



ISSN: 2658–5782

Номер 1

Январь–Март 2019

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





Обзор исследований по вычислительной диагностике локальных дефектов элементов конструкций¹

Хакимов А.Г.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

Стержни, балки, валы, трубопроводы, круглые пластины, мембраны являются деталями конструкций, в которых могут образовываться локальные дефекты типа трещин, вмятин, полостей, местной коррозии. Приводится обзор исследований А.Г. Хакимова по диагностике локальных дефектов. Получено, что по двум собственным частотам продольных колебаний можно определить местоположение и параметр надреза, характеризующий его размер; по трем низшим собственным частотам продольных колебаний можно определить начальную координату и величину прикрепленной распределенной массы к ступенчатому стержню, а также отношение площадей; решение обратной задачи для протяженных стержней позволяет определить координату надреза и параметр, содержащий его глубину и длину, по данным падающей и отраженной волн в месте наблюдения; определяется отражение от воздушной полости и прохождение продольной затухающей бегущей волны в трубопроводе, погруженном в вязкую жидкость, а решение обратной задачи позволяет определить координату воздушной полости и ее длину по данным отраженной волны в месте наблюдения; по двум собственным частотам крутильных колебаний определены начальная координата и длина продольного сквозного радиального разреза полого вала; по трем собственным частотам крутильных колебаний определяются координата, длина и параметр надреза бурильной колонны; рассматривается отражение от распределенной массы, прикрепленной к трубопроводу, и прохождение изгибной бегущей волны, где получена зависимость решения от начальной координаты распределенной массы и ее величины, а также решена обратная задача определения начальной координаты распределенной массы и ее величины по данным отраженной волны в точке наблюдения; по двум собственным частотам поперечных колебаний определяются радиус и толщина утонченной центральной области мембраны; по трем собственным частотам изгибных колебаний определяются радиус, толщина утонченной центральной области плиты и величина прикрепленной распределенной массы; по трем частотам изгибных колебаний можно определить скоростной параметр, относительную массу продукта на единицу длины трубопровода и относительную массу отложений на стенках трубопровода и, как следствие, массовый расход жидкости по трубопроводу.

Ключевые слова: стержень, вал, балка, мембрана, пластина, трубопровод, дефект, вычислительная диагностика

1. Введение

Стержни, балки, валы, трубопроводы, круглые пластины, мембраны являются деталями конструкций, в которых могут образовываться локальные дефекты типа трещин, вмятин, полостей, местной коррозии. Важной является задача их ранней диагностики. Математические модели локальных де-

фектов элементов конструкций являются основой для вычислительной диагностики повреждений и технологий автоматизированного определения зарождающихся дефектов. Для выявления дефекта в стержне конечной длины и его местоположения используются собственные частоты колебаний. В случае стержней большой длины по сравнению с длинами волн такой способ определения дефектов оказывается неудобным. Более подходящим является метод по проходящим и отраженным от них волнам. Идентификация указанных дефектов производится с помощью собственных частот ко-

¹Работа поддержана средствами государственного бюджета по госзадаанию на 2019–2022 гг. (№ 0246-2019-0088) и грантами РФФИ (№№ 17-41-020400-р_а, 18-01-00150-а)

лебаний, а также проходящих и отраженных волн. Локальные дефекты моделируются условиями сопряжения, а полости и трещины — непрерывными участками стержня с измененными жесткостью, площадью поперечного сечения и плотностью. Существует также метод, основанный на моделировании дискретной системой жестко закрепленных масс, невесомых пружин или конечно-элементной моделью и описываемой матричным обыкновенным дифференциальным уравнением по времени с постоянными коэффициентами [1, 2]. Такое уравнение имеет конечное число собственных значений, а собственным формам колебаний отвечают собственные векторы. Исследования, выполненные с помощью такого метода, не являются сложными [3]. Здесь описываются работы, посвященные идентификации дефектов распределенных механических систем с помощью собственных частот колебаний, а также проходящих и отраженных волн. Рассматриваются стержни, валы, балки, круглые мембраны и пластины, трубопроводы, которые моделируются непрерывной системой и описываются набором уравнений в частных производных по времени и по одной или нескольким пространственным координатам. Локальные дефекты моделируются условиями сопряжения. Для трещин, как правило [1], используются условия сопряжения для безмассовых пружин, а для полостей — условия для сосредоточенных масс (с отрицательным значением). Приводится обзор работ по идентификации дефектов распределенных механических систем с помощью собственных частот колебаний, а также проходящих и отраженных волн.

2. Упругие стержни

В работах [4] и [5] в статической и динамической постановках определяются место и размеры поперечного надреза в вертикальной штанге длиной L , растянутой под действием собственного веса и силы, приложенной на нижнем конце (рис. 1). В точке C с координатой x_c имеется надрез длиной l . Площади поперечного сечения неповрежденной штанги — F , а в зоне повреждения — f . Рассматривается только напряженно-деформированное состояние в пределах упругости для тонкой штанги. Надрез является моделью повреждения штанги, в частности, поперечной раскрытой трещины. Поскольку трещина появляется в результате развития незначительного зародыша, причем необязательно в наиболее напряженном сечении, то предполагается, что надрез может быть в любом месте по длине штанги. Показано, что по двум собственным частотам можно определить местоположение и параметр надреза, характеризующий его размер.

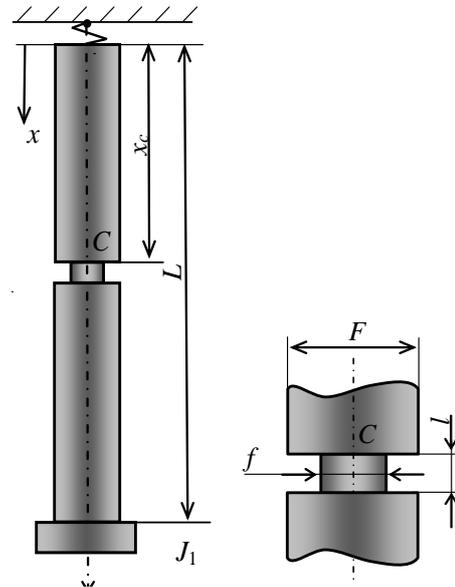


Рис. 1. Расчетная схема

В [6] исследуются собственные продольные колебания ступенчатого стержня с присоединенной распределенной массой. Показано, что увеличение начальной координаты распределенной массы приводит к возрастанию собственных частот колебаний в рассматриваемом диапазоне параметров. Установлено, что первая собственная частота колебаний с ростом отношения площадей увеличивается, а вторая и третья собственные частоты уменьшаются. Решение обратной задачи позволяет по трем нижшим собственным частотам продольных колебаний определить начальную координату и величину прикрепленной распределенной массы к ступенчатому стержню, а также отношение площадей. Как уже было отмечено выше, определение местоположения и параметров дефектов с помощью собственных частот удобно для механических распределенных систем конечной длины. Если же объект (например, стержень) бесконечен, то такой метод оказывается неудобным, т.к. спектр такой задачи является не дискретным, а непрерывным. Более удобным будет метод, основанный на использовании проходящих и отраженных волн.

Так, например, в [7] рассмотрена задача обнаружения дефектов в протяженных объектах типа штанговых колонн нефтедобывающих скважин и магистральных трубопроводных систем. В таких объектах не все участки могут быть доступны для визуального осмотра и приборного диагностирования. Штанговая колонна соприкасается с водонефтяной смесью, а трубопровод может быть проложен в болотистой местности. В первом приближении влияние этой среды может быть описано

моделью вязкой жидкости. При доступности визуального осмотра не во всех случаях представляется возможным определение зарождающихся повреждений конструкции. В связи с этим сочетание приборного диагностирования в доступном месте (точке наблюдения) и моделирования отраженных волн от удаленного повреждения протяженных объектов представляет определенный интерес. Предполагается, что из удаленной точки стержня круглого поперечного сечения радиусом R слева направо распространяется продольная волна смещения, амплитуда и частота которой в точке наблюдения O с координатой $x = 0$ равны U и ω . Стержень при этом находится в вязкой несжимаемой жидкости. В точке с координатой x_c имеется надрез длиной l . Длина надреза l значительно меньше длины волны L . В пределах надреза с короткой длиной и вблизи него имеется сложное пространственное напряженно-деформированное состояние. В работе для простоты принимается одноосное растяжение–сжатие. Получена зависимость решения от параметров надреза. Решение обратной задачи позволяет определить координату надреза и параметр, содержащий его глубину и длину, по данным падающей и отраженной волн в месте наблюдения.

В [8] исследуется отражение от поперечного надреза и прохождение продольной затухающей бегущей волны в стержне, погруженном в вязкую жидкость. Использована простейшая модель напряженно-деформированного состояния в зоне надреза. Получена зависимость решения от параметров надреза и характеристик затухания в материале стержня и окружающей жидкости. Решение обратной задачи позволяет определить координату надреза и параметр, содержащий его глубину и длину, по данным падающей и отраженной волн в месте наблюдения.

В [9] и [10] изучается отражение и прохождение продольной волны, распространяющейся по бесконечному стержню с поперечным надрезом. Получена зависимость отраженной и проходящей волн от параметров надреза. Также решена обратная задача.

В [11] определяется отражение от воздушной полости и прохождение продольной затухающей бегущей волны в трубопроводе, погруженном в вязкую жидкость. Получена зависимость решения от параметров воздушной полости, характеристик затухания в материале трубопровода и окружающей жидкости. Решение обратной задачи позволяет определить координату воздушной полости и ее длину по данным отраженной волны в месте наблюдения.

3. Валы

В [12] и [13] по трем собственным частотам крутильных колебаний определены место и размеры повреждения в виде поперечного надреза вала. Исследованы собственные крутильные колебания полого вала с продольным сквозным радиальным разрезом [14]. Показано, что при расположении разреза в узле колебаний собственные частоты не зависят от длины разреза. С возрастанием длины разреза низшие частоты собственных крутильных колебаний уменьшаются. Для продольного сквозного разреза полого вала изменения собственных частот крутильных колебаний значительны по сравнению с изменениями аналогичных частот для вала с поперечным надрезом. По двум собственным частотам крутильных колебаний определены начальная координата и длина продольного сквозного радиального разреза полого вала.

В [15] и [16] рассматриваются собственные колебания вала турбокомпрессора и вала турбогенератора с моделью искусственного дефекта, где даны решения обратной задачи определения начальной координаты и размера поперечного надреза вала по трем собственным частотам крутильных колебаний.

Работа [17] посвящена обратной задаче о собственных крутильных колебаниях бурильной колонны. Наибольшее число отказов оборудования вызвано обрывами бурильных труб. Продольный разрез или трещина в стержне не определяются по собственным частотам продольных или изгибных колебаний, так как в зоне разреза не происходит уменьшения площади и осевых моментов инерции поперечного сечения стержня. Поэтому здесь рассматриваются собственные крутильные колебания бурильной колонны с повреждением в виде продольного сквозного радиального разреза и с дефектом в виде надреза. Получено, что при расположении разреза или надреза в узле колебаний собственные частоты не зависят от длины разреза или надреза. С возрастанием длины разреза или надреза низшие частоты собственных крутильных колебаний уменьшаются. Для продольного сквозного разреза бурильной колонны изменения собственных частот крутильных колебаний значительны по сравнению с изменениями аналогичных частот для бурильной колонны с поперечным надрезом. По двум собственным частотам крутильных колебаний определяются начальная координата и длина продольного сквозного радиального разреза бурильной колонны. По трем собственным частотам крутильных колебаний определяются координата, длина и параметр надреза бурильной колонны.

Собственные крутильные колебания трехэле-

ментного вала исследуются в [18]. Получено, что с возрастанием параметра жесткости сечения вала на втором участке частоты собственных крутильных колебаний стержня увеличиваются. А с ростом полярного момента инерции вала на втором участке частоты собственных крутильных колебаний вала уменьшаются. Зависимости круговых частот крутильных колебаний вала от координаты начала второго участка и длины этого участка имеют периодический характер. По четырем частотам свободных крутильных колебаний можно определить параметр жесткости, полярный момент инерции вала на втором участке, начальную координату и длину этого участка.

В [19] рассматриваются отражение и прохождение крутильной волны, распространяющейся по бесконечному стержню с искусственным дефектом. Получена зависимость отраженной и проходящей волн от параметров надреза. Решение обратной задачи позволяет определить координату повреждения стержня и параметр, содержащий глубину и длину дефекта, по характеристикам падающей и отраженной волн в месте наблюдения.

4. Балки

В [20] по трем собственным частотам изгибных колебаний определяются координата надреза, его глубина и длина. По двум собственным частотам изгибных колебаний определяются коэффициенты жесткости опор консольной балки в [21]. А при известной координате надреза и его длине по собственной частоте определяется его глубина.

В [22] показано, что по первой собственной частоте изгибных колебаний балки можно сделать вывод о наличии дефектов. По трем собственным частотам изгибных колебаний балки определяются координата надреза, его глубина и длина.

В [23] рассматривается отражение от распределенной массы, прикрепленной к трубопроводу, и прохождение изгибной бегущей волны. Получена зависимость решения от начальной координаты распределенной массы и ее величины, а также решена обратная задача определения начальной координаты распределенной массы и ее величины по данным отраженной волны в точке наблюдения.

Изучается отражение от точечной воздушной полости и прохождение длинной изгибной бегущей волны в трубопроводе в [24]. Получена зависимость решения от координаты воздушной полости и величины отрицательной массы. Решение обратной задачи позволяет определить координату воздушной полости и величину отрицательной массы по данным отраженной волны в точке наблюдения.

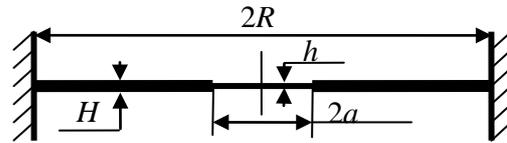


Рис. 2. Расчетная схема мембраны с утонченной центральной областью

В [25] рассматривается отражение от распределенной массы, прикрепленной к трубопроводу, и прохождение короткой изгибной бегущей волны. Получена зависимость решения от начальной координаты распределенной массы и ее величины. Решение обратной задачи позволяет определить начальную координату распределенной массы и ее величину по данным отраженной волны в точке наблюдения.

5. Круглая мембрана

Устройства, содержащие мембраны, широко применяются в акустических системах. Диагностика мембраны по собственным частотам поперечных колебаний является актуальной задачей. Например, в случае разрыва барабанной перепонки или наличия в ней отверстия ее колебания могут нарушаться, что приводит, в свою очередь, к нарушению слуха. Рассматриваются поперечные колебания круглой мембраны радиуса R и толщины H . Предполагается, что в мембране имеется центральный круговой участок с меньшей толщиной (рис. 2). Этот центральный круговой участок моделирует ее повреждение. Задача состоит в определении радиуса a и толщины h центральной области мембраны по двум низшим частотам ее поперечных колебаний. В [26] по двум собственным частотам поперечных колебаний определяются радиус и толщина утонченной центральной области мембраны.

6. Круглая пластина

Круглые пластины применяются в технике. Диагностика пластины по собственным частотам изгибных колебаний является актуальной задачей. Наиболее распространенным элементом строительных конструкций является плита, защемленная по контуру, поэтому здесь рассматривается задача определения параметров плиты с утонченной центральной областью по собственным частотам свободных изгибных колебаний.

Предполагается, что в плите имеется центральный круговой участок с меньшей толщиной. Этот центральный круговой участок моделирует ее повреждение. В [27] по двум собственным частотам

изгибных колебаний определяются радиус и толщина утонченной центральной области пластины.

В [28] рассматриваются изгибные колебания круглой плиты, в которой имеется центральный круговой участок с меньшей толщиной и прикрепленной распределенной массой. Используется уравнение, определяющее форму осесимметричных изгибных колебаний плиты постоянной толщины. Получено, что с уменьшением толщины центральной части плиты и с увеличением величины прикрепленной распределенной массы происходит уменьшение низших частот колебаний. По трем собственным частотам изгибных колебаний определяются радиус, толщина утонченной центральной области плиты и величина прикрепленной распределенной массы.

7. Трубопроводы

Работа [29] посвящена решению простейшей задачи эрозионно-коррозионного износа трубопроводов. В процессе равномерной коррозии стенок трубопровода происходит уменьшение толщины стенок основного металла трубы и увеличение толщины продуктов коррозии на стенках трубопровода. Трубопроводы могут содержать отложения на стенках. Механизм эрозионно-коррозионного износа трубопроводов характеризуется тем, что одновременно с утончением стенок на одних участках происходит формирование отложений продуктов коррозии на других. Продукты коррозии также могут оставаться по месту произошедшей коррозии. Трубопровод на внутренней поверхности имеет продукты коррозии на стенках и жидкость под давлением. В работе предполагается, что продукты коррозии распределены по внутренней поверхности трубопровода равномерно, и вдоль нейтральной линии действует постоянная продольная сила. Трубопровод, защемленный по краям, находится под давлением и действием растягивающей силы, имеет продукты коррозии на стенках. Исследованы собственные изгибные колебания трубопровода с движущейся жидкостью, находящегося под действием растягивающей силы и защемленного по краям. Использовано уравнение изгибных колебаний трубопровода по модели Кирхгоффа и граничные условия для защемленного по краям трубопровода. С помощью формул Феррари определяются волновые числа. Решена прямая задача определения собственных частот изгибных колебаний трубопровода. Получено, что с увеличением скоростного параметра и погонной массы продукта и продуктов коррозии на стенке трубопровода происходит уменьшение собственных частот изгибных колебаний трубопровода. Решена также об-

ратная задача, где по трем низшим частотам изгибных колебаний находятся скоростной параметр, относительная масса продукта на единицу длины трубопровода и относительная масса отложений на стенках трубопровода. По трем частотам изгибных колебаний можно определить скоростной параметр, относительную массу продукта на единицу длины трубопровода и относительную массу отложений на стенках трубопровода и, как следствие, массовый расход жидкости по трубопроводу. Полученные результаты могут быть использованы для акустического метода диагностики трубопровода.

8. Заключение

По двум собственным частотам продольных колебаний можно определить местоположение и параметр надреза, характеризующий его размер.

По трем низшим собственным частотам продольных колебаний можно определить начальную координату и величину прикрепленной распределенной массы к ступенчатому стержню, а также отношение площадей.

Решение обратной задачи для протяженных стержней позволяет определить координату надреза и параметр, содержащий его глубину и длину, по данным падающей и отраженной волн в месте наблюдения.

Определяется отражение от воздушной полости и прохождение продольной затухающей бегущей волны в трубопроводе, погруженном в вязкую жидкость. Решение обратной задачи позволяет определить координату воздушной полости и ее длину по данным отраженной волны в месте наблюдения.

По двум собственным частотам крутильных колебаний определены начальная координата и длина продольного сквозного радиального разреза полого вала.

По трем собственным частотам крутильных колебаний определяются координата, длина и параметр надреза бурильной колонны. По четырем частотам свободных крутильных колебаний можно определить параметр жесткости, полярный момент инерции вала на втором участке, начальную координату и длину этого участка.

Рассматривается отражение и прохождение крутильной волны, распространяющейся по бесконечному стержню с искусственным дефектом. Решение обратной задачи позволяет определить координату повреждения стержня и параметр, содержащий глубину и длину дефекта, по характеристикам падающей и отраженной волн в месте наблюдения.

Рассматривается отражение от распределен-

ной массы, прикрепленной к трубопроводу, и прохождение изгибной бегущей волны. Получена зависимость решения от начальной координаты распределенной массы и ее величины, а также решена обратная задача определения начальной координаты распределенной массы и ее величины по данным отраженной волны в точке наблюдения.

По двум собственным частотам поперечных колебаний определяются радиус и толщина утонченной центральной области мембраны.

По трем собственным частотам изгибных колебаний определяются радиус, толщина утонченной центральной области плиты и величина прикрепленной распределенной массы.

По трем частотам изгибных колебаний можно определить скоростной параметр, относительную массу продукта на единицу длины трубопровода и относительную массу отложений на стенках трубопровода и, как следствие, массовый расход жидкости по трубопроводу. Полученные результаты могут быть использованы для акустического метода диагностики трубопровода.

Список литературы

- [1] Gladwell G.M.L. Inverse Problems in Vibration. 2nd ed. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2004. (Русский перевод: Гладвелл Г.М.Л. Обратные задачи теории колебаний. М. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2008).
- [2] Chu M.T., Golub G.H. Inverse Eigenvalue Problems: Theory, Algorithms, and Applications. Oxford University Press, USA, 2005. 406 p.
- [3] Ахтямов А. М. Диагностирование нагруженности механической системы // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2003. № 6. С. 60.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=23192890>
- [4] Ильгамов М.А. Диагностика повреждений вертикальной штанги // Труды Института механики Уфимского научного центра РАН. Уфа: Гилем, 2007. Вып. 5. С. 201–211.
- [5] Khakimov A.G. Damage Diagnostics in a Vertical Rod with Concentrated Masses on the Elastic Suspender // International Journal of Mechanics and Applications. 2012. Vol. 2, No. 5. P. 70–73.
[DOI: 10.5923/j.mechanics.20120205.03](https://doi.org/10.5923/j.mechanics.20120205.03)
- [6] Хакимов А.Г. О собственных продольных колебаниях ступенчатого стержня с распределенной присоединенной массой // Контроль. Диагностика. 2013. № 11. С. 9–13.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=20519086>
- [7] Ильгамов М.А., Хакимов А.Г. Отражение затухающей бегущей волны от надреза в стержне // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2011. № 4. С. 116–125.
[DOI: 10.3103/S0025654411040091](https://doi.org/10.3103/S0025654411040091)
- [8] Ильгамов М.А., Хакимов А.Г. Отражение продольной волны от надреза в стержне, погруженном в вязкую жидкость // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т. 3. № 3. С. 58–67.
[DOI: 10.7242/1999-6691/2010.3.3.27](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2010.3.3.27)
- [9] Ильгамов М.А., Хакимов А.Г. Отражение продольной бегущей волны в стержне с повреждением // Контроль. Диагностика. 2009. № 7. С. 43–48.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=12882467>
- [10] Ильгамов М.А., Хакимов А.Г. Отражение продольной бегущей волны от надреза в стержне // Техническая акустика. 2008. Т. 8. С. 16.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=12834434>
- [11] Ильгамов М.А., Хакимов А.Г. Отражение продольной волны от воздушной полости в трубопроводе // Известия Уфимского научного центра РАН. 2012. № 4. С. 15–21.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=18248314>
- [12] Хакимов А.Г. О собственных колебаниях вала с моделью искусственного дефекта // Дефектоскопия. 2010. № 6. С. 93–98.
[DOI: 10.1134/S1061830910060100](https://doi.org/10.1134/S1061830910060100)
- [13] Хакимов А.Г. Диагностика повреждений вала с маховиком // Труды Института механики Уфимского научного центра РАН. Уфа: Гилем, 2010. Вып. 7. С. 211–218.
<http://proc.uimech.org/uim2010.1.019>
- [14] Хакимов А.Г. О собственных крутильных колебаниях полого вала с продольным сквозным радиальным разрезом // Дефектоскопия. 2013. № 6. С. 32–37.
[DOI: 10.1134/S1061830913060041](https://doi.org/10.1134/S1061830913060041)
- [15] Хакимов А.Г. О собственных колебаниях вала турбокомпрессора с искусственным дефектом // ИВУЗ. Авиационная техника. 2011. № 1. С. 71–73.
[DOI: 10.3103/S106879981101017X](https://doi.org/10.3103/S106879981101017X)
- [16] Хакимов А.Г. О собственных колебаниях вала турбогенератора с моделью искусственного дефекта // Тяжелое машиностроение. 2012. № 4. С. 30–33.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=17705797>
- [17] Хакимов А.Г., Сатыев Э.И. О собственных крутильных колебаниях буровой колонны // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2014. № 6. С. 120–153.
[DOI: 10.17122/ogbus-2014-6-120-153](https://doi.org/10.17122/ogbus-2014-6-120-153)
- [18] Хакимов А.Г. К определению параметров трехэлементного вала по заданному спектру частот крутильных колебаний // Контроль. Диагностика. 2014. № 6. С. 29–34.
<http://elibrary.ru/item.asp?id=21541640>
- [19] Хакимов А.Г. Отражение крутильной бегущей волны в стержне с искусственным дефектом // Вычислительная механика сплошных сред. 2012. Т. 5. № 1. С. 114–119.
<http://elibrary.ru/item.asp?id=17650506>
- [20] Ильгамов М.А., Хакимов А.Г. Диагностика повреждений консольной балки с надрезом // Дефектоскопия. 2009. № 6. С. 83–89.
[DOI: 10.1134/S1061830909060072](https://doi.org/10.1134/S1061830909060072)
- [21] Ильгамов М.А., Хакимов А.Г. Диагностика закрепления и повреждений балки на упругих опорах // Контроль. Диагностика. 2010. № 9. С. 57–63.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=15247469>
- [22] Ильгамов М.А., Хакимов А.Г. Диагностика повреждений балки на шарнирных опорах // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2010. № 2. С. 42–48.
<http://journals.rudn.ru/structural-mechanics/article/view/10891/10327>
- [23] Хакимов А.Г. Отражение изгибной волны от распределенной массы, прикрепленной к трубопроводу // Математическое моделирование. 2013. Т. 25. № 6. С. 80–87.
[DOI: 10.1134/S2070048214010062](https://doi.org/10.1134/S2070048214010062)
- [24] Хакимов А.Г. Отражение длинной изгибной бегущей волны от точечной воздушной полости в трубопроводе // Контроль. Диагностика. 2012. № 4. С. 58–62.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=17761908>
- [25] Хакимов А.Г. Отражение короткой изгибной бегущей волны от распределенной массы, прикрепленной к трубопроводу // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН. 2012. Т. 9. № 2. С. 134–38.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=27174385>

- [26] Хакимов А.Г. О собственных колебаниях круглой мембраны с утонченной центральной областью // Контроль. Диагностика. 2011. № 4. С. 66–68.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=16336488>
- [27] Хакимов А.Г. О собственных колебаниях круглой плиты с утонченной центральной областью // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2011. № 3. С. 63–66.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=16778516>
- [28] Хакимов А.Г. О собственных колебаниях круглой плиты с утонченной центральной областью и прикрепленной распределенной массой // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2015. № 4. С. 38–44.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=23609755>
- [29] Хакимов А.Г. Определение массового расхода жидкости в трубопроводе и толщины отложений на его стенках по собственным частотам изгибных колебаний // Известия Уфимского научного центра РАН. 2016. № 3. С. 15–22.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=26586390>



Review of studies on the computational diagnosis of local defects of structural elements

Khakimov A.G.

Mavlyutov Institute of Mechanics UFRC RAS, Ufa, Russia

Rods, beams, shafts, pipelines, round plates, membranes are parts of structures in which local defects such as cracks, dents, cavities, local corrosion can be formed. Provides an overview of the research A. G. Khakimov for the diagnosis of local defects. It is received: 1. The two eigenfrequencies of the longitudinal oscillations can determine the location and the notch parameter characterizing its size. 2. The three lower eigenfrequencies of the longitudinal oscillations can determine the initial coordinate and the value of the attached distributed mass to the stepped rod, as well as the ratio of the areas. 3. The solution of the inverse problem for extended rods allows us to determine the coordinate of the incision and the parameter containing its depth and length, according to the incident and reflected waves at the observation site. 4. The reflection from the air cavity and the passage of a longitudinal damped traveling wave in a pipeline immersed in a viscous liquid are determined, and the solution of the inverse problem allows to determine the coordinate of the air cavity and its length according to the reflected wave at the observation site. 5. The initial coordinate and the length of the longitudinal through radial section of the hollow shaft are determined by the two eigenfrequencies of torsional vibrations. 6. The coordinate, length and parameter of the drill string notch are determined by the three eigenfrequencies of the torsional vibrations. 7. The reflection from the distributed mass attached to the pipeline and the passage of the flexural traveling wave are considered. The dependence of the solution on the initial coordinate of the distributed mass and its magnitude is obtained, and the inverse problem of determining the initial coordinate of the distributed mass and its magnitude from the data of the reflected wave at the observation point is solved. 8. The radius and thickness of the thin central region of the membrane are determined by the two eigenfrequencies of the transverse vibrations. 9. The radius, thickness of the thinned central area of the plate and the value of the attached distributed mass are determined by the three natural frequencies of the bending oscillations. 10. By three frequencies of bending vibrations it is possible to determine the velocity parameter, the relative mass of the product per unit length of the pipeline and the relative mass of sediments on the walls of the pipeline and, as a consequence, the mass flow of liquid through the pipeline.

Keywords: rod, shaft, beam, membrane, plate, pipeline, defect, computational diagnostics

References

- [1] Gladwell G.M.L. *Inverse Problems in Vibration*. 2nd ed. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [2] Chu M.T., Golub G.H. *Inverse Eigenvalue Problems: Theory, Algorithms, and Applications*. Oxford University Press, USA, 2005. 406 p.
- [3] Axtyamov A. M. [Diagnostirovanie nagruzhenosti mexanicheskoy sistemy] *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics]. 2003. No. 6. Pp. 60 (in Russian)
<https://elibrary.ru/item.asp?id=23192890>
- [4] Il'gamov M.A. [Diagnostics of damages of a vertical rod] *Trudy Instituta mexaniki Ufimskogo nauchnogo centra RAN* [Proceedings of the Mavlyutov Institute of Mechanics] V. 5. Ufa: Gilem. 2007. Pp. 201–211 (in Russian)
DOI: 10.21662/uim2007.1.025
- [5] Khakimov A.G. Damage Diagnostics in a Vertical Rod with Concentrated Masses on the Elastic Suspender // *International Journal of Mechanics and Applications*. 2012. V. 2, No.5, P. 70–73.
DOI: 10.5923/j.mechanics.20120205.03
- [6] Xakimov A.G. [On natural longitudinal vibrations of a stepped rod having distributed attached mass] *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics]. 2013. No. 11. Pp. 9–13 (in Russian)
<https://elibrary.ru/item.asp?id=20519086>

- [7] Il'gamov M.A., Xakimov A.G. Reflection of a decaying traveling wave from a notch in a bar. *Mechanics of Solids*. 2011. No. 4. Pp. 589–596.
DOI: [10.3103/S0025654411040091](https://doi.org/10.3103/S0025654411040091)
- [8] Il'gamov M.A., Xakimov A.G. [Reflection of a longitudinal wave from a notch in the rod immersed into a viscous fluid]. *Vychislitel'naya mexanika sploshnyx sred*. [Computational continuum mechanics]. 2010. V. 3. No. 3. Pp. 58–67 (in Russian).
DOI: [10.7242/1999-6691/2010.3.3.27](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2010.3.3.27)
- [9] Il'gamov M.A., Xakimov A.G. [Reflection of Longitudinal Running Wave in Rod with Damages]. *Kontrol' Diagnostika*. [Control. Diagnostics]. 2009. No. 7. Pp. 43–48 (in Russian).
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12882467>
- [10] Il'gamov M.A., Xakimov A.G. [Longitudinal wave reflection from air cavity in a pipe system]. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo centra RAN*. [Proceedings of the RAS Ufa Scientific Centre]. 2012. No. 4. Pp. 15–21 (in Russian).
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18248314>
- [11] Il'gamov M.A., Xakimov A.G. [Reflection of the longitudinal traveling wave from the incision in the rod]. *Texnicheskaya akustika*. [Technical acoustics]. 2008. V. 8. Pp. 16 (in Russian).
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12834434>
- [12] Xakimov A.G. On the Natural Vibrations of a Shaft with an Artificial Defect. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2010. No. 6. Pp. 468–473.
DOI: [10.1134/S1061830910060100](https://doi.org/10.1134/S1061830910060100)
- [13] Xakimov A.G. On the Characteristic Torsional Oscillations of a Hollow Shaft with a Longitudinal Radial Through Cut. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2013. No. 6. Pp. 323–327.
DOI: [10.1134/S1061830913060041](https://doi.org/10.1134/S1061830913060041)
- [14] Xakimov A.G. [Reflection of a longitudinal travelling wave from the notch in a rod]. *Trudy Instituta mexaniki Ufimskogo nauchnogo centra RAN*. [Proceedings of the Mavlyutov Institute of Mechanics]. V. 7. Ufa: Gilem, 2010. Pp. 211–218 (in Russian).
DOI: [10.21662/uim2010.1.019](https://doi.org/10.21662/uim2010.1.019)
- [15] Xakimov A.G. O [On the Natural Vibrations of the Turbocompressor Shaft with an Artificial Defect]. *Russian Aeronautics (Iz.VUZ)*. 2011. No. 1. Pp. 99–103.
DOI: [10.3103/S106879981101017X](https://doi.org/10.3103/S106879981101017X)
- [16] Xakimov A.G. [The natural vibrations of turbo generator's shaft with an artificial defect]. *Tyazheloe mashinostroenie*. [RUSSIAN JOURNAL OF HEAVY MACHINERY]. 2012. No. 4. Pp. 30–33 (in Russian).
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17705797>
- [17] Xakimov A.G., Satyev E.I. On drill-string natural torsional vibrations. The electronic scientific journal "Oil and Gas Business". 2014. No. 6. Pp. 120–153.
URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/6_2014/ogbus_6_2014_p120-153_KhakimovAG_ru_en.pdf
- [18] Xakimov A.G. [Determining parameters of three-element shaft by a given range of frequencies of torsional vibrations]. *Kontrol' Diagnostika*. [Control. Diagnostics]. 2014. No. 6. Pp. 29–34 (in Russian).
URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21541640>
- [19] Xakimov A.G. [Torsional travelling wave reflection in the bar with an artificial defect]. *Vychislitel'naya mexanika sploshnyx sred*. [Computational continuum mechanics]. 2012. V. 5. No. 1. Pp. 114–119 (in Russian).
DOI: [10.7242/1999-6691/2012.5.1.14](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2012.5.1.14)
- [20] Il'gamov M.A., Xakimov A.G. Diagnosis of Damage of a Cantilever Beam with a Notch. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2009. V. 5. No. 6. Pp. 430–435.
DOI: [10.1134/S1061830909060072](https://doi.org/10.1134/S1061830909060072)
- [21] Il'gamov M.A., Xakimov A.G. [Diagnostics of Fastening and Beams Damages on Elastic Support]. *Kontrol' Diagnostika*. [Control. Diagnostics]. 2010. No. 9. Pp. 57–63 (in Russian).
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15247469>
- [22] Il'gamov M.A., Xakimov A.G. [Damage diagnosis of a hinge support beam]. *Stroitel'naya mexanika inzhenernyx konstrukcij i sooruzhenij*. [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings]. 2010. No. 2. Pp. 42–48 (in Russian).
URL: <http://journals.rudn.ru/structural-mechanics/article/view/10891/10327>
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13216671>
- [23] Xakimov A.G. Reflection flexural wave from a distributed mass attached to the pipeline. *Mathematical models and computer simulations*. 2014. V. 6. No. 1. Pp. 108–113.
DOI: [10.1134/S2070048214010062](https://doi.org/10.1134/S2070048214010062)
- [24] Xakimov A.G. [Reflection of Long Flexural Running Wave from Localized Air Cavity in Pipeline]. *Kontrol' Diagnostika*. [Control. Diagnostics]. 2012. No. 4. Pp. 58–62 (in Russian).
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17761908>
- [25] Xakimov A.G. [Reflection of a short bending travelling wave from distributed mass attached to a pipeline]. *Trudy Instituta mexaniki Ufimskogo nauchnogo centra RAN*. [Proceedings of the Mavlyutov Institute of Mechanics]. V. 9. 2012. Pp. 134–138.
DOI: [10.21662/uim2012.2.064](https://doi.org/10.21662/uim2012.2.064)
- [26] Xakimov A.G. x[About the Round Membrane with Thinned Central Part Natural Vibration]. *Kontrol' Diagnostika*. [Control. Diagnostics]. 2011. No. 4. Pp. 66–68 (in Russian).
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16336488>
- [27] Xakimov A.G. [On the natural vibrations of the plate thinned central part]. *Stroitel'naya mexanika inzhenernyx konstrukcij i sooruzhenij*. [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings]. 2011. No. 3. Pp. 63–66 (in Russian).
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16778516>
- [28] Xakimov A.G. [Natural vibrations of a circular plate having a thinned central portion and attached distributed mass]. *Stroitel'naya mexanika inzhenernyx konstrukcij i sooruzhenij*. [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings]. 2015. No. 4. Pp. 38–44 (in Russian).
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23609755>
- [29] Xakimov A.G. [Mass flow rate and deposit thickness detection in pipes using natural frequencies of flexural vibrations]. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo centra RAN*. [Proceedings of the RAS Ufa Scientific Centre]. 2016. No. 3. Pp. 15–22 (in Russian).
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26586390>