



## МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЛН ЛЭМБА СТАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА С КАЛЬЦИЕВЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ

Чанчина В.Е., Кондратьев А.Е., Анцупов Н.А.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

veronika.zaharova.95@mail.ru

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ данной работы заключается в изучении влияния кальциевого отложения различной толщины на внутренних поверхностях трубы на характеристики ее собственных колебаний. ЦЕЛЬ работы: построить математическую модель стальной трубы без отложений и с кальциевыми наслоениями различной толщины на ее внутренних поверхностях, провести модальный анализ ее собственных колебаний с учетом заданных критериев. Теоретически обосновать зависимость изменения частоты колебаний трубы под воздействием налета. МЕТОДЫ. В работе рассмотрен метод анализа собственных частот трубы с использованием акустического метода неразрушающего контроля, поскольку он допускает односторонний доступ и не нарушает герметичность контролируемого объекта. Для решения поставленной задачи используется метод математического моделирования в программном обеспечении для конечных элементов. РЕЗУЛЬТАТЫ. Описана актуальность темы, представлены основные методы неразрушающего контроля и дано определение волнам Лэмба. Построена математическая модель участка стальной трубы без внутренних отложений и с кальциевыми наслоениями 5 различных толщин. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Результаты вычислений показали, что собственные частоты колебаний трубы без наслоений и с кальциевыми отложениями изменяются в направлении увеличения значения, прирост частот происходит волнами. Наибольшее значение частоты достигается при моделировании налета кальция толщиной 10 мм на стенах трубы.

**Ключевые слова:** трубопровод; модальный анализ; расчет собственные колебания; исследование частоты колебания трубопровода.

**Для цитирования:** Чанчина В.Е., Кондратьев А.Е., Анцупов Н.А. Модальный анализ волн Лэмба стального трубопровода с кальциевыми отложениями // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 4. С. 29-40. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-29-40.

## MODAL ANALYSIS OF LAMB WAVES OF STEEL PIPELINE WITH CALCIUM DEPOSITS

Chanchina V.E., Kondratiev A.E., Antsupov N.A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

veronika.zaharova.95@mail.ru

**Abstract:** The relevance of the work lies in the study of the effect of calcium deposits of various thicknesses on the inner walls of the pipeline on the parameters of its own vibrations. OBJECTIVE: To construct a mathematical model of a steel pipeline without deposits and with calcium deposits of various thicknesses on its inner walls. To perform a modal analysis of the natural vibrations of the steel pipeline. Theoretically confirm the dependence of the change in the oscillation frequency of the pipeline when exposed to sediments. METHODS. The paper highlights a method for analyzing the natural frequencies of the pipeline using the acoustic method of non-destructive testing, since it can be implemented with one-way access and does not violate the integrity of the object of control. In solving this problem, the method of mathematical analysis in the software package of finite element analysis was used. results. The article describes the relevance of the topic, discusses the main methods of non-destructive testing, and defines Lamb waves. A mathematical model of a steel pipeline section without

*internal deposits and with calcium deposits of 5 different thicknesses has been constructed. CONCLUSION. Calculations have shown that the natural vibration frequencies of the pipeline without deposits and with calcium deposits change in the direction of increasing values, the frequency increase occurs in waves. The highest frequency values are obtained when modeling calcium deposits with a thickness of 10 mm on the walls of the pipeline.*

**Keywords:** pipeline; modal analysis; calculation of natural oscillations; investigation of pipeline oscillation frequency.

**For citation:** Chanchina V.E., Kondratiev A.E., Antsupov N.A. Modal analysis of Lamb waves of steel pipeline with calcium deposits. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (4): 29-40. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-29-40.

### ***Введение (Introduction)***

Цель данного исследования заключается в создании математической модели стального трубопровода, которая будет учитывать наличие кальциевого налета на его внутренних поверхностях. Также планируется провести модальный анализ колебаний данного трубопровода с учетом различных толщин кальциевого наслоения.

Научная ценность исследования заключается в теоретическом обосновании зависимости колебаний трубопровода от наличия на его внутренних поверхностях кальциевого слоя.

Практическая ценность работы заключается в выявлении взаимосвязи между степенью влияния наслоения кальция и колебаний трубопровода и его толщиной. Это может значительно повысить точность вибрационной диагностики трубопроводных систем в энергетике, упростить организацию этих работ и позволить прогнозировать долгосрочные вероятности эксплуатации трубопроводов с учетом наличия кальциевого налета.

Полученные результаты анализа могут быть использованы для оценки динамических характеристик трубопровода и разработки мер по улучшению его работы. В частности, результаты могут помочь определить оптимальные параметры работы трубопровода, такие как скорость потока жидкости или газа, а также разработать методы снижения нежелательных колебаний и повышения устойчивости работы. Кроме того, результаты анализа могут быть использованы для выбора материалов и конструкций трубопровода, которые обеспечат его надежную и эффективную работу в условиях образования кальциевого отложения.

### ***Литературный обзор (Literature Review)***

Трубопроводный транспорт играет ключевую роль в экономике Российской Федерации, являясь основным и наиболее эффективным способом транспортировки жидкостей. Благодаря трубопроводам обеспечивается доступ к воде для населения и промышленных предприятий, отвод промышленных и бытовых сточных вод, передача теплоносителя и транспортировка различных жидкостей, включая нефть. Таким образом, значимость трубопроводной системы в России трудно переоценить.

Во-первых, трубопроводный транспорт обеспечивает надежное и бесперебойное снабжение водой, что является основой для поддержания жизнедеятельности населения и функционирования промышленных предприятий. Вода необходима для различных процессов, таких как производство, сельское хозяйство и бытовые нужды.

Во-вторых, трубопроводный транспорт также используется для отвода промышленных и бытовых стоков. Он позволяет предотвратить загрязнение окружающей среды за счет эффективного и безопасного перемещения жидкостей и газов. Также трубопроводный транспорт помогает сохранить природные ресурсы, так как он требует меньше ресурсов для своей работы по сравнению с другими видами транспорта. Это включает такие ресурсы, как топливо, энергия и материалы. Кроме того, трубопроводный транспорт не создает шума и вибрации, которые могут негативно влиять на окружающую среду. В целом, трубопроводный транспорт является экологически устойчивым и безопасным способом перемещения жидкостей и газов, который помогает сохранить окружающую среду и природные ресурсы.

В-третьих, трубопроводы используются для передачи теплоносителя, такого как пар или горячая вода, для обеспечения теплом жилых и промышленных объектов. Это обеспечивает комфорт и эффективность использования энергии.

Наконец, трубопроводы играют ключевую роль в транспортировке различных

жидкостей, таких как нефть и природный газ, на большие расстояния. Это обеспечивает доступ к источникам энергии, необходимым для экономического развития и повышения уровня жизни населения [1].

Для обеспечения водой энергетических объектов используются природные источники, расположенные на поверхности земли (реки, озера, пруды и т. д.) и под землей (артезианские скважины). Эти источники представляют собой сложный динамический эколого-химический механизм, который содержит газы, минеральные и органические вещества в различных состояниях: молекулярном, растворенном, коллоидном и взвешенном [2]. В процессе использования теплотехнического оборудования сохранившиеся содержания вышеуказанных веществ провоцируют вопрос ухудшения процесса теплообмена, и, как результат, существенное снижение эффективности работы данной системы. Обрастание систем отопления отложениями влечет к спаду температуры, и, соответственно, вызывает увеличение энергетических затрат. Пропускная способность составляющих системы отопления падает, таким образом, расход воды снижается, ввиду чего скорость движения теплоносителя в системе отопления и режим течения жидкости в системе меняются [3-4].

В двухтрубной системе отопления, при равномерном образовании отложений внутри трубопровода и одновременном уменьшении его диаметра на 1 мм, расход теплоносителя в системе снижается на 10%. Это может привести к снижению эффективности системы отопления и увеличению затрат на ее эксплуатацию. Если же диаметр трубопровода уменьшится на 2 мм, то расход теплоносителя снизится уже на 22%, что может вызвать серьезные проблемы в работе системы отопления [5].

Одним из наиболее распространенных видов отложений, которые образуются на поверхностях нагрева в системах отопления, является накипь. Основу накипи составляет карбонат кальция, поэтому при использовании стальных трубопроводов в жилищно-коммунальном хозяйстве возможно повышенное образование накипи в этих трубах. Обеспечение надежной и эффективной эксплуатации этих трубопроводов является актуальной научной и практической задачей.

Повышение эксплуатационной надежности трубопроводов может быть достигнуто за счет применения новых материалов и технологий, а также совершенствования методов контроля и диагностики состояния трубопроводов. Кроме того, важным направлением является разработка методов и средств предотвращения образования отложений и удаления уже существующих отложений.

Важной составляющей повышения эффективности работы систем отопления является также оптимизация режимов их работы. Это включает в себя как оптимизацию параметров работы самих систем, так и выбор оптимальных режимов их эксплуатации.

Таким образом, повышение эксплуатационной надежности и эффективности работы систем отопления требует комплексного подхода, включающего как разработку новых технологий и материалов, так и совершенствование методов управления и контроля. Согласно ГОСТ 18353-79 в зависимости от особенностей используемого индикатора состояния (магнитное поле, рентгеновское излучение, проникающие вещества), выделяют следующие методы неразрушающего контроля, которые позволяют выявлять как наружные, так и внутренние дефекты. Основным критерием для классификации методов неразрушающего контроля (НК) являются физические принципы взаимодействия физического поля или вещества с контролируемым объектом. С точки зрения физики, лежащей в основе каждого из них, можно выделить следующие типы.

1. Электромагнитный метод, который работает на основе взаимодействия электромагнитного поля с исследуемым объектом или анализа электромагнитного поля, генерируемого объектом. Например, когда на объект подается электрическое напряжение, в местах дефекта регистрируется снижение напряжения, что помогает определить характер и размер повреждения.

2. Метод радиоволн, который используется для объектов, пропускающих радиоволны. Данные о дефектах получаются путем измерения изменений показателей радиоволн, взаимодействующих со сварочным швом.

3. Метод теплового контроля, основанный на активном виде контроля тепла, в котором исследуемый объект подвергается воздействию теплового излучения, регистрируемого датчиком. Повышенная или пониженная температура в определенных местах сварного шва свидетельствует о наличии дефектов. Этот метод применяется для обнаружения нарушений целостности (поры, расслоения, шлаковые включения) в сварочном шве, а также локализации проблемных областей в его структуре и определения

физико-химических характеристик материала.

4. Метод радиационного (радиографического) контроля, который работает следующим образом: радиоактивное излучение проходит через объект, и в местах дефектов оно поглощается больше, поэтому на специальной пленке они проявляются в виде светлых пятен. Существует несколько видов теплового контроля, наиболее распространенными из которых являются рентгенографический контроль, рентгеноскопия и методы гамма-излучения. Этот метод неразрушающего контроля широко применим, так как позволяет обнаруживать дефекты на всей протяженности объекта и предоставляет информацию об их свойствах, размерах и местоположении.

5. Виброакустический метод, в котором используются инфразвуковые, звуковые или ультразвуковые волны, воздействующие на объект или генерируемые в объекте. Он позволяет обнаруживать даже самые маленькие повреждения стенок трубопровода и может заменить радиографический метод при исследовании, например, углов трубопровода.

Анализ существующих методов контроля показывает, что для решения перечисленных задач наиболее подходящим является виброакустический метод неразрушающего контроля. Он обладает рядом преимуществ, включая возможность одностороннего доступа к объекту контроля без его разрушения [6].

В данной работе рассмотрен виброакустический метод колебаний, как один из способов технической диагностики энергетических трубопроводов. Этот метод неразрушающего контроля основан на использовании механических колебаний и волн любой частоты для обнаружения дефектов внутри исследуемого объекта без его разрушения. В процессе контроля создаются вибрационные колебания внутри объекта и анализируются их характеристики на заданном расстоянии от источника колебаний. Собственные колебания объекта предоставляют наиболее информативные данные, и их частота определяется свойствами исследуемого объекта.

В жидкости и газах могут распространяться только продольные механические волны. Это значит, что частицы среды в таких волнах колеблются вперед и назад вдоль направления распространения волны. Продольные волны являются наиболее распространенным типом волн, обнаруживаемым в жидкостях и газах.

Однако в твердых телах, помимо продольных, существуют еще и поперечные механические волны. Здесь частицы среды совершают колебания перпендикулярно направлению движения волны. Поперечные волны обычно быстрее и имеют более высокие частоты, чем продольные волны в тех же материалах.

Кроме этих двух типов волн, существуют и другие, которые могут распространяться в ограниченных твердых телах. Например, поверхностные волны Рэлея, нормальные волны слоев Лэмба, изгибные волны и нормальные стержневые волны Похгаммера.

Поверхностные волны Рэлея - это тип поверхностных акустических волн, которые распространяются вдоль поверхности твердого тела. Они могут использоваться для измерения свойств поверхности, таких как твердость, эластичность и шероховатость.

Нормальные волны слоев Лэмба - это особый тип волн, который может распространяться в слоистых средах. Скорость их распространения зависит от толщины слоя и частоты колебаний. Существуют два типа волн Лэмба: симметричные и асимметричные. Они отличаются движением частиц относительно среднего сечения слоя: симметричном и асимметричном соответственно. Каждый тип волн распространяется со своей скоростью (рис. 1). Изгибные волны есть частный случай асимметричных волн Лэмба нулевого порядка, когда длина волны намного больше толщины слоя [8].

Волны Лэмба представляют собой особый тип механических волн, которые могут распространяться в твердых телах слоистой структуры. Эти волны могут распространяться в различных материалах, включая плоские пластины из однородного изотропного материала. Также они могут распространяться в искривленных пластинах, которые имеют различные механические свойства в разных направлениях.

Волны Лэмба также могут распространяться в пластинах, вырезанных из кристаллов. В этих случаях пластины могут иметь различные механические свойства из-за разной ориентации кристаллических зерен.

Важно отметить, что волны Лэмба не могут распространяться во всех типах материалов. Для их распространения необходимо, чтобы материал имел слоистую структуру и был однородным и изотропным.

Эти волны используются для комплексного неразрушающего контроля слоистых

материалов и структур (обнаружение дефектов, измерение толщины объектов и т. д.) и в системах обработки электрических сигналов (сверх- и гиперзвуковые линии задержки электрических сигналов, фильтры и т. д.). В неразрушающем контроле волны Лэмба в диапазоне от 0,1 до 10 МГц успешно дополняют объемные ультразвуковые волны, которые позволяют проводить контроль только в толстых массивных объектах [9-12]. Важно отметить, что авторы работы использовали звуковой диапазон частот колебаний, что отличает данную работу от известных исследований по применению волн Лэмба.

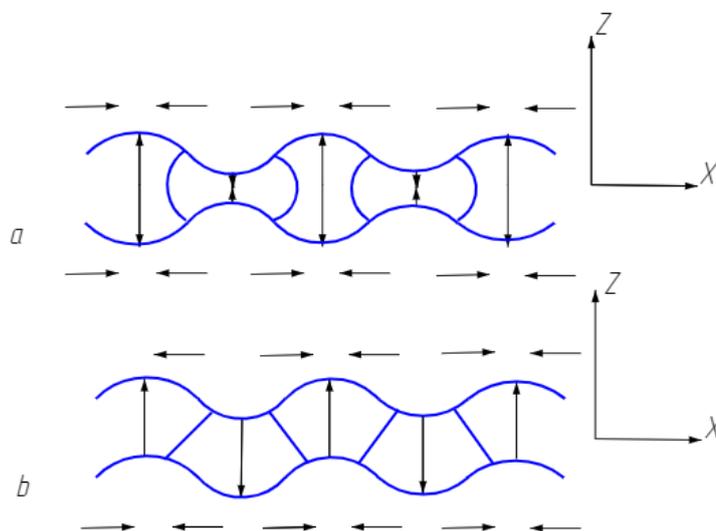


Рис. 1. Схематическое изображение распространения симметричных (а) и ассиметричных (б) волн Лэмба в пластине; стрелками показаны смещения по осям  $x$  и  $z$

*Fig. 1. Schematic representation of the motion of medium particles in plates during the propagation of symmetric (a) and asymmetric (b) Lamb waves in them; the arrows show the direction of displacements along the  $x$  and  $z$  axes*

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

Для проведения расчетов был выбран участок трубы длиной 1 000 мм с указанными характеристиками (165x5,5 мм). В качестве материала объекта была выбрана сталь, свойства которой соответствуют ГОСТ 3262-75 «Трубы стальные водогазопроводные».

Выбор материала обусловлен его активным использованием в прокладывании трубопроводов, а именно: не только в устойчивых грунтах, но и в оврагах, по эстакадам и мостам, под руслами рек и даже в сейсмоопасных районах или в высокопористых грунтах.

Отрез трубопровода условно закреплен по краям.

Для проведения модального анализа трубопровода использовался программный комплекс, который предназначен для проведения конечно-элементного анализа. Этот комплекс является универсальным и широко используется специалистами в области инженерных расчетов.

Модальный анализ позволяет определить собственные частоты и формы колебаний исследуемого объекта, в данном случае - участка трубопровода. Эта информация может быть использована для оценки устойчивости трубопровода, определения его резонансных частот и разработки методов снижения колебаний.

Результаты модального анализа могут быть использованы для оптимизации конструкции трубопровода, выбора оптимальных параметров его работы и определения требований к системам контроля и управления.

В данной работе проводится модальный анализ собственных частот участка трубопровода с помощью метода конечных элементов. Этот метод разбивает объект на множество малых элементов, которые затем анализируются по отдельности.

Сначала создается конечно-элементная сетка объекта. Затем решается уравнение движения элементов, чтобы получить общее решение для всего объекта. Из этого решения можно определить собственные частоты и формы колебаний объекта.

Принцип, по которому проводится модальный анализ, заключается в решении уравнений движения для каждого элемента и объединении этих решений в общее решение для всего объекта.

Расчет свободных колебаний проводится без учета динамических нагрузок, но является первым и обязательным шагом при решении более сложных динамических задач.

Собственные колебания системы описываются дифференциальным уравнением свободных колебаний. Это уравнение позволяет определить собственные частоты и формы колебаний системы. Эти данные имеют важное значение для анализа устойчивости системы, ее динамического поведения и способности противостоять внешним воздействиям. Решение этого уравнения позволяет определить собственные частоты и формы колебаний конструкции. (1):

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0, \quad (1)$$

где  $[M]$  – матрица масс;  
 $[K]$  – матрица жесткости.

Применение результатов решения этого уравнения позволяет определить резонансные частоты системы, на которых она будет наиболее подвержена внешним воздействиям, а также оценить степень влияния различных факторов, таких как изменение массы или жесткости, на собственные частоты и формы колебаний.

При анализе свободных колебаний конструкции предполагается, что она ведет себя как упругая система. Это означает, что при воздействии на конструкцию с определенной частотой, она будет колебаться с той же частотой и амплитудой (2):

$$\{x\} = \{\phi_i\} \cos(\omega_i t), \quad (2)$$

где  $\phi_i$  определяет форму колебаний  $i$ -ой моды (собственный вектор);  
 $\omega_i$  собственная частота для  $i$ -ой моды.

Таким образом, ожидаемая реакция конструкции на внешнее воздействие будет гармонической. Это значит, что если приложить к конструкции периодическую силу, то она будет колебаться с той же периодичностью.

Однако следует отметить, что это предположение справедливо только для линейных систем, то есть систем, в которых нет нелинейных эффектов, таких как усталость материала, изменение свойств материала при нагрузке и т.д. Для нелинейных систем анализ свободных колебаний усложняется и требует применения более сложных методов.

С помощью подстановки в предыдущее уравнение можно определить собственные частоты  $\omega_i$  (3):

$$([K] - \omega_i^2 [M])\{\phi_i\} = 0 \quad (3)$$

При расчете свободных колебаний конструкции обычно предполагается, что материалы конструкции ведут себя как линейные упругие системы, то есть их свойства не изменяются при малых деформациях. Также предполагается использование теории малых деформаций, которая предполагает, что деформации конструкции малы и могут быть описаны линейными зависимостями.

Также обычно не учитывается воздействие внешних сил на конструкцию при расчете свободных колебаний, так как целью является определение собственных частот и форм колебаний без учета внешних воздействий. Однако, в некоторых случаях, когда внешние силы могут существенно влиять на колебания конструкции, их воздействие может быть учтено.

Наконец, конструкция может быть закреплена или свободна в зависимости от задачи и условий эксплуатации. Если конструкция закреплена, то ее перемещения ограничены связями, и это влияет на собственные формы и частоты колебаний. Если конструкция свободна, то она может колебаться в любом направлении, и это также влияет на ее собственные частоты и формы колебаний.

Авторами воссоздана математическая модель трубопровода с заданными параметрами, которая представлена на рисунке 2. Опоры модели заданы по краям трубопровода.

Данная модель представлена «чистой», без отложений и прочих дефектов.

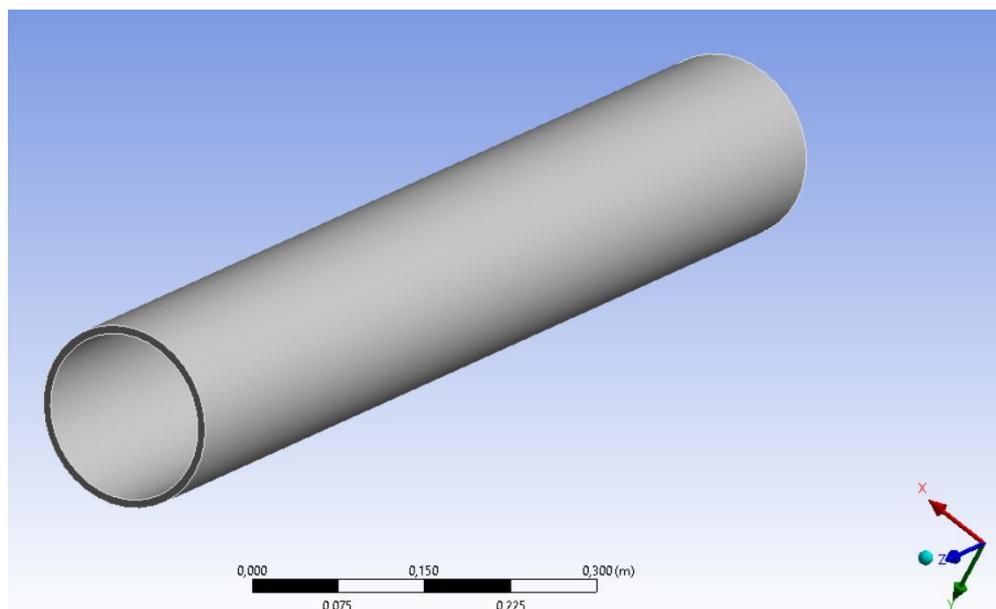


Рис. 2. Модель трубопровода

Fig. 2. Pipeline model

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исследование разделено на несколько основных этапов.

На первом этапе выполнено проведение анализа собственных частот трубопровода без внутренних отложений. Количество ячеек и узлов начальной расчетной сетки составило 10302 и 68293 соответственно, размер ячеек был взят 0,02 мм. Сеточная модель трубопровода представлена на рисунке 3.

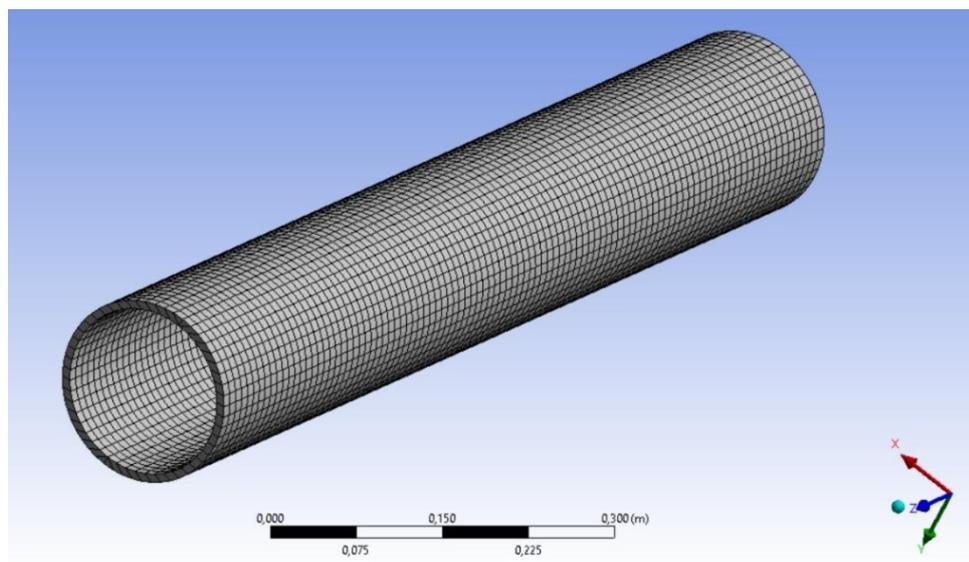


Рис. 3. Сеточная модель трубопровода

Fig 3. Grid model of the pipeline

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Значения частот собственных колебаний такой модели трубопровода составили диапазон от 724 до 3444 Гц.

Далее последовательно были построены математические модели отрезка трубы с внутренним слоем кальция следующих толщин: 2 мм, 4 мм, 6 мм, 8 мм и 10 мм. Условно принято, что зарастание отложениями происходит равномерно. Далее, по аналогии с первой математической моделью, был проведен анализ собственных частот трубопровода с добавленными внутренними отложениями.

#### **Результаты и обсуждение (Results and discussions)**

Результаты расчетов собственных частот колебаний отрезка трубы заданных параметров с кальциевыми отложениями и без них представлены в таблице 1. В ней представлены собственные частоты  $\nu$  [Гц] (моды с 1 по 30).

Таблица 1

Table 1

Полученные результаты собственных частот колебаний участка трубопровода  
*The obtained results of the natural oscillation frequencies of the pipeline section*

Мода	Частота, Гц					
	Труба без отложений	Труба с отложением 2 мм	Труба с отложением 4 мм	Труба с отложением 6 мм	Труба с отложением 8 мм	Труба с отложением 10 мм
1.	724,04	714,59	706,26	698,79	691,99	685,72
2.	724,3	714,84	706,5	699,03	692,2	685,94
3.	845,35	873,4	940,41	1045,4	1182,5	1342,9
4.	846,04	874,01	940,93	1045,8	1182,8	1343,2
5.	1105,0	1123,2	1176,0	1264,5	1385,5	1477,8
6.	1105,4	1123,5	1176,3	1264,8	1385,6	1531,8
7.	1543,6	1526,5	1511,8	1498,9	1487,6	1531,9
8.	1587,0	1592,6	1597,7	1581,8	1567,5	1554,7
9.	1587,0	1592,6	1597,7	1581,8	1567,5	1554,7
10.	1636,0	1615,7	1627,9	1695,1	1793,2	1917,6
11.	1636,0	1615,7	1627,9	1695,2	1793,3	1917,6
12.	2208,0	2202,5	2224,3	2275,6	2314,7	2294,3
13.	2208,0	2202,6	2224,4	2275,7	2356,3	2462,9
14.	2219,9	2304,2	2361,0	2336,8	2356,4	2463,0
15.	2221,7	2305,7	2496,0	2603,0	2580,0	2559,7
16.	2292,4	2376,4	2497,2	2603,3	2580,4	2560,1
17.	2294,1	2377,7	2568,5	2783,2	2975,3	2955,5
18.	2418,9	2388,0	2569,6	2784,1	3007,3	3104,1
19.	2441,9	2523,7	2628,8	2856,7	3007,3	3104,2
20.	2443,4	2524,8	2629,2	2857,5	3141,4	3541,0
21.	2686,1	2658,0	2714,0	2936,4	3142,5	3542,0
22.	2687,2	2658,4	2714,9	2936,4	3216,3	3589,6
23.	2690,9	2763,3	2894,6	2997,8	3217,3	3590,2
24.	2691,3	2764,2	2894,7	3001,1	3360,5	3617,4
25.	2897,0	2882,2	2948,9	3001,8	3361,4	3618,4
26.	2897,0	2882,2	2949,7	3232,1	3588,6	3762,1
27.	3025,0	3053,1	3023,5	3232,6	3589,4	3762,9
28.	3025,8	3096,3	3275,6	3553,0	3617,2	3792,2
29.	3087,1	3096,9	3276,0	3553,3	3617,8	3792,3
30.	3444,4	3509,5	3592,4	3629,9	3697,6	3988,6

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Анализ полученных результатов показывает, что собственные частоты колебаний трубопровода увеличиваются с увеличением количества кальциевых отложений. Это означает, что трубопровод становится более жестким и менее гибким при увеличении количества отложений. Этот эффект может быть связан с изменением плотности и модуля упругости материала трубопровода при образовании отложений.

Кроме того, результаты показывают, что увеличение толщины кальциевого слоя приводит к значительному увеличению собственных частот колебаний. Это может быть связано с тем, что более толстые слои отложений оказывают большее влияние на жесткость трубопровода.

Полученные результаты анализа собственных частот и форм колебаний трубопровода с кальциевыми отложениями могут быть использованы для оценки его динамических характеристик и разработки мер по улучшению его работы. В частности, результаты могут помочь определить оптимальные параметры работы трубопровода, такие как скорость потока жидкости или газа, а также разработать методы снижения нежелательных колебаний и повышения устойчивости работы. Кроме того, результаты анализа могут быть использованы для выбора материалов и конструкций трубопровода, которые обеспечат его надежную и эффективную работу в условиях образования кальциевого отложения. Для наглядности представлен график увеличения частоты собственных колебаний шести моделей трубопроводов, показанный на рисунке 4.

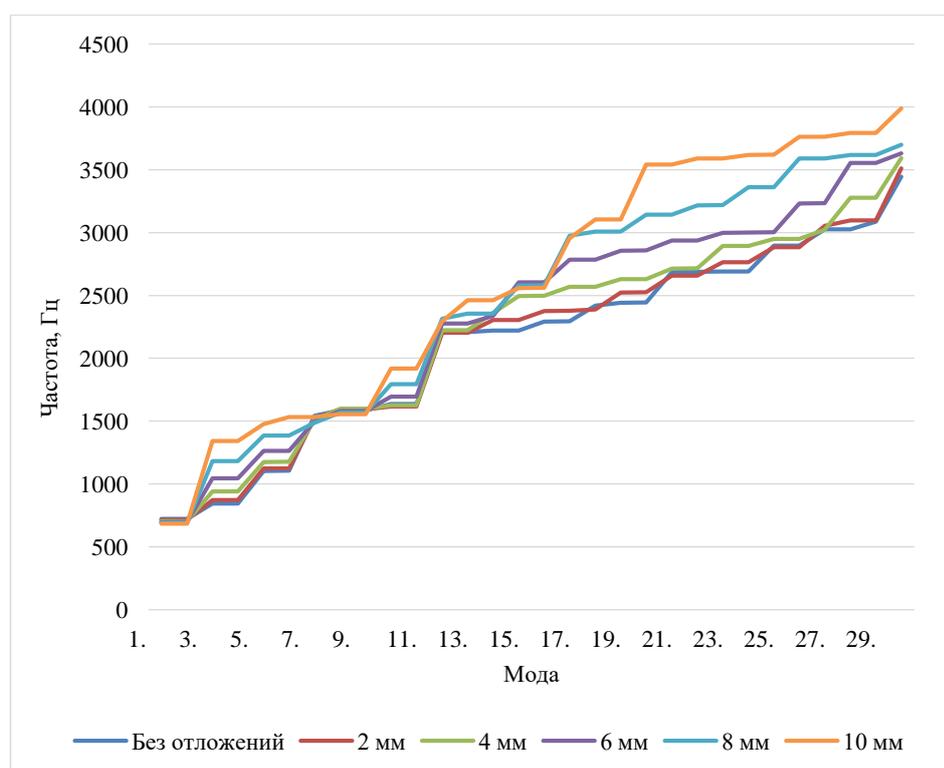


Рис. 4. График собственных частот трубопроводов Fig. 4. Graph of natural frequencies of pipelines

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как видно из графика, рост частот происходит волнообразно. Информативная часть результатов модального анализа начинается с третьей моды. Наибольший рост значений показан на участках с 9 по 19 моду и с 23 по 30 моду. На участках 3-8, 10-12, 13-30 мод наблюдается высокий рост частот собственных колебаний моделируемых трубопроводов.

Визуальная оценка полученных значений показывает, что наибольшие значения частоты приобретают при моделировании на стенках трубопровода кальциевого отложения толщиной 10 мм. Результаты оценки данного явления демонстрируют закономерность изменения собственных частот трубопровода от толщины присутствующего на нем отложения.

#### Заключение или Выводы (Conclusions)

1. Построены математические модели стального трубопровода размером 165x5.5 мм без отложений и с различными толщинами кальциевого отложения (2, 4, 6, 8 и 10 мм). Выполнена разбивка модели на сетку с шагом 0.02 мм в программном комплексе для конечно-элементного анализа.

2. Проведен модальный анализ всех моделей в указанном программном комплексе.

3. Было проведено сравнение результатов расчетов собственных частот колебаний для разных толщин кальциевого отложения. Результаты показали, что собственные частоты колебаний увеличиваются с увеличением толщины отложения. Наибольшее увеличение было замечено при моделировании отложений толщиной 10 мм.

#### Литература

1. Ярославкина Е.Е., Сулов А.В. Теоретико-экспериментальное исследование зависимости собственных частот колебаний пластины от толщины отложений // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2021. №2.
2. Мастобаев Б.Н., Павлов В.Н., Валеев А.Р., Ташбулатов Р.Р., Каримов Р.М., Колчин А.В., Локшина Е.А. Об использовании системы магистральных трубопроводов для транспорта и снабжения пресной водой // Транспорт и хранение нефтепродуктов. 2021. №5-6.
3. Ушакова А.А., Журавлева Н.В. Роль примесей воды при ее использовании в энергетике // Вестник магистратуры. 2020. №5-3.
4. Ушакова А.А., Журавлева Н.В. Водоподготовка и ее влияние на окружающую среду // Вестник магистратуры. 2020. №5-3.
5. Zagretdinov A.R., Kazakov R.B., Mukatdarov A.A. Control the tightness of the pipeline valve

shutter according to the change in the Hurst exponent of vibroacoustic signals // E3S Web of Conferences : 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019. Kazan: EDP Sciences, 2019. P. 03005.

6. Сулов А.В., Ярославкина Е.Е. Акустические методы контроля отложение парафина на внутренних стенках трубопроводов. // International Scientific Conference Proceedings "Advanced Information Technologies and Scientific Computing" PIT 2022. С 86-88.

7. Чанчина В.Е., Гапоненко С.О. Метод вынужденных колебаний при анализе возможного влияния грунтов различного типа на собственные колебания трубопровода // В сборнике: Тинчуринские чтения - 2023 "Энергетика и цифровая трансформация". Материалы Международной молодежной научной конференции. 2023. Т. 3. С. 467-470.

8. Чанчина В. Е., Гапоненко С. О., Кондратьев А. Е. и др. Применение методов математического моделирования для определения влияния грунта на частоты собственных колебаний трубопроводов // Надежность и безопасность энергетики. 2021. Т. 14. № 2. С. 142-147.

9. Zagretdinov A.R., Kazakov R.B., Mukatdarov A.A. Control the tightness of the pipeline valve shutter according to the change in the Hurst exponent of vibroacoustic signals // E3S Web of Conferences : 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019. Vol. 124. Kazan: EDP Sciences. 2019. P. 03005.

10. Nazarychev S. A., Gaponenko S. O., Kondratiev A. E., Shakurova R. Z. Acoustic-resonance method for control of the location of hidden hollow objects // Journal of Physics: Conference Series : Scientific Technical Conference on Low Temperature Plasma During the Deposition of Functional Coatings, Vol. 1328. Kazan: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012054.

11. Загреддинов А.Р., Хайритдинов Р.Р., Логинов В.Н., Бусаров А.В. Измерительно-диагностический комплекс для виброакустического контроля технического состояния оборудования // ИВД. 2016. №4.

12. Галимова, А.Р. Виброакустический метод контроля оценки технического состояния трубопроводных транспортов // Энергетика и энергосбережение: теория и практика : сборник материалов VII Международной научно-практической конференции. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023. С. 118-1-118-2.

13. Улябаева, Г.Ш. Математическое моделирование колебательного процесса бездефектного и дефектного трубопроводов // XXVI Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика: материалы докладов. 2023. Т. 2. С. 102-106.

14. Gaponenko S.O., Shakurova R.Z., Kondratiev A.E. Identification of Diagnostic Information for Assessing the Technical Condition of Power Equipment // Proceedings 2021 International Russian Automation Conference, RusAutoCon – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. P. 115-119.

15. Gaponenko S.O., Kondratiev A.E., Zagretdinov A.R. et al. Stand for the study of vibro-acoustic parameters of buried pipelines // AIP Conference Proceedings : IV INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ON INNOVATIONS IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY (ISPCJET 2021), Veliky Novgorod, Russia. Vol. 2486. Veliky Novgorod, Russia: AIP PUBLISHING, 2022. P. 020001.

16. Shvetsov I.V., Ziganshin Sh.G., Zagretdinov A.R., Zhelnov D.V. Assessment of the technical condition of pipelines in polyurethane insulation // IOP conference series: materials science and engineering : The conference proceedings ISPCJET'2020, Veliky Novgorod, Vol. 939. Veliky Novgorod: IOP Publishing Ltd, 2020. P. 012074.

17. Gaponenko S., Kondratiev A. Improving the methodology for monitoring the technical condition of pipelines based on the correlation dependence of vibration diagnostic signals // Международный симпозиум "Устойчивая энергетика и энергомашиностроение - 2021: SUSE-2021" 2021. P. 539-544.

18. Умбетов С.В., Пронин С.П. Классификация и анализ средств контроля коррозионных повреждений внутренних поверхностей подземного металлического трубопровода // Вестник ЮГУ. 2020. №2.

#### **Авторы публикации**

**Чанчина Вероника Евгеньевна** – инженер 2 категории Управление научных исследований, инноваций и разработок, аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). [veronika.zaharova.95@mail.ru](mailto:veronika.zaharova.95@mail.ru)

**Кондратьев Александр Евгеньевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). [aekondr@mail.ru](mailto:aekondr@mail.ru)

**Анципов Никита Алексеевич** – студент Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *anikita74rus@gmail.com*

#### References

1. Yaroslavkina EE., Suslov AV. Teoretiko-eksperimental'noe issledovanie zavisimosti sobstvennyh chastot kolebanij plastiny ot tolshchiny otlozhenij. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2021; 2. (In Russ).
2. Mastobaev BN., Pavlov VN., Valeev AR., Tashbulatov RR., Karimov RM., Kolchin AV., Lokshina EA. Ob ispol'zovanii sistemy magistral'nyh truboprovodov dlya transporta i snabzheniya presnoj vodoj. *Transport i hranenie nefteproduktov*. 2021; 5-6. (In Russ).
3. Ushakova AA., Zhuravleva NV. Rol' primesej vody pri ee ispol'zovanii v energetike. *Vestnik magistratury*. 2020; 5-3. (In Russ).
4. Ushakova AA., Zhuravleva NV. Vodopodgotovka i ee vliyanie na okruzhayushchuyu sredu. *Vestnik magistratury*. 2020; 5-3. (In Russ).
5. Zagretdinov AR., Kazakov RB., Mukatdarov AA. Control the tightness of the pipeline valve shutter according to the change in the Hurst exponent of vibroacoustic signals. *E3S Web of Conferences: 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019; Kazan: EDP Sciences*; 2019. p. 03005.
6. Suslov AV., Yaroslavkina EE. Akusticheskie metody kontrolya otlozhenie parafina na vnutrennih stenkah truboprovodov. *International Scientific Conference Proceedings "Advanced Information Technologies and Scientific Computing"; PIT*; 2022. pp. 86-88. (In Russ).
7. Chanchina VE., Gaponenko SO. Metod vynuždennyh kolebanij pri analize vozmozhnogo vliyaniya gruntov razlichnogo tipa na sobstvennye kolebaniya truboprovoda. *Tinchurinskie chteniya - 2023 "Energetika i cifrovaya transformaciya". Materialy Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii*; 2023; 3. pp. 467-470. (In Russ).
8. Chanchina VE., Gaponenko SO., Kondratiev AE. et al. Primenenie metodov matematicheskogo modelirovaniya dlya opredeleniya vliyaniya grunta na chastoty sobstvennyh kolebanij truboprovodov. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*. 2021; 14 (2). pp. 142-147. (In Russ).
9. Zagretdinov AR., Kazakov RB., Mukatdarov AA. Leakproofness control of the valve of pipeline fittings by changing the Hurst index of vibroacoustic signals. *E3S Web of Conferences : International Scientific and Technical Conference "Intelligent Energy Systems"*. Kazan: EDP Sciences. 2019; 124. pp. 03005.
10. Nazarychev SA., Gaponenko SO., Kondratiev AE., Shakurova RZ. Acoustic-resonance method for control of the location of hidden hollow objects. *Journal of Physics: Conference Series : Scientific Technical Conference on Low Temperature Plasma During the Deposition of Functional Coatings*. Kazan: Institute of Physics Publishing, 2019; 1238. pp. 012054.
11. Zagretdinov AR., Khairutdinov RR., Loginov VN., Busarov AV. Izmeritel'no-diagnosticheskij kompleks dlya vibroakusticheskogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya. *IVD*. 2016; 4. (In Russ).
12. Galimova AR. Vibroakusticheskij metod kontrolya ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya truboprovodnyh transportov. *Energetika i energosberezhenie: teoriya i praktika : sbornik materialov VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Kemerovo: Kuzbasskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni T.F. Gorbacheva. 2023. pp. 118-1-118-2.
13. Ulyabayeva GSh. Matematicheskoe modelirovanie kolebatel'nogo processa bezdefektnogo i defektnogo truboprovodov. *XXVI Vserossijskij aspirantsko-magisterskij nauchnyj seminar, posvyashchennyj dnyu energetika: materialy dokladov*. 2023; 2. pp. 102-106. (In Russ).
14. Gaponenko SO., Shakurova RZ., Kondratiev AE. Identification of diagnostic information for assessing the technical condition of power equipment. *Proceedings of the International Russian Conference on Automation 2021, RusAutoCon*. Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2021. pp. 115-119.
15. Gaponenko SO., Kondratiev AN., Zagretdinov AR., etc. Stand for the study of vibroacoustic parameters of buried pipelines. *Proceedings of the AIP conference: IV International scientific and practical conference on innovations in engineering and technology (ISPCJET 2021)*. Veliky Novgorod, Russia. AIP PUBLISHING HOUSE, 2022; 2486. p. 020001.
16. Shvetsov IV., Ziganshin ShG., Zagretdinov AR., Zhelnov DV. Assessment of the technical condition of pipelines in polyurethane insulation. *IOP conference series: materials science and engineering : The conference proceedings ISPCJET'2020*. Veliky Novgorod: IOP Publishing Ltd, 2020; 939. p. 012074.
17. Gaponenko SO, Kondratiev AE. Improving the methodology for monitoring the technical condition of pipelines based on the correlation dependence of vibration diagnostic signals. *Mezhdunarodnyj simpozium "Ustojchivaya energetika i energomashinostroenie - 2021: SUSE-2021"*

2021. pp. 539-544.

18. Umbetov S.V., Pronin S.P. Klassifikaciya i analiz sredstv kontrolya korrozijnyh povrezhdenij vnutrennih poverhnostej podzemnogo metallicheskogo truboprovoda. *Vestnik YUGU*. 2020; 2. (In Russ).

**Authors of the publication**

**Veronika E. Chanchina** - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
[veronika.zaharova.95@mail.ru](mailto:veronika.zaharova.95@mail.ru)

**Aleksandr E. Kondratiev** - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
[aekondr@mail.ru](mailto:aekondr@mail.ru)

**Nikita A. Ancupov** - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
[anikita74rus@googlemail.com](mailto:anikita74rus@googlemail.com)

*Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды*

**Получено** **11.04.2024 г.**

**Отредактировано** **07.06.2024 г.**

**Принято** **29.07.2024 г.**