

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



УДК 620.19

DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-6-188-201

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПЕРАТИВНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ

Р.З. Шакурова, С.О. Гапоненко, А.Е. Кондратьев

Казанский государственный энергетический университет,  
г. Казань, Россия  
shakurova.rz@gmail.com

**Резюме:** *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть проблемы надежности трубопроводных систем ЖКХ. Провести анализ существующих методов оценки технического состояния трубопроводов. Разработать усовершенствованную методику, позволяющую производить поиск различных типов дефектов в трубопроводах. Разработать устройство инерциального возбуждения низкочастотных диагностических вибрационных колебаний. Разработать программное обеспечение в среде LabVIEW для сбора, хранения и обработки сигналов, регистрируемых с помощью чувствительного элемента (пьезоэлектрического датчика), устанавливаемого на трубопроводе. Провести серию экспериментальных исследований для проверки предложенной методики. *МЕТОДЫ.* Для возбуждения колебаний в исследуемом трубопроводе применялся метод инерциального возбуждения колебаний. Для поиска собственных частот колебаний исследуемого трубопровода применялись методы математического моделирования, реализуемые в программном комплексе ANSYS. При проведении экспериментов для обработки сигналов, регистрируемых с помощью чувствительного элемента (пьезоэлектрического датчика), использовался метод быстрого преобразования Фурье. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье представлена методика оценки технического состояния трубопроводов, а также устройство инерциального возбуждения колебаний. В статье представлены результаты экспериментальных исследований на трубопроводе из стеклопластика, результаты показали, что при прохождении колебательной волны через стенку бездефектного трубопровода её амплитуда меняется незначительно. В случае наличия дефекта амплитуда колебаний будет значительно слабее за счёт рассеивания колебательной энергии в месте дефекта. Таким образом, по степени ослабления амплитуды сигнала можно судить не только о наличии дефекта, но также и о его размерах.

**Ключевые слова:** *повышение надежности, возбуждение колебаний, инерциальный резонатор, свободные колебания, спектр колебаний.*

**Для цитирования:** Шакурова Р.З., Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Методика проведения оперативного диагностирования трубопроводов энергетических систем и комплексов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 188-201. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-188-201.

## TECHNIQUE FOR OPERATIONAL DIAGNOSIS OF PIPELINES OF ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

RZ Shakurova, SO Gaponenko, AE Kondratiev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia  
shakurova.rz@gmail.com

**Abstract:** *THE PURPOSE.* To consider the problems of reliability of pipeline systems of housing and communal services. To analyze existing methods for assessing the technical condition of pipelines. To develop an improved technique that allows you to search for various types of defects in pipelines. To develop a device for inertial excitation of low-frequency diagnostic vibration vibrations. To develop software in the LabVIEW environment for collecting, storing and processing signals from a sensitive sensor (piezoelectric sensor) installed on a pipeline. To conduct a series of experimental studies to test the proposed methodology. *METHODS.* The method of inertial excitation of vibrations was used to excite vibrations in the wall of the investigated pipeline. To search for the natural frequencies of vibrations of the pipeline under study, mathematical modeling methods were used, implemented in the ANSYS software package. During the experiments, the fast Fourier transform method was used to process the signals coming from the piezoelectric sensor. *RESULTS.* The article presents a technique for assessing the technical condition of pipelines, as well as a device for inertial excitation of vibrations. The article presents the results of experimental studies on a fiberglass pipeline, the results showed that when an oscillatory wave passes through the wall of a defect-free pipeline, its amplitude changes insignificantly. If there is a defect in the wall of the investigated pipeline, the vibration amplitude will be much weaker due to the dissipation of vibrational energy in the place of the defect. Thereby, it is possible to determine not only the presence of a defect, but also its size by the degree of attenuation of the signal amplitude. *CONCLUSION.* The proposed technique is the basis for the creation of a new measuring and diagnostic complex for vibration control of pipelines.

**Keywords:** increased reliability, excitation of vibrations, inertial resonator, free vibrations, vibration spectrum.

**For citation:** Shakurova RZ, Gaponenko SO, Kondratiev AE. Technique for operational diagnosis of pipelines of energy systems and complexes. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):188-201. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-188-201.

### Введение

Энергетика является одной из фундаментальных отраслей российской экономики. Это обусловлено тем, что все технологические процессы в промышленности, в сельском хозяйстве, на транспорте и во всех сферах обслуживания населения связаны с большими затратами энергии. В этой связи уделяется большое внимание надежности энергосистемы и безопасной эксплуатации энергетических объектов.

Регулирование вопросов, касающихся надежной и безопасной эксплуатации производственных объектов и направленных на предупреждение аварий, и опасных ситуаций в производственных процессах осуществляется Федеральным законом №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 [1,2]. Кроме того, безаварийная эксплуатация оборудования и трубопроводов промышленных объектов обеспечивает экологическую безопасность и санитарно-эпидемиологическое благополучие населения, предписываемые Федеральным законом №170-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 30.03.1999 г., Федеральным законом №7-ФЗ «Об охране окружающей природной среды» от 10.01.2002 г. [3,4]

В настоящее время проблема износа объектов коммунальной инфраструктуры и их технологическая отсталость стоит очень остро. Общий износ сетей составляет порядка 70%, что приводит к высокой аварийности и потере воды, тепла, электричества в процессе производства и транспортировки до потребителей. Кроме того, подобные аварии несут за собой большие материальные затраты, значительный вред экологии, а порой и человеческие жертвы [5].

Из-за износа тепловых сетей и теплофикационного оборудования теплоноситель

подаются потребителям не в соответствии с расчетным температурным графиком, что ведет к дополнительным расходам на транспортировку объемов недогретого теплоносителя. В связи с этим снижается эффективность использования энергетических ресурсов, и говорить об энергосбережении не приходится. Согласно федеральному закону Российской Федерации № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...», необходимо снижать потребление топливно-энергетических ресурсов и стремиться к рациональному использованию тепловой и электрической энергии [6]. Одним из направлений повышения энергетической эффективности является обеспечение надёжного функционирования энергетических систем, так как именно здесь теряется большая часть энергии: на стадии производства тепловой и электрической энергии ввиду несовершенства технологий производства и оборудования энергетических систем, во время транспортировки тепловой энергии потребителю ввиду обветшания трубопроводных систем, а также потери энергии у потребителя ввиду её нерационального использования [7].

Все эти трудности в большей или меньшей степени характерны для предприятий энергетической отрасли России. По-прежнему преобладает расточительный характер потребления энергоресурсов. Отсутствует какая-либо система эффективных методов экономического стимулирования энергосбережения.

В этой связи для обеспечения надежной работы энергосистемы и, как следствие, бесперебойного снабжения потребителей тепловой энергией, необходимо уделять особое внимание техническому состоянию энергетического оборудования как на самих станциях и котельных, так и при транспортировке тепловой энергии до потребителя [8,9].

В настоящее время для диагностики энергетического оборудования применяют различные методы неразрушающего контроля, в том числе такие методы как:

- визуальный и измерительный контроль;
- капиллярная дефектоскопия;
- магнитный метод контроля;
- рентгеновский контроль;
- ультразвуковой контроль.

Вкратце остановимся на каждом из перечисленных методов.

Визуальный контроль — древнейший метод неразрушающего контроля. Все мероприятия до неразрушающего контроля начинаются именно с визуального осмотра объекта контроля. Данный метод основан на исследовании объекта невооруженным глазом. Визуальная оценка объекта контроля часто проводится с помощью самых простых измерительных средств: лупы, измерительные линейки, угломеры, щупы, штангенциркули, универсальные шаблоны сварщика (УШС) и др. Визуальный контроль является самым доступным методом контроля, при этом он оперативен и достаточно информативен, однако этот метод имеет низкую чувствительность (при остроте зрения 1 чувствительность составляет 0,1мм), низкую вероятность обнаружения мелких дефектов, а достоверность результатов визуального осмотра зависит от остроты зрения специалиста, его усталости и условий проведения контроля [10].

Капиллярная дефектоскопия – метод НК, позволяющий выявлять поверхностные и сквозные дефекты, определять их протяженность, расположение и ориентацию на поверхности. Капиллярный контроль основан на проникновении пенетрантов - специальных жидкостей - в поверхностные дефекты изделия под действием капиллярного давления и последующей регистрации индикаторных следов [10].

Капиллярный метод контроля обладает следующими преимуществами

- простота операций;
- доступность оборудования и материалов;
- широкий спектр применения;
- возможность определения расположения дефекта, его размеров, глубины и формы.

Однако данный метод имеет и ряд недостатков:

- большая длительность процесса контроля (порядка 2 часов);
- необходимость тщательной предварительной подготовки объекта контроля;
- обнаружение только поверхностных дефектов;
- сложность автоматизации процесса, следовательно, высокая его трудоемкость;
- если контроль проводится при отрицательных температурах, точность исследований сильно снижается.
- некоторые дефектоскопические материалы вредны для человека, следовательно,

возникает необходимость использования средств защиты.

В основе магнитного метода неразрушающего контроля лежит изменение направления линий магнитного потока при прохождении через участки с пониженной магнитной проницаемостью, которыми являются разрывы сплошности металла. Магнитная дефектоскопия применима для выявления дефектов в ферромагнитных металлах, таких как никель, железо, кобальт и сплавы на их основе.

Магнитный метод контроля имеет ряд преимуществ: высокая чувствительность, определение размеров и формы дефектов, простота реализации и относительная дешевизна [11]. Также можно выделить и ряд недостатков: вероятность фиксации ложных сигналов на ферромагнитной ленте при наличии неровностей металла, а также данный метод имеет низкую чувствительность к выявлению широких и округлых дефектов.

Рентгеновский контроль применяют для определения целостности металла, выявления шлаковых, окисных и других включений в структуре металла. Генерируемые лампой рентгеновские лучи проходят через исследуемый участок объекта контроля и фиксируются на различных светочувствительных материалах – пленке, бумаге или пластине, расположенных за объектом контроля. После проведения контроля светочувствительные пленки проявляют и расшифровывают с помощью негатоскопа.

Рентгеновский метод контроля позволяет выявлять и определять расположение как поверхностных, так и скрытых подповерхностных дефектов, обладает высокой информативностью и наглядностью результатов исследования, при этом скорость процесса дефектоскопии достаточно высокая. К существенным недостаткам метода можно отнести опасность рентгеновского излучения для здоровья человека, высокая цена исследований и низкая чувствительность к некоторым видам дефектов.

Впервые разработкой ультразвукового метода [12] дефектоскопии занялся советский ученый Соколов С.Я. Сама методика была разработана и апробирована им в 1928-1930 годах, а в 1948 году Соколов разработал первый в России импульсный эхо-дефектоскоп. Также большой вклад в исследование распространения и отражения ультразвуковых волн внес ученый Центрального научно-исследовательского института технологии машиностроения Ермолов И.Н. Сущность ультразвукового метода заключается в излучении в объект контроля акустических колебаний и в последующем принятии их отражений специальным прибором – дефектоскопом с пьезоэлектрическим датчиком. Принцип контроля состоит в том, что УЗК волны не меняют своей траектории, проходя через однородную среду, однако при попадании на границу двух материалов с различной звуковой проницаемостью, волны преломляются и отражаются. Именно отраженные волны и фиксируются дефектоскопом, а анализ их параметров позволяет выявлять форму, глубину и размеры дефекта.

Основными достоинствами ультразвуковой дефектоскопии являются его относительная дешевизна, высокая скорость и точность измерений, портативность используемого для дефектоскопии оборудования. Среди недостатков стоит выделить невозможность определения реальных размеров дефекта, подготовка поверхности контроля к проведению дефектоскопии (очистка от загрязнений и окалины), а также трудности при работе с металлом крупнозернистой структуры [13].

Таким образом, применяемые в настоящее время средства технической диагностики, основанные на методах неразрушающего контроля, в большинстве случаев позволяют с достаточной точностью определить тип дефекта, его местоположение и размеры [14-17]. Однако каждый из перечисленных выше методов позволяет выявлять дефекты определенного типа, либо методы применимы только к объектам контроля, выполненным из металла. В этой связи можно сказать, что применяемые методы и средства технического диагностирования не являются универсальными, поэтому на практике для определения технического состояния оборудования энергетических систем применяют сразу несколько методов диагностики, каждый из которых позволяет выявлять дефекты определенного типа. Вместе с тем, такой подход сильно усложняет процесс диагностирования, увеличивает его сроки и стоимость.

В этой связи необходим жёсткий контроль и регулярный мониторинг технического состояния оборудования и трубопроводов энергетических систем.

#### **Материалы и методы**

Для оценки технического состояния трубопроводов разработана универсальная методика и устройство для поиска различных дефектов, как поверхностных, так и внутренних, при этом данная методика позволяет диагностировать трубопроводы, состоящие из любых материалов.

Предлагаемая методика основана на методе колебаний [18], согласно которому параметры колебаний, возбуждаемых в объекте контроля, изменяются при наличии дефекта в его структуре.

Методика контроля технического состояния трубопроводов включает в себя следующие этапы:

1. Возбуждение колебаний в объекте контроля с помощью инерциального резонатора.

2. Съём колебаний с помощью чувствительного элемента, который может выполнен в виде пьезоэлектрического датчика, микрофона или лазерного пьезодатчика.

3. Запись колебаний, снятых чувствительным элементом в программном обеспечении, разработанном в среде программирования LabVIEW.

4. Преобразование записанных колебаний в спектр и его дальнейший анализ с целью выявления наличия дефекта.

5. Повтор измерений на других частотах.

Для возбуждения колебаний в трубопроводе разработан способ инерциального возбуждения механических колебаний в упругой оболочке [19].

Данное изобретение относится к области неразрушающих методов контроля, а именно к вибрационной диагностике и может быть использовано для анализа технического состояния трубопроводов.

В настоящее время известны различные способы генерации колебаний, регистрации колебаний и разделения их на компоненты. К примеру, известен способ по описанию изобретения к авторскому свидетельству SU № 1516800 А1, МПК G01H 17/00, 18.02.1988, заключающийся в том, что устанавливают регистрационный датчик колебаний в контрольной точке на испытуемом изделии, подвергают изделие вибрационной нагрузке и регистрируют его колебаний в контрольной точке. Недостатками данного способа являются регистрация только изгибных и крутильных колебаний, а также невозможность применения к упругим оболочкам, а именно область применения данного способа ограничивается резонансными испытаниями строительных изделий, например железобетонных панелей.

Наиболее близким разработанному способу возбуждения колебаний является способ определения расположения трубопровода по патенту на изобретение № 2482515, 20.05.2013, заключающийся в том, что в трубопроводе осуществляют генерирование звуковых колебаний с резонансной частотой посредством динамического излучателя, устанавливаемого непосредственно в трубопровод на место запорно-регулирующей арматуры, и регистрацию сигнала динамического излучателя посредством чувствительного элемента.

Недостатком данного способа является невысокая точность и информативность возбуждения механических колебаний в упругой оболочке, так как возбуждение колебаний происходит за счёт динамического излучателя, который сначала возбуждает колебания в воздушной среде внутри упругой оболочки, а затем колебания передаются от воздушной среды к стенкам упругой оболочки. Кроме того, данный способ сложный в реализации, а именно необходимость снятия запорно-регулирующей арматуры для установки на её месте динамического излучателя.

Способ инерциального возбуждения механических колебаний в упругой оболочке обладает повышенной точностью и информативностью возбуждения механических колебаний и регистрации их.

Уникальность способа инерциального возбуждения механических колебаний в упругой оболочке заключается в том, что возбуждение колебаний в упругой оболочке осуществляют с помощью специально разработанного устройства - инерциального резонатора, состоящего из электропривода и закреплённого на его валу эксцентрика, при вращении которого возникают инерционные силы, реализующие через ось привода вибрационное воздействие на стенки упругой оболочки.

На рис. 1 представлена схема стенда, реализующего разработанный способ инерциального возбуждения механических низкочастотных колебаний. Описанный ранее способ реализуется следующим образом.

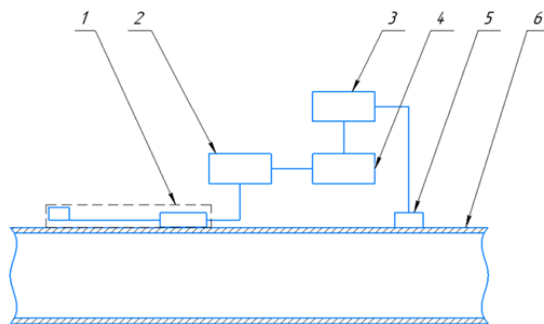


Рис. 1. Стенд для возбуждения диагностических вибрационных низкочастотных колебаний: 1 – инерционный резонатор; 2 – регулятор частоты вращения; 3 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 4 – персональный компьютер; 5 – чувствительный элемент; 6 – трубопровод

На стенку трубопровода 6 устанавливают инерционный резонатор 1 и чувствительный элемент 5. Из персонального компьютера 4 подаётся сигнал на регулятор частоты вращения 2, который приводит в действие инерционный резонатор 1, состоящий из электропривода и закреплённого на его валу эксцентрика, при вращении которого возникают инерционные силы, реализующие вибрационное воздействие на стенки трубопровода 6. Чувствительный элемент 5 измеряет параметры колебаний стенок трубопровода, сигнал от него направляется через аналого-цифровой преобразователь 3 в персональный компьютер 4 для регистрации возбуждаемых инерционным резонатором колебаний стенок трубопровода и дальнейшего анализа их параметров.

При этом обеспечивается возможность варьирования частоты вращения эксцентрика посредством электропривода с числовым программным управлением, состоящим из персонального компьютера, регулятора частоты вращения и инерционного резонатора.

Таким образом, анализируя параметры возбуждаемых инерционным резонатором колебаний стенок трубопровода, регистрируемых чувствительным элементом, можно выявлять и локализовать дефекты, т.е. определять техническое состояние трубопровода.

В качестве чувствительного элемента для съёма и регистрации колебаний стенок трубопровода могут использоваться датчики, которые условно делят на две группы:

- датчики, позволяющие проводить регистрацию колебаний бесконтактным способом, к ним можно отнести микрофоны и лазерные датчики;
- датчики, позволяющие проводить регистрацию колебаний контактным способом, к ним относятся пьезоэлектрические датчики.

В предлагаемой методике съём колебаний можно производить как контактным, так и бесконтактным способами. Для этого в среде программирования *LabVIEW* было разработано два программных обеспечения [20, 21].

Для регистрации колебаний контактным способом, с помощью пьезоэлектрического датчика, в среде *LabVIEW*, была разработана программа «*Condition monitoring system*» [22].

Для регистрации колебаний бесконтактным способом, помощью микрофона или лазерного датчика, была разработана программа «*Contactless monitoring system*» [23].

Кроме регистрации колебаний программы позволяют контролировать вибрационное воздействие, оказываемое инерционным резонатором на исследуемый трубопровод, также позволяет производить сбор, хранение и обработку [24] сигналов, поступающих с чувствительного элемента, в среде *LabVIEW*. В приведенных далее в этой статье результатах экспериментальных исследований в качестве чувствительного элемента использовался пьезоэлектрический датчик, а все сигналы обрабатывались в программе «*Condition monitoring system*» [25, 26].

На рис. 2 представлена панель программы «Генерация», в которой можно контролировать и регулировать частоту вращения инерционного резонатора.

На рис. 3 представлена панель программы «Регистрация», в которой происходит регистрация сигналов с микрофона и преобразование этих сигналов в спектр для дальнейшего анализа.

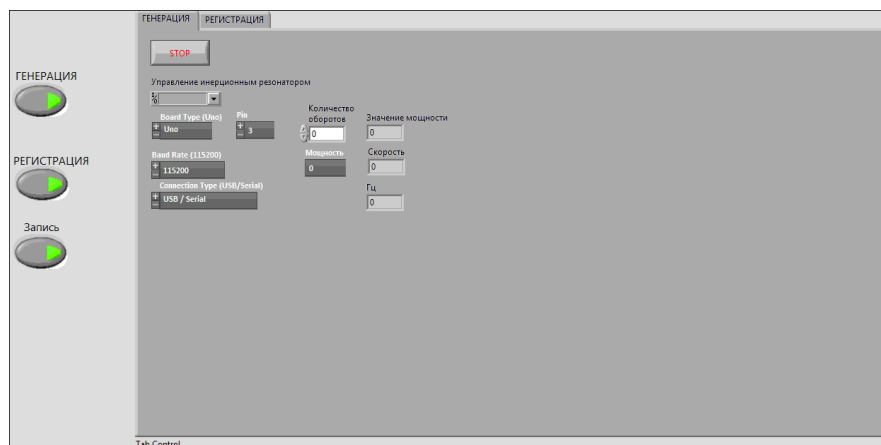


Рис. 2. Панель программы «Генерация».

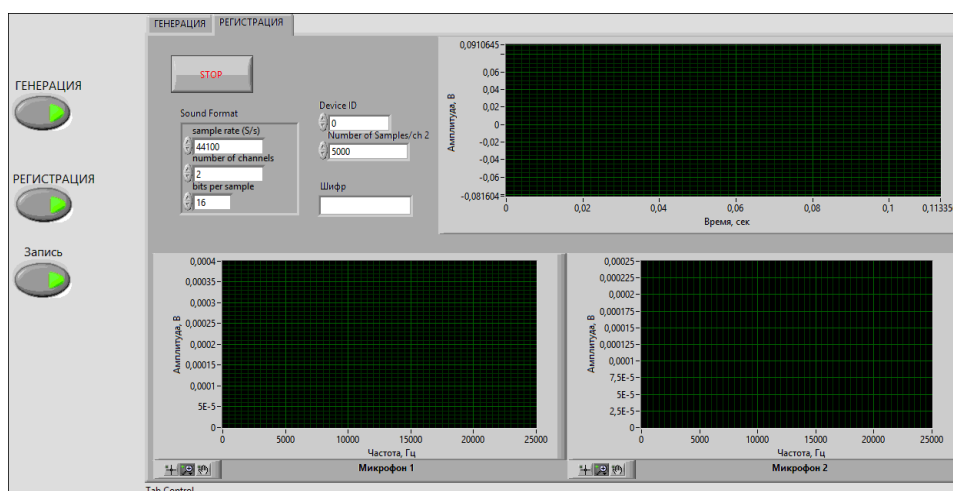


Рис.3. Панель программы «Регистрация».

Перед проведением экспериментальных исследований был проведен расчет исследуемой трубы для определения собственных частот мод её колебаний [27-29].

Для этой цели в системе автоматизированного проектирования (САПР) *Autodesk Inventor 2020* были построены 3D-модели труб, которые в дальнейшем рассчитывались в программном комплексе *ANSYS* [30]. *ANSYS* представляет собой программный пакет конечно-элементного анализа, решающий задачи из широкого спектра инженерной деятельности. *ANSYS* нашел применение как средство моделирования процессов и их прогнозирования в таких отраслях промышленности как двигателестроение, машиностроение, энергетика, автомобилестроение, судостроение, железнодорожный транспорт и т. д.

Расчет собственных частот включал в себя несколько этапов:

- импорт 3D модели исследуемого трубопровода из САПР *Autodesk Inventor 2020* в *ANSYS*;

- указание основных свойств материала трубы: плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона;

- создание сетки конечных элементов, при этом выбираются тип и качество сетки, используемое разбиение, количество узлов и элементов.

В данной работе использовалась сетка на твердом теле высокого качества, стандартная.

Расчет собственных колебаний проводился с помощью модального анализа [31]. Модальный анализ позволяет определить не только частоты собственных колебаний конструкции, но и их формы (моды). В результате расчет определены первые 50 мод колебаний трубопровода.

В представленной работе проведен расчет собственных частот трубы из стеклопластика с диаметром  $d = 72$  мм, толщиной стенки  $\delta = 4$  мм, длиной  $L = 400$  мм

На рис. 4 представлена 3D-модель исследуемой трубы.



Рис. 4. 3D-модель трубопровода из стеклопластика размерами 400х72х6

Свойства материала:

- плотность  $\rho=2000$  кг/м<sup>3</sup>;
- модуль упругости  $E=56 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>;
- коэффициент Пуассона  $\nu=0,32$ .

У исследуемого трубопровода имеются разные собственные частоты колебаний, найденные аналитически в программном комплексе *ANSYS* с помощью модального анализа. Результаты расчета собственных колебаний трубопровода представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты модального анализа стеклопластиковой трубы

Номер моды	Частота, Гц	Номер моды	Частота, Гц
1	262,69	26	1554,5
2	292,19	27	1626,
3	475,99	28	1682,
4	498,7	29	1693,9
5	527,59	30	1770,7
6	532,88	31	1779,6
7	623,76	32	1856,2
8	656,43	33	1915,2
9	710,81	34	1924,3
10	862,45	35	1965,6
<b>11</b>	<b>864,03</b>	36	2083,7
12	1049,3	37	2088,4
13	1065,	38	2096,3
14	1076,2	39	2129,5
15	1135,8	40	2280,9
16	1143,6	41	2303,7
17	1231,1	42	2354,2
18	1404,	43	2383,9
19	1410,3	44	2446,7
20	1447,1	45	2456,2
21	1453,8	46	2510,2
22	1468,5	47	2608,9
23	1483,4	48	2643,8
24	1511,9	49	2648,3
25	1549,2	50	2651,7

На рис.5 изображена одиннадцатая мода колебаний стеклопластиковой трубы при частоте 864,03 Гц



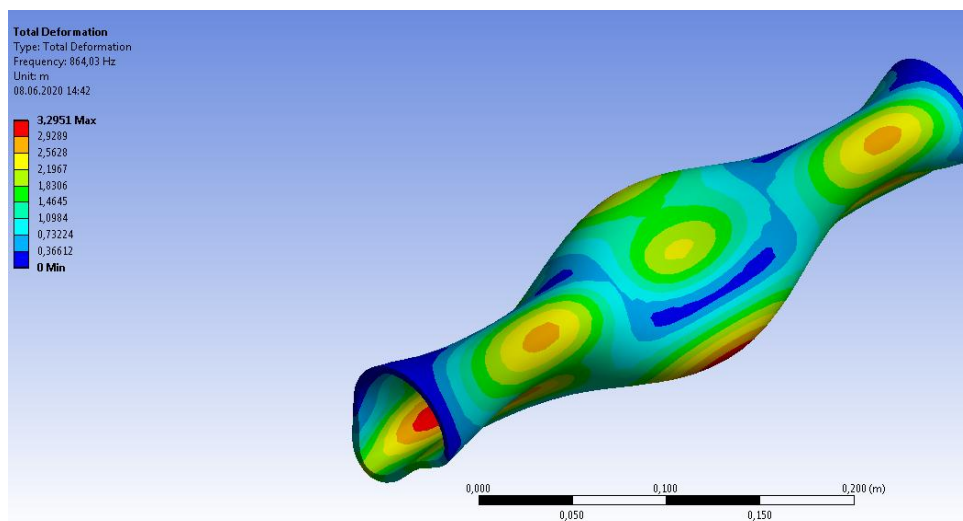


Рис. 5. Одиннадцатая мода колебаний стеклопластиковой трубы при частоте 864,03 Гц

На рис. 6 изображена двадцать пятая мода колебаний стеклопластиковой трубы при частоте 1549,2 Гц.

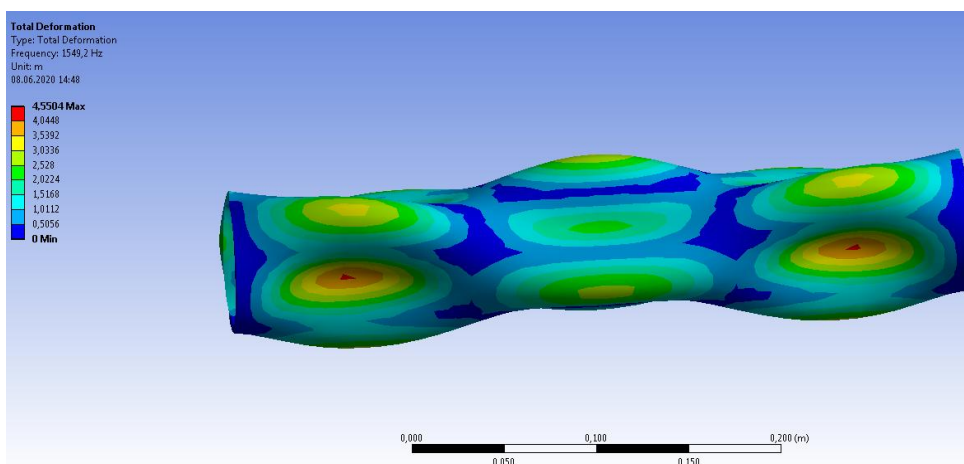


Рис. 6. Двадцать пятая мода колебаний стеклопластиковой трубы при частоте 1549,2 Гц

Для проведения экспериментальных исследований была выбрана наиболее явная частота, равная 864 Гц, при которой наблюдалась максимальная амплитуда сигнала.

В ходе экспериментальных исследований для возбуждения колебаний использовался инерциальный резонатор. Для регистрации колебаний использовался пьезоэлектрический датчик, сигнал от которого поступал в персональный компьютер через аналого-цифровой преобразователь.

Были проведены многократные экспериментальные измерения с изменением точек возбуждения и точек съема колебаний, в разных точках трубопровода, при соблюдении правила: расстояние между инерциальным резонатором и пьезодатчиком было одинаковым и равнялось длине волны генерируемого сигнала.

На рис. 7 представлена фотография экспериментальной установки.

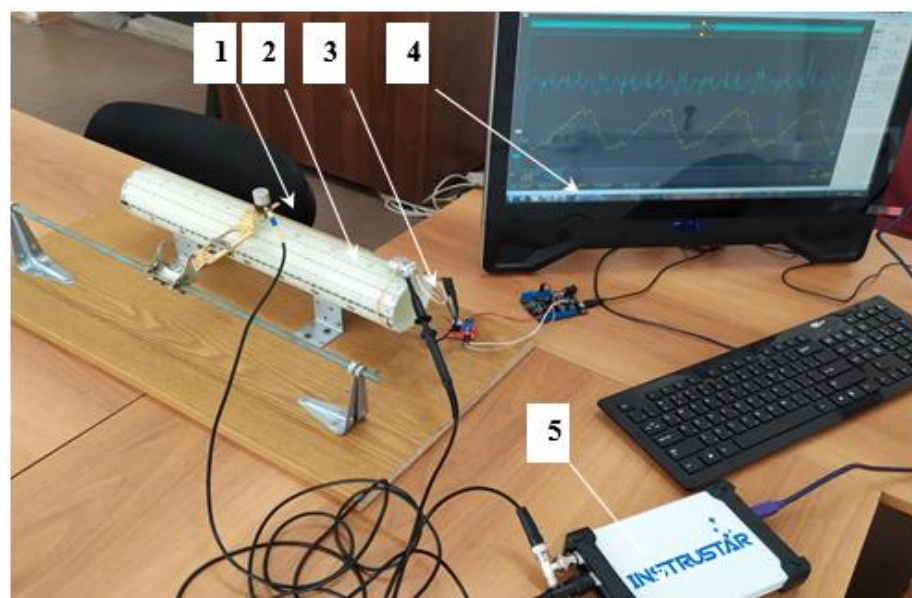


Рис. 7. Экспериментальная установка с трубой из стеклопластика:

1 – пьезоэлектрический датчик; 2 – исследуемый трубопровод; 3 – инерциальный резонатор; 4 – персональный компьютер; 5 – аналого-цифровой преобразователь

В процессе экспериментальных исследований генерировался опорный сигнал в 860 Гц, далее с помощью пьезоэлектрического датчика, расположенного на расстоянии, равном 1 длине волны, регистрировался выходной сигнал.

На рис. 8 изображен спектр опорного сигнала колебаний стеклопластиковой трубы 400x72x4 мм. На спектре по оси ОХ показана частота сигнала в герцах (Гц), по оси ОУ амплитуда сигнала в вольтах (В).

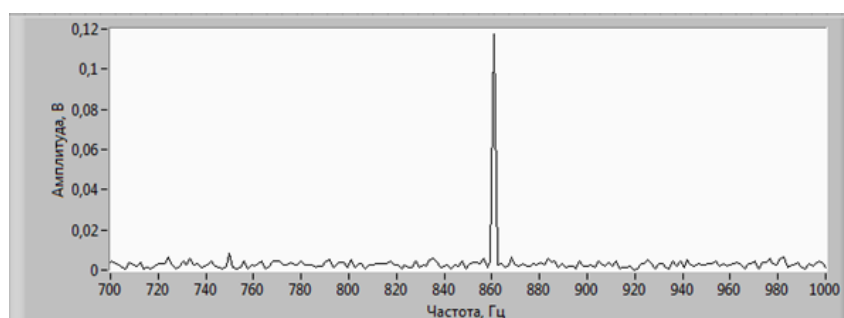


Рис. 8. Спектр опорного сигнала колебаний стеклопластиковой трубы.

На рис. 9 изображен спектр выходного сигнала колебаний стеклопластиковой трубы, регистрируемого пьезодатчиком.

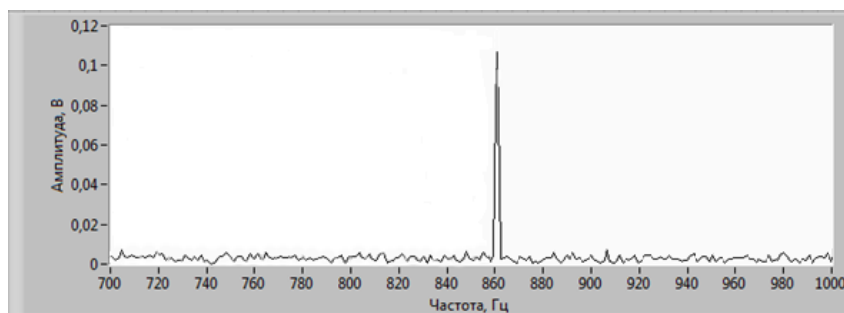


Рис. 9. Спектр выходного сигнала колебаний стеклопластиковой трубы.

### Результаты

Из полученных в результате экспериментальных исследований спектров видно, что частоты опорного и выходного сигналов одинаковы, но при этом происходит диссипация колебательной энергии за счёт прохождения через стенку бездефектного трубопровода.

Известно, что любое нарушение структуры материала (не сплошность, трещина и пр.), характеризующееся как дефект, приводит к увеличению степени рассеивания колебательной энергии, соответственно выходной сигнал, регистрируемый пьезодатчиком, будет заметно слабее опорного, генерируемого инерциальным резонатором. По степени ослабления сигнала можно судить не только о наличии дефекта, но также и о его размерах.

### **Обсуждение**

В статье предложена методика оценки технического состояния трубопроводов, представлено устройство инерциального возбуждения колебаний в исследуемом объекте. В статье представлены результаты экспериментальных исследований на трубопроводе из стеклопластика размерами 400\*72\*4 мм. Результаты показали, что амплитуда сигнала на бездефектном трубопроводе меняется незначительно. Происходит процесс нормального рассеивания колебательной энергии за счет её прохождения через твердое тело, однако, учитывая, что любой дефект является изменением структуры материала, соответственно коэффициент рассеивания колебательной энергии в месте дефекта будет больше, что приведет к ослаблению сигнала, регистрируемого пьезодатчиком. Предлагаемая методика является основой создания нового измерительно-диагностического комплекса для вибрационного контроля трубопроводов.

### **Заключение или Выводы**

Результаты исследований, приведенные в статье, показали, что по степени ослабления амплитуды сигнала можно судить не только о наличии дефекта, но также и о его размерах. Предлагаемая методика является основой создания нового измерительно-диагностического комплекса для вибрационного контроля трубопроводов.

### **Литература**

1. Гапоненко С.О. Акустико-резонансный информационно-измерительный комплекс и методика контроля местоположения заглубленных трубопроводов: автореферат дис. кандидата технических наук / Казан. гос. энергет. ун-т. Казань, 2017. 22 с.
2. Gaponenko S.O., Nazarychev S.A., Kondratiev A.E. Determination of informative frequency ranges for buried pipeline location control // Helix. 2018. V. 8(1). P. 2481-2487.
3. Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Измерительно-диагностический комплекс для определения расположения скрытых трубопроводов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. Казань: КГЭУ. 2013. №3-4. С. 138-141.
4. Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Модельная установка для разработки способа определения местоположения скрытых трубопроводов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. Казань: КГЭУ. 2014. №7-8. С. 123-129.
5. Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Перспективные методы и методики поиска скрытых каналов, полостей и трубопроводов виброакустическим методом // Вестник Северо-Кавказского федерального университета». Ставрополь: СКФУ. 2015. №2(47). С. 9-13.
6. Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Методика поиска скрытых полых объектов в грунте // Научному прогрессу – творчество молодых. Поволжский государственный технологический университет. 2017. №2-4. С. 115-118.
7. Шакурова Р.З., Гапоненко С.О. Разработка надёжного и энергоэффективного способа диагностики технического состояния энергетического оборудования. // Материалы 14 Международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых» Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2019.
8. Шакурова Р.З., Гапоненко С.О. Повышение надёжности работы энергетических систем путем определения технического состояния трубопроводов // Материалы XIV Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения». – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019.
9. Гапоненко С.О., Шакурова Р.З. Повышение эффективности энергетических систем и систем транспортировки энергоносителя с использованием методов математического моделирования // Материалы 24 международной молодежной научной конференции «ТУПОЛЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ (школа молодых ученых)». Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2019.
10. Зацепин А.Ф. Акустический контроль; под редакцией члена-корреспондента РАН, профессора, доктора технических наук В. Е. Щербинина ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, [Физико-технологический институт]. Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2016. 209 с.
11. Канцдалов В.Г., Королев В.С., Балтян В.Н. и др. Диагностика типовых повреждений

трубопроводов и физико-механических свойств котло-турбинных сталей энергооборудования ТЭС и АЭС :учебное пособие. Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет». Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2018. 90 с.

12. 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).

13. Zachwieja J // Effectiveness of diagnosing damage to an industrial pump rotor by analysing its vibrations // Diagnostyka. 2019. V. 20. Iss. 1. P. 33-39.

14. Zachwieja J. Pipeline stress analysis under supporting structure vibration // Diagnostyka. 2017. Vol. 18. Iss. 2. P. 23-30.

15. Stein Y., Zonova, N., Kubrak, I. Development and improvement of methods of diagnostics of heating systems in modern conditions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. V. 90. Iss. 1.

16. Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Шакурова Р.З. Способ инерциального возбуждения механических колебаний в упругой оболочке // Патент России № 2705515 от 07.11.2019.

17. Потапов Д.А., Телышев ДВ. Основы проектирования виртуальных приборов в программной среде LabVIEW :компьютерный лабораторный практикум. Министерство образования и науки Российской Федерации, Национальный исследовательский университет «МИЭТ». Москва : МИЭТ, 2017. 48 с.

18. Федосов В.П. Цифровая обработка звуковых и вибросигналов в LabVIEW [Текст] : функций системы NI Sound and Vibration LabVIEW / Москва:ДМК Пресс, 2009. 1289 с.:ил., табл.

19. Гапоненко С.О., Шакурова Р.З., Кондратьев А.Е., Condition monitoring system // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019618374 от 01.07.2019.

20. Гапоненко С.О., Шакурова Р.З., Кондратьев А.Е., и др. Contactless monitoring system // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019617616 от 18.06.2019.

21. Капранов Б.И., Короткова И.А. Спектральный анализ в неразрушающем контроле. Томск: Томский политехнический университет, 2008.

22. Kondratiev A.E., Gaponenko S.O., Shakurova R.Z., Nazarychev S.A. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series // Acoustic-resonance method for control of the location of hidden hollow objects 2019.

23. Kondratiev A.E., Gaponenko S.O., Shakurova R.Z., Nazarychev S.A. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series // Information-measuring system for monitoring the location of underground gas pipelines on the basis of improved acoustic resonance method. 2019.

24. Kondratiev A.E., Gaponenko S.O., Shakurova R.Z., Dimova R. E3S Web of Conferences, SES 2019 // Improving the methodology for assessing the technical condition of equipment during the transportation of energy carrier in energy systems and complexes. 2019.

25. Kondratiev A.E., Gaponenko S.O., Shakurova R.Z., Dimova R. E3S Web of Conferences, SES 2019 // Improving the efficiency of energy complexes and heat supply systems using mathematical modeling methods at the operational stage. 2019

26. Nazarychev S.A., Gaponenko S.O., Shakurova R.Z. Development of Software and Hardware Complex based on Theoretical Modeling and Experimental Study of Linearly Extended Energy Facilities on their Technical Condition // Helix. 2019. V. 9 (5):5621- 5630.

27. Леонтьев Н.В. Применение системы ANSYS к решению задач модального и гармонического анализа. Нижний Новгород: 2006.

#### Авторы публикации

**Шакурова Розалина Зуфаровна** – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Гапоненко Сергей Олегович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Кондратьев Александр Евгеньевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

## References

1. Gaponenko SO. Acoustic-resonance information-measuring complex and methodology for monitoring the location of buried pipelines: abstract of dis. candidate of technical sciences. Kazan state power engineering university. Kazan. 2017. P. 22
2. Gaponenko SO, Nazarychev SA, Gaponenko SO, et al. Determination of informative frequency ranges for buried pipeline location control. *Helix*. 2018;8(1):2481-2487.
3. Gaponenko SO, Kondratiev AE, et. al. Measuring and diagnostic complex for determining the location of hidden pipelines. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2013;4:138-141.
4. Gaponenko SO, Kondratiev AE. Model installation for the development of a method for determining the location of hidden pipelines. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2014;7(8):123-129.
5. Gaponenko SO, Kondratiev AE. Promising methods and techniques for searching for hidden channels, cavities and pipelines by vibroacoustic method. *Bulletin of the North Caucasus Federal University*. 2015;2(47):9-13.
6. Gaponenko SO, Kondratiev AE. Methodology for the search for hidden hollow objects in the ground. *Scientific progress - creativity of the young*. 2017; 2(4):115-118.
7. Shakurova RZ, Gaponenko SO. Development of a reliable and energy efficient method for diagnosing the technical condition of power equipment. *Materials of the XIV International Youth Scientific Conference on Natural Science and Technical Disciplines "Scientific Progress - Creativity of Young"*. 2019;2:195-197.
8. Shakurova RZ, Gaponenko SO. Improving the reliability of energy systems by determining the technical condition of pipelines. *Materials of the XIV International Youth Scientific Conference "Tinchurin Readings"*. 2019; 184-187.
9. Gaponenko SO, Shakurova RZ. Improving the efficiency of energy systems and energy transportation systems using mathematical modeling methods. *Materials of the XXIV International Youth Scientific Conference "TUPOLEV READINGS (school of young scientists)"*. 2019; 641-644.
10. Talanin AA, Mazanov AM, Zakalyukina LA, et.al. Review of quality control methods for welded joints. *NiKa*. 2017.
11. Stepanov AP, Stepanov MA. Method for magnetic flaw detection of extended ferromagnetic structures. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2012;1(33).
12. Korotin AI, Lazarev AL, Svyatkina GN. Application of ultrasonic control methods to assess the quality of joints in metal structures in modern conditions. *Ogarev-Online*. 2015;13(54).
13. Chistyakova AV, Orlov VA, Chuvin VA. Diagnostics of the technical condition of metal pipelines. *Environmental management*. 2016;2.
14. Belov AA, Ivanov YuD, et al. Recommendations for choosing a method for monitoring the technical condition of pipelines. *Actual problems of the humanities and natural sciences*. 2015;1-10.
15. Zachwieja J. Effectiveness of diagnosing damage to an industrial pump rotor by analysing its vibrations. *Diagnostics*. 2019;20(1):33-39.
16. Zachwieja J. Pipeline stress analysis under supporting structure vibrations. *Diagnostics*. 2017;18(2):23-30.
17. Stein Y, Zonova N, et al. Development and improvement of methods of diagnostics of heating systems in modern conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017; 90(1),012139.
18. Gaponenko SO, Kondratiev AE, Shakurova RZ. Method of inertial excitation of mechanical vibrations in an elastic shell. Patent of Russia No. 2705515 dated 07.11.2019.
19. Hudonogova LI. Development of a system for remote calibration of measuring instruments based on the use of technological capabilities of the Lab VIEW software environment. *Well-being vectors: economy and society*. 2013;4(10).
20. Tychkov AYU, Churakov PP. Development of virtual measuring generators for functional diagnostics. *Measurement. Monitoring. Control. The control*. 2015;2(12).
21. Gaponenko SO, Shakurova RZ, Kondrat'ev AE, et al. Condition monitoring system. Certificate of state registration of a computer program №2019618374 dated 01.07.2019.
22. Gaponenko SO, Shakurova RZ, Kondrat'ev AE, et al. Contactless monitoring system. Certificate of state registration of a computer program. №2019617616. dated 06/18/2019.
23. Mrachkovskij OD, Vishnevyy SV. Modeling a spectral signal analyzer in the LabVIEW software environment. *Bulletin of NTUU "KPI". Radio engineering, Radio apparatus engineering*. 2008;37.
24. Gaponenko SO, Shakurova RZ, et al. Acoustic-resonance method for control of the location of hidden hollow objects. *IOP Conf. Series:Journal of Physics:Conf. Series*. 2019; 1328,012054.
25. Gaponenko SO, Shakurova RZ, et al. Information-measuring system for monitoring the location of underground gas pipelines on the basis of improved acoustic resonance method. *IOP Conf.*

Series: *Journal of Physics: Conf. Series*. 2019; 1328,012055.

26. Gaponenko SO, Shakurova RZ, et al. Improving the methodology for assessing the technical condition of equipment during the transportation of energy carrier in energy systems and complexes. *E3S Web of Conferences*. 2019; 124,01021.

27. Gaponenko SO, Shakurova RZ, et al. Improving the efficiency of energy complexes and heat supply systems using mathematical modeling methods at the operational stage. *E3S Web of Conferences*. 2019;124,05029.

28. Gaponenko SO, Shakurova RZ, et al. Development of software and hardware complex based on theoretical modeling and experimental study of linearly extended energy facilities on their technical condition. *Helix*. 2019;9(5):5621-5630.

29. Verhman SI, Kulagin VN, et al. Multipurpose Analysis Software. ANSYS. ONV.1998;5.

30. Grinev MA, Anoshkin AN, et al. Computational and experimental studies of natural frequencies and vibration modes of a straightening apparatus blade made of polymer composite materials. *PNRPU Bulletin. Mechanics*. 2016.

### Authors of the publication

**Rozalina Z. Shakurova** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Sergey O. Gaponenko** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Alexander E. Kondratiev** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Получено**

**18 ноября 2020г.**

**Отредактировано**

**09 декабря 2020г.**

**Принято**

**09 декабря 2020г.**