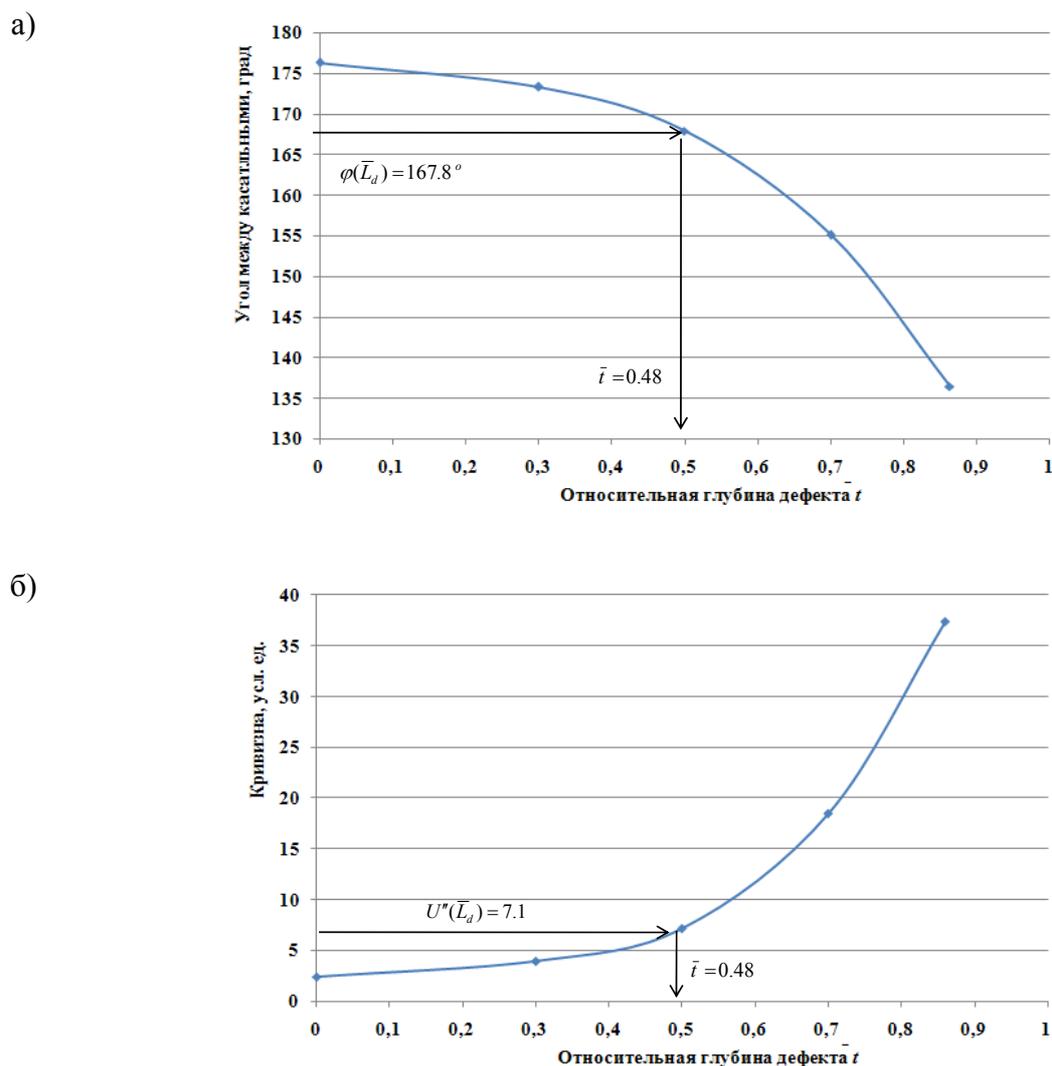


Рис. 4. Графики зависимости величины относительной глубины надреза от параметров форм колебаний в зоне «излома»: угла  $\varphi(\bar{L}_d)$  между касательными (а) и кривизны  $U''(\bar{L}_d)$  (б)

ЛИТЕРАТУРА

1. Dimarogonas A.D. 1996. Vibration of cracked structures: a state of the art review. Eng. Fract.Mech. 55, 831–857. (doi:10.1016/0013-7944(94)00175-8).
2. Friswell M.I. Damage identification using inverse methods // Phil. Trans. R. Soc. A (2007) 365, 393–410. (doi:10.1098/rsta.2006.1930.).
3. Бовсуновский О.А. Конечно-элементная модель для исследования колебаний стержня с закрывающейся трещиной // Пробл. прочности. - 2008. -№ 5. - С. 114 - 120.
4. Постнов В.А. Определение повреждений упругих систем путем математической обработки частотных спектров полученных из эксперимента // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2000. №6. С. 155-160.

5. Постнов В.А. Использование методов регуляризации Тихонова для решения задач идентификации упругих систем // *Механика твердого тела*. 2010. №1. с. 64-71.
6. Акопян В.А., Черпаков А.В., Соловьев А.Н., Кабельков А.Н., Шевцов С.Н. Аналитический и конечно-элементный анализ параметров колебаний в стержне с повреждением // *Изв. Вузов “Северо-Кавказский регион техн. науки”*. 2010, №5, с. 21-28.
7. Akopyan V., Soloviev A. and Cherpakov A. Parameter Estimation of Pre-Destruction State of the Steel Frame Construction Using Vibrodiagnostic Methods. // *Mechanical Vibrations: Types, Testing and Analysis*. Nova Science Publishers, Inc. Edit. A.L. Galloway. Chapter 4. pp.147-161. 2010. N-Y. ISBN: 978-1-61668-217-0.
8. Moradi S., Razi P., Fatahi L. On the application of bees algorithm to the problem of crack detection of beam-type structures // *Computers and Structures* t. 89. 2011, pp. 2169–2175.
9. Krasnoshchekov A.A., Sobol B.V., Solov'ev A.N., Cherpakov A.V. Identification of Crack Like Defects in Elastic Structural Elements on the Basis of Evolution Algorithms // ISSN 1061\_8309, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2011, v. 47, No. 6, pp. 412–419.
10. Черпаков А.В., Акопян В.А., Рожков Е.В., Соловьев А.Н. Идентификация параметров поврежденности в упругом стержне с использованием конечно-элементного и экспериментального анализа мод изгибных колебаний // *Вестник ДГТУ*. 2011. №3. С.312-318.
11. Wong C.N., Huang H-Z., Xiang J. at al. Perturbed eigenvalue problem with Davidon-Fletcher-Powell quasi-Newton approach for damage detection of fixed-fixed beam // *Mathematic and mechanic of solid*. 2011, v. 16 (2), pp. 228-247.
12. Ваньков Ю.В., Казаков Р.Б., Яковлева Э.Р. Собственные частоты изделия как информативный признак наличия дефектов [Электронный ресурс] // *Техническая акустика*. – Электрон. журн. – 2003. – 5. Режим доступа: <http://www.ejta.org>, свободный.
13. Акопян В.А., Черпаков А.В., Рожков Е.В., Соловьев А.Н. Интегральный диагностический признак идентификации повреждений в элементах стержневых конструкций // *Контроль. Диагностика*. 2012. № 7, С. 50-56.
14. Акопян В.А., Соловьев А.Н., Черпаков А.В., Шевцов С.Н. О деформационном признаке идентификации повреждений, основанном на анализе форм собственных колебаний кантилевера с надрезом // *Дефектоскопия*. 2013 (принято в печать).