

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

---

## CONSTRUCTION TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2023. Т. 25. № 6. С. 139–151.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2023; 25 (6): 139–151.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 620.16-52:621.644(203)

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-139-151

EDN: XNNNTL

### РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПЛАНОВО-ВЫСОТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Петр Владимирович Бурков<sup>1,2</sup>, Алена Алексеевна Марина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский

Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

**Аннотация.** *Актуальность.* В настоящее время происходит повсеместное внедрение систем автоматизированного мониторинга в производственные процессы. Современные системы автоматизированного мониторинга имеют встроенное программное обеспечение и аналитические модули, позволяющие обрабатывать большой объем данных проектной, исполнительной документации, результатов изысканий и измерений в процессе эксплуатации объектов, а также выполнять комплексный анализ результатов мониторинга с учетом текущих параметров и прогнозировать состояние вечной мерзлоты, выполнять функции планирования и контроля за выполнением программ работ.

В статье рассмотрена возможность использования в процессе изысканий оценки собственных частот и форм колебаний участков надземных строительных конструкций посредством разработанного устройства для контроля пространственного положения.

*Целью* исследования является разработка метода контроля пространственного положения надземных трубопроводов, сооружаемых и эксплуатируемых в сложных геологических условиях, с использованием системы автоматизированного мониторинга.

*Практическая значимость* исследования заключается в том, что полученные данные могут быть использованы в методике контроля пространственного положения строительной конструкции, заключающейся в анализе данных по колебаниям, получаемых

с автоматизированных постов наблюдения, которая позволяет с приемлемой для практики погрешностью оценивать смещение от положения равновесия и частоту колебаний протяженных участков конструкций и определять критическое состояние системы.

**Ключевые слова:** инженерно-геологические и инженерно-геодезические обследования, воздушное и наземное лазерное сканирование, оценка изменений планово-высотного положения

**Для цитирования:** Бурков П.В., Марина А.А. Разработка системы автоматизированного мониторинга для контроля планово-высотного положения строительных конструкций // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 139–151. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-139-151. EDN: XNNNTL

## ORIGINAL ARTICLE

### DEVELOPMENT OF AUTOMATED MONITORING FOR PLANNED-HIGH-ALTITUDE POSITION CONTROL

**Petr V. Burkov<sup>1,2</sup>, Alena A. Marina<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

**Abstract.** GIS has built-in software and analytical modules that allow processing large data of design, as-built documentation, survey results and measurements during building operation as well as conducting a comprehensive analysis of monitoring results and predict the permafrost state, perform planning and monitoring of works.

**Purpose:** The paper examines the possibility of using in the survey process in assessment of natural frequencies and vibrations of sections of above-ground buildings using the proposed device to control its spatial position.

**Practical implications:** The data obtained can be used in monitoring the spatial position of buildings, based on analyzing vibrations data obtained from automated observation posts, which allows to estimate the displacement from the equilibrium position and vibrational frequency of extended objects with an error acceptable for practice and determine the critical state of the system.

**Keywords:** geological and geodetic surveys, ground-based laser scanning; planned-high-altitude position control

**For citation:** Burkov P.V., Marina A.A. Development of automated monitoring for planned-high-altitude position control. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (6): 139–151. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-139-151. EDN: XNNNTL

### Введение

Мониторинг объектов строительства в нефтегазовой отрасли выполняется с целью систематического наблюдения, измерения и контроля параметров объектов и окружающей среды [7, 8, 9, 11, 12, 13, 16], а именно:

- состояния грунтов;
- геологических процессов;
- состояния оснований фундаментов;
- геометрии и напряженно-деформированного состояния строительных конструкций.

В рамках геотехнического мониторинга выполняются наземные и дистанционные обследования объектов, в том числе инженерно-геологические и инженерно-геодезические, воздушное и наземное лазерное сканирование. По итогам камеральной обработки результатов обследования осуществляется выдача рекомендаций по реализации компенсирующих мероприятий, включая технические решения [1, 3, 4]. С помощью постоянного контроля процессов, связанных с взаимодействием объекта с грунтом, и мониторинга параметров эксплуатации строительных конструкций в сложных инженерно-геологических условиях можно обеспечить безопасную эксплуатацию для снижения возможного ущерба от аварий [5].

Такой подход представляется возможным, если обеспечивать систематический контроль напряженно-деформированного состояния и пространственного положения в зонах с высоким риском возникновения аварийных ситуаций в трубопроводной системе. В рамках рассматриваемых вопросов обеспечения безаварийной эксплуатации предлагается метод автоматизированного мониторинга, позволяющий непрерывно получать с пунктов наблюдения информацию о пространственном положении объекта, его деформации, определять его критическое отклонение от проектного или исходного положения и сигнализировать персоналу об этом.

В процессе исследования была разработана автоматизированная система контроля пространственного положения наземного объекта. Данная система позволяет осуществлять непрерывный мониторинг пространственного положения и параметров вибрации объекта с помощью датчиков на постах наблюдения. С учетом того, что объект находится под влиянием различных процессов, которые сопровождают его эксплуатацию, непрерывный поток данных с постов наблюдения позволит контролировать и прогнозировать пространственное положение объекта. С помощью разработанного устройства возможно осуществлять наблюдение не только за конкретным участком объекта, но за всей системой в целом, т. к. наблюдательные посты с датчиками размещаются на всем необходимом пространстве и позволяют проводить анализ данных на основе получаемых параметров работы системы.

Любые процессы, происходящие в системе, имеют свойственные им характерные проявления, описываемые определенными параметрами эксплуатации. Разработанная система автоматизированного мониторинга на основе анализа результатов измерений параметров совместно с результатами диагностики и мониторинга системы, эксплуатационной и проектной документации позволяет эти проявления исследовать и оценивать техническое состояние объекта и системы в целом. Кроме того, получение информации от системы мониторинга о возникновении отклонений параметров эксплуатации от установленной нормы дает возможность принимать своевременные и эффективные управленческие решения по предотвращению деформаций трубопроводов.

Предлагаемая система автоматизированного мониторинга позволяет решать следующие задачи:

– выявлять участки деформации объекта (участка трубопровода) на начальном этапе;

- определять зоны высокой сейсмичности;
- оценивать напряженно-деформированное состояние системы;
- определять участки объекта для приоритетных диагностических исследований;
- проводить диагностические обследования.

Приблизительно 50 % неисправностей на объектах трубопроводного транспорта, приводящих к вынужденному простоям, тесно связаны с технологическим процессом. При этом 90 % из них являются прогнозируемыми и даже контролируруемыми. Соответственно, при наличии базы данных о параметрах эксплуатации объекта посредством системы обработки данных и интеллектуализированных систем (использование искусственного интеллекта) возможно прогнозировать процессы, приводящие к деформациям трубопровода и, как следствие, авариям.

Обобщая вышесказанное, следует отметить, что непрерывный поток данных о состоянии системы, интегрированный в систему автоматизации технологического процесса, позволит снизить риск возникновения дефектов, непредвиденных аварий, а также принимать эффективные управленческие решения в области проведения мероприятий по геотехническому мониторингу и ремонту трубопроводной системы.

Цель работы – разработка метода контроля пространственного положения надземных трубопроводов, эксплуатируемых в сложных геологических условиях, с применением системы автоматизированного мониторинга.

#### **Постановка задачи, методы исследования и эксперимент**

Для обеспечения проведения замеров параметров эксплуатации, передачи и обработки данных система автоматизированного мониторинга включает в себя четыре блока.

1. Блок измерений.
2. Блок передачи данных.
3. Блок хранения данных.
4. Блок обработки данных.

Блок измерений посредством технических средств, а именно датчиков, осуществляет измерение параметров, характеризующих пространственное положение объекта и процесс его эксплуатации, а также передает данные в блок передачи данных. Блоки измерений, передачи, хранения и обработки данных располагаются непосредственно на исследуемом объекте, в случае мониторинга участка трубопровода – это сам трубопровод или его опоры при надземном исполнении. Места установки блоков считаются наблюдательными пунктами.

Для контроля и регистрации перемещения объекта используется модуль 3-осевого гироскопа и акселерометра MPU-6050. В основе данного модуля лежит микросхема MPU-6050, в которой размещаются два датчика: акселерометр и гироскоп. Гироскоп измеряет угловые скорости по трем осям с разными пределами измерений: 250, 500, 1000 и 2000 град/с. Акселерометр, или датчик вибрации, измеряет ударное и вибрационное ускорение в системах диагностики. Акселерометр микросхемы MPU-6050 использует пьезоэлектрический эффект, обеспечивая расширенный частотный диапазон, хорошую чувствительность

и высокое разрешение. Совместное использование акселерометра и гироскопа позволяет определять движение тела в трехмерном пространстве. Их данные предварительно обрабатываются и непрерывно передаются через интерфейс I2C на микроконтроллер. Для наиболее точного трекинга быстрых и медленных движений возможно запрограммировать необходимые режимы:  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$ ,  $\pm 2000$  град/с для гироскопа, а также  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$ ,  $\pm 16g$  – для акселерометра. Необходимое напряжение питания для модуля – от 3,5 до 6 В [10, 14, 15].

Блок передачи данных необходим для сбора информации со всех наблюдательных пунктов и передачи ее в блок хранения данных и далее оператору посредством mesh-сети, позволяющей отдаленным наблюдательным пунктам выступать передатчиками информации, что обеспечивает непрерывный поток данных с устройств.

Блок хранения данных осуществляет прием, первичную обработку и хранение полученной с наблюдательных пунктов информации.

Блок обработки данных необходим для определения положения в пространстве и отображения параметров эксплуатации объекта, визуализации результатов измерений и расчетов, а также выработки управленческих решений. Блок обработки данных представляет собой удаленное автоматизированное рабочее место со специальным программным обеспечением, которое позволяет исследовать влияние геотехнических процессов на объект исследования, а именно на участок трубопровода, и вырабатывать управленческие решения по проведению плановых и дополнительных мероприятий по диагностике или ремонту объекта. Также блок обработки данных сигнализирует оператору о превышении контролируемых параметров их уставок (пороговых значений) [6].

Блоки, объединенные в устройство, устанавливаются на наблюдательных пунктах, расстояние между которыми может варьироваться от 20 м до 6 км. После установки устройство практически не нуждается в обслуживании, т. к. его конструкция предусматривает автономное функционирование.

Помимо блоков, обеспечивающих измерение параметров, передачу и обработку информации, устройство включает в себя автономные источники электропитания:

- литий-полимерный аккумулятор, 3500 мА·ч;
- солнечная панель размером 95×95 мм, напряжение 5,5 В, мощность 1 Вт;
- преобразователь DC/DC повышающий (с 2,5 до 5 В);
- модуль Пельтье TEC1-12712, принцип действия которого основан на эффекте Пельтье (охлаждение или нагрев элемента при прохождении через него электрического тока);
- радиатор 100×70 мм.

Для обеспечения автономности системы автоматизированного мониторинга в разработанном устройстве используется обратный эффект элемента Пельтье, заключающийся в возникновении электрического тока в замкнутой цепи из двух проводников, контакты которых имеют разную температуру. Поскольку устройство устанавливается на трубопровод, возникает разница температур между стенкой трубопровода и окружающей средой. Бесперебойное питание разработанного прибора осуществляется при помощи модуля зарядного

устройства (ЗУ). Для этого к модулю ЗУ TP4056 подключены литий-полимерный аккумулятор, солнечная панель и элемент Пельтье, благодаря которым происходит питание ЗУ. Модуль зарядного устройства также заряжает аккумулятор, и при отсутствии источника питания питание для контроллера поступает от аккумулятора. Для подключения к элементу Пельтье используется модуль, повышающий постоянное напряжение до 5 В, – преобразователь DC/DC, повышающий с 2,5 до 5 В. Сам элемент Пельтье помещается в теплоизоляцию (вспененный каучук) и устанавливается на внешнюю поверхность трубопровода при помощи термопроводящей клейкой пасты, к нему с помощью той же пасты крепится радиатор, над которым расположена солнечная панель. Таким образом достигается наибольший перепад температур для выработки электрического тока элементом Пельтье. При помощи такой системы питания обеспечивается автономность разработанного устройства. Устройство соответствует требованиям:

- электробезопасности: потребляемая мощность – 5 Вт;
- пожаровзрывобезопасности: в собранном виде устройство крепится на внешней поверхности трубопровода при помощи термопроводящей клейкой пасты.

Энергопотребление устройства снижается за счет его программирования на работу по заданному графику в короткие промежутки времени.

Стоит учитывать, что при эксплуатации таких объектов, как трубопроводные системы, возникают интенсивные волновые процессы, вызываемые колебаниями давления, гидроударами и т. д., и вибрационные процессы в результате работы насосных агрегатов, изменения режима работы системы, аварийных отключений электроэнергии, ошибочных действий обслуживающего персонала. Все перечисленные факторы приводят к возникновению дополнительных напряжений в стенках трубопровода. Рассматриваемые причины обычно не учитываются при проектировании трубопроводных систем. Так, при проектировании магистральных трубопроводов учитываются все воздействия, касающиеся их нагрузки: изменения температуры, вес засыпки, ветровые и снеговые нагрузки и т. д., за исключением динамического характера нагружения стенки трубопровода при технологических операциях. Нормативные документы различных отраслей промышленности в основном регламентируют допустимые значения некоторых параметров, например уровня вибрации трубопроводов. Так, по нормам Мингазпрома СССР, аварийный уровень вибрации измеряется значением виброскорости  $v_e = 18$  мм/с и величиной амплитуды перемещения трубопровода  $A = 1,2$  мм [2, 6]. При этом повышенная вибрация трубопроводов может привести к преждевременному износу и технологическим авариям. В свою очередь, параметры вибрации, такие как перемещения объекта по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , позволяют описывать пространственное положение объекта.

Для разработки методики контроля пространственного положения трубопровода, осуществляемого разработанной системой автоматизированного мониторинга, проведены экспериментальные исследования, основанные на регистрации параметров вибрации (колебаний) фрагмента трубопровода модулем MPU-6050. Основными величинами, характеризующими вибрацию, являются:

частота колеблющегося тела  $f$ , Гц; амплитуда смещения от положения равновесия  $A$ , мм; скорость колебания тела  $v$ , м/с; ускорение  $a$ , м/с<sup>2</sup>. Значениями амплитуды смещения  $A$  часто ограничивают допустимую вибрацию агрегатов и фундаментов. Колебательная скорость  $v$  поверхности характеризует уровень возникающего шума, а ускорение  $a$  определяет действующие динамические силы. Таким образом, опираясь на данные параметры, можно судить о состоянии системы и о процессах, происходящих в ней. Гипотеза экспериментального исследования заключается в том, что данные по амплитуде смещения  $A$ , мм, по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и частота колебаний  $f$ , Гц, трубопровода позволят сделать вывод о его пространственном положении и техническом состоянии. Оценка технического состояния трубопроводной системы будет производиться на основании сравнения фактических величин частоты колебаний и смещений трубопровода с допустимыми уровнями вибрации согласно нормативной документации. Для проведения экспериментального исследования использовался фрагмент трубопровода, изготовленного из стали Ст 20, внутренний диаметр  $d = 219$  мм, толщина стенки  $\delta = 8$  мм. Конструктивно экспериментальная установка состоит из фрагмента трубы, располагающейся на опорах.

### Обсуждение результатов исследований

Для генерации внешнего вибрационного воздействия на фрагмент трубопровода, приближенного к происходящему в момент эксплуатации системы, использовался генератор колебаний с функцией настраивания производимой частоты колебаний. При проведении исследования воспроизводились колебания частотами 5, 10, 15, 20, 25, 30 Гц (рис. 1–6, таблица).

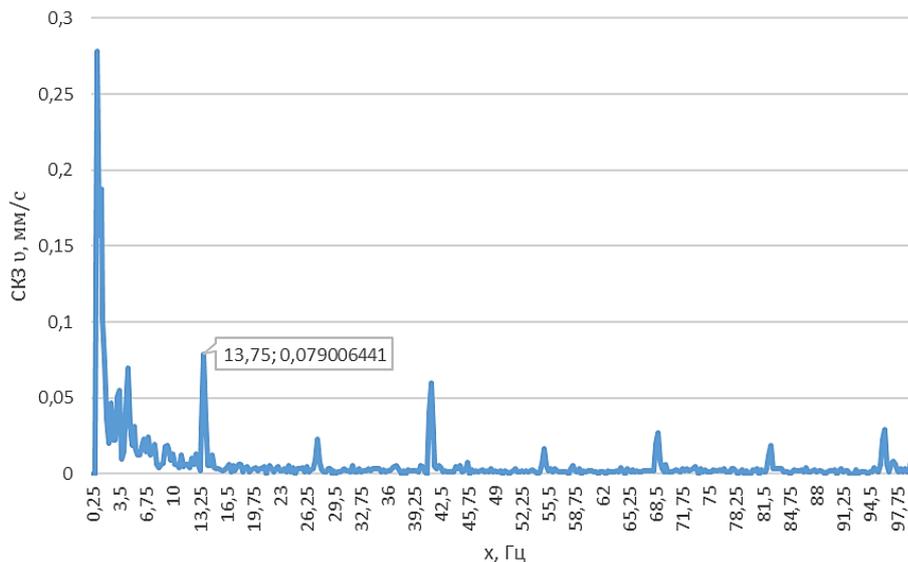


Рис. 1. График распределения частоты колебаний  $f$ , Гц, трубопровода в зависимости от среднего квадратического значения виброскорости СКЗ  $v$ , мм/с, в точке 1, частота 5 Гц

Fig. 1. Distribution of vibration frequency, pipeline depending on the mean square value of vibration velocity at point 1. Frequency: 5 Hz

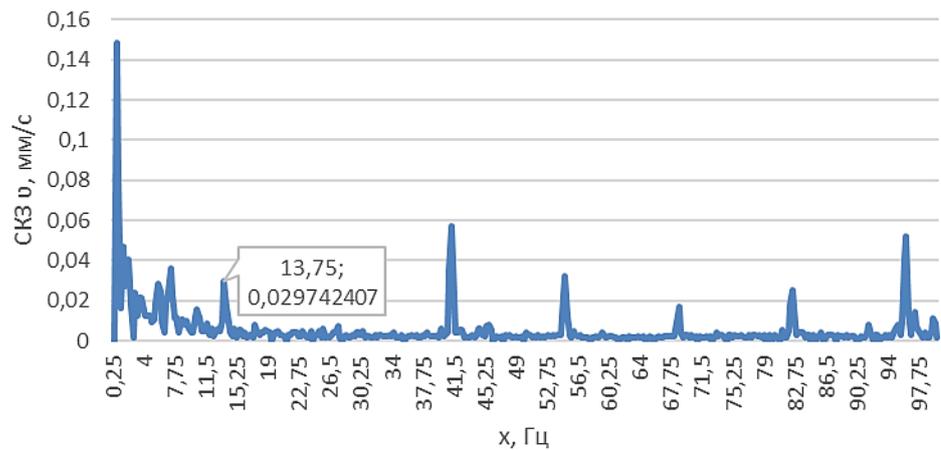


Рис. 2. График распределения частоты колебаний  $f$ , Гц, трубопровода в зависимости от среднего квадратического значения виброскорости СКЗ  $v$ , мм/с, в точке 2, частота 5 Гц

Fig. 2. Distribution of vibration frequency, pipeline depending on the mean square value of vibration velocity at point 2. Frequency: 5 Hz

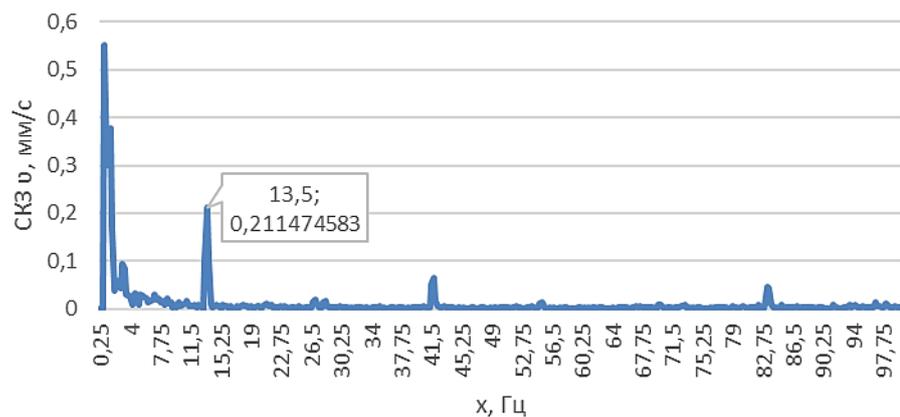


Рис. 3. График распределения частоты колебаний  $f$ , Гц, трубопровода в зависимости от среднего квадратического значения виброскорости СКЗ  $v$ , мм/с, в точке 1, частота 15 Гц

Fig. 3. Distribution of vibration frequency, pipeline depending on the mean square value of vibration velocity at point 1. Frequency: 15 Hz

Замеры параметров вибрации проводились модулем гироскопа и акселерометра MPU-6050, подключенным к микроконтроллеру ESP32. При программировании микроконтроллера модулю MPU-6050 задавалась функция записи виброскорости по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , которая в дальнейшем пересчитывается в смещение объекта. Анализ данных с датчика в микроконтроллере происходил с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ). Быстрое преобразование Фурье – это алгоритм обработки сигналов и анализа данных, позволяющий получить из временной зависимости сигнала его частотные компо-

ненты, т. е. провести спектральный анализ. В результате были получены графики распределения частот колебаний  $f$ , Гц, трубопровода в зависимости от среднего квадратического значения виброскорости СКЗ  $v$ , мм/с.

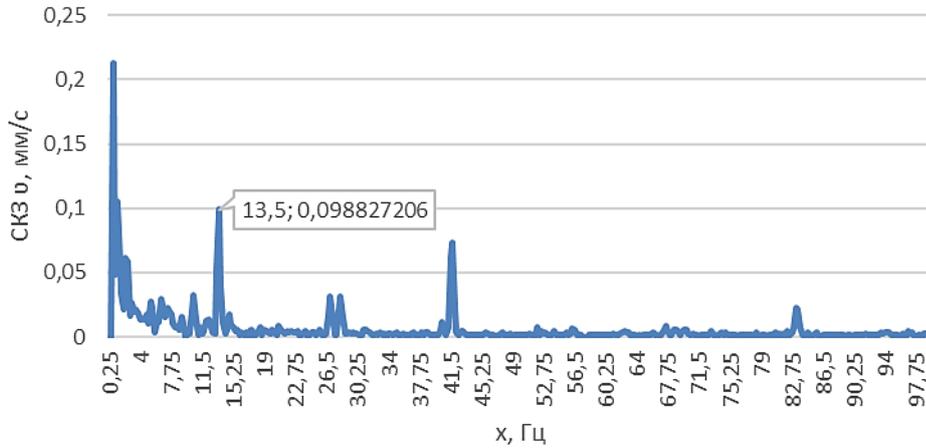


Рис. 4. График распределения частоты колебаний  $f$ , Гц, трубопровода в зависимости от среднего квадратического значения виброскорости СКЗ  $v$ , мм/с, в точке 2, частота 15 Гц

Fig. 4. Distribution of vibration frequency, pipeline depending on the mean square value of vibration velocity at point 2. Frequency: 15 Hz

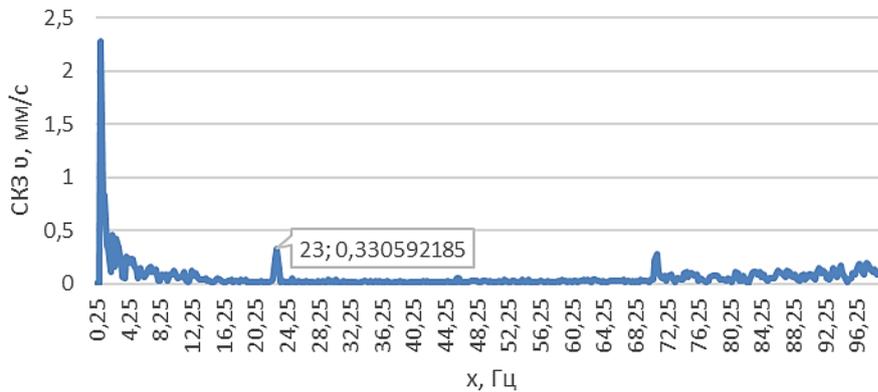


Рис. 5. График распределения частоты колебаний  $f$ , Гц, трубопровода в зависимости от среднего квадратического значения виброскорости СКЗ  $v$ , мм/с, в точке 1, частота 25 Гц

Fig. 5. Distribution of vibration frequency, pipeline depending on the mean square value of vibration velocity at point 1. Frequency: 25 Hz

При проведении исследования замеры параметров вибрации проводились в двух точках на разных концах фрагмента трубопровода.

Графики колебаний по результатам БПФ позволяют определить частоту колебаний трубопровода. При интерпретации полученных графиков использовалась методика диагностики дефектов вращающегося оборудования по

спектрам вибросигналов, в соответствии с которой частота колебаний трубопровода определяется по левому пику на графике (см. рис. 1) после его зашумленной части (после 6,25 Гц). Таким образом, получены значения частоты колебаний фрагмента трубопровода, представленные в таблице.

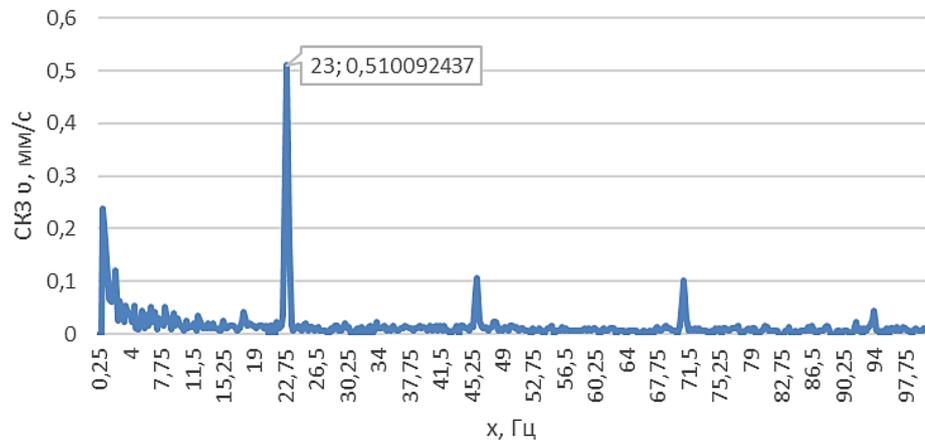


Рис. 6. График распределения частоты колебаний  $f$ , Гц, трубопровода в зависимости от среднего квадратического значения виброскорости СКЗ  $v$ , мм/с, в точке 2, частота 25 Гц

Fig. 6. Distribution of vibration frequency, pipeline depending on the mean square value of vibration velocity at point 2. Frequency: 25 Hz

#### Значения частоты колебаний фрагмента трубопровода в двух точках Vibrational frequency of pipeline at two points

Сгенерированная вибрация, Гц	Частота вибрации трубопровода по БПФ в точке 1, Гц	Частота вибрации трубопровода по БПФ в точке 2, Гц	СКЗ виброскорости по БПФ в точке 1, мм/с	СКЗ виброскорости по БПФ в точке 2, мм/с	Критическое значение виброскорости, мм/с
5	13,75	13,75	0,08	0,03	
10	9	9	0,10	0,07	
15	13,5	13,5	0,21	0,1	
20	18,5	18,5	0,26	0,26	
25	23	23	0,33	0,51	
30	28	28	0,51	1,07	18

Сравнение полученной частоты по БПФ с допустимой частотой позволяет определить состояние трубопровода и сформулировать рекомендации по проведению визуального осмотра трубопровода и внеплановых диагностических обследований. Расчетная точность замеров, полученных при помощи модуля гироскопа и акселерометра MPU-6050, составила 1,8 мм, при этом точность геодезических измерений составляет около 2 мм, замеров при помощи GPS – 200 мм.

Формулирование рекомендаций зависит от получаемых от системы параметров, например, как отмечено в [6], если измеряемые виброскорость и амплитуда смещения трубопровода находятся в пределах допустимых значений, но при этом отличаются от замеренных ранее, необходимо провести расчет напряженно-деформированного состояния участка трубопровода с последующим сравнением напряжений с предельными значениями из РД. При этом, если значения напряжений в пределах допустимых, необходимо принять превентивные меры по диагностике указанного участка, провести оценку прочности с учетом полученных при расчете кольцевых и продольных напряжений. При превышении расчетных напряжений допустимых значений предлагается провести работы по неразрушающему контролю стыков и сварных соединений, внеплановую диагностику и визуальный осмотр трубопровода.

### Выводы

Выполненные расчеты позволили сделать следующие выводы:

1. Разработан метод контроля пространственного положения трубопровода посредством системы автоматизированного мониторинга. Метод основан на анализе параметров вибрации объекта с последующей обработкой данных для выработки управленческих решений.
2. Система автоматизированного мониторинга является универсальной вследствие модульной конструкции. В систему могут быть включены другие модули для измерения дополнительных параметров.
3. Система автоматизированного мониторинга способна оповещать оператора при возникновении критических отклонений измеряемых параметров от допустимой нормы.
4. Предлагаемая система характеризуется низкой стоимостью комплектующих и простотой использования, что обеспечивает существенную экономию трудовых и финансовых ресурсов в рамках автоматизации процесса эксплуатации.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Александров А.А., Ларионов В.И., Гумеров Р.А. Автоматизированная система мониторинга магистральных нефтепроводов на сейсмоопасных участках // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2014. № 5 (98). С. 113–126.
2. Генике А.А., Побединский Г.Г. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. Москва : ФГУП «Картгеоцентр», 2004. 355 с.
3. Грязнев Д.Ю. Аэровизуальный мониторинг технического состояния магистрального нефтепровода, подверженного воздействию экзогенных геологических процессов // Безопасность жизнедеятельности. 2011. № 8. С. 47–50.
4. Даревский В.Э., Романов А.М., Ткачева М.В. Автоматизированные инженерные методы расчетов общей устойчивости склонов, зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2006. № 9. С. 16–21.
5. Дмитриев П.Н., Голубев В.И., Исаев Ю.С. и др. Некоторые проблемы обработки и интерпретации данных спутниковой радарной интерферометрии на примере мониторинга оползневых процессов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 130–142.
6. Нормы вибрации трубопроводов технологического газа компрессорных станций с центробежными нагнетателями // Консорциум «Кодекс»: Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200003197> (дата обращения: 22.11.2023).

7. Рекам Ф.В. Расчет допустимых динамических нагрузок на трубопровод // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2008. № 3. С. 62–63.
8. Ding X., Yin S., Wang Y., Wang Y., Yang Y., Ni B. Data-driven design of observers and its applications // Preprint of the 18th IFAC World Congress. 2011. P. 11441–11446. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016305481> (дата обращения: 22.11.2023).
9. Parker T., Farhadiroushan M., Handerek V.A., Roger A.J. A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin backscatter Letters // IEEE Photonics Technology. 1977. July. V. 9. I. 7. P. 979–981. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/593372> (дата обращения: 22.11.2023).
10. Priyanka E.B., Thangavel S., Gao X.Z. Review analysis on cloud computing based smart grid technology in the oil pipeline sensor network system // Petroleum Research. 2021. V. 6. № 1. P. 77–90.
11. Rosen P., Hensley S., Joughin I. et al. Synthetic Aperture Radar Interferometry // Proceedings of the IEEE. 2000. V. 88 (3). P. 333–382. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/> (дата обращения: 05.09.2023).
12. Rykov V., Kochueva O., Farkhadov M. Preventive Maintenance of a k-out-of-n System with Applications in Subsea Pipeline Monitoring // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. V. 9. № 1. P. 85.
13. Tejedor J., Macias-Guarasa J. A novel fiber optic based surveillance system for prevention of pipeline integrity threats // Sensors. 2017. V. 17. № 2. P. 355.
14. Thiberville C., Wang Y., Waltrich P. Modeling of Smart Pigging for Pipeline Leak Detection // SPE Production & Operations. 2020. V. 35. № 03. P. 610–627.
15. Thodi P., Paulin M., DeGeer D. Real-time Arctic pipeline integrity and leak monitoring // OTC Arctic Technology Conference. OnePetro. 2015. ISBN: 978-1-61399-431-3. URL: [https://www.researchgate.net/publication/314698366\\_Real-time\\_Arctic\\_Pipeline\\_Integrity\\_and\\_Leak\\_Monitoring](https://www.researchgate.net/publication/314698366_Real-time_Arctic_Pipeline_Integrity_and_Leak_Monitoring) (дата обращения: 22.11.2023).
16. Varshney S., Kumar C., Swaroop A. Leach based hierarchical routing protocol for monitoring of over-ground pipelines using linear wireless sensor networks // Procedia Computer Science. 2018. V. 125. P. 208–214.

#### REFERENCES

1. Aleksandrov A.A., Larionov V.I., Gumerov R.A. Automated system for monitoring main oil pipelines in seismic areas. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroenie*. 2014; 5 (98): 113–126. (In Russian)
2. Genicke A.A., Pobedinsky G.G. Global satellite determination systems locations and their application in geodesy. Moscow: Cartgeocenter, 2004. 355 p. (In Russian)
3. Gryaznev D.Yu. Aerovisual monitoring of the technical condition of a main oil pipeline exposed to exogenous geological processes. *Bezopasnost zhiznedielnosti*. 2011; (8): 47–50. (In Russian)
4. Darevsky V.E., Romanov A.M., Tkacheva M.V. Automated engineering methods for calculating general stability of slopes and buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2006; (9): 16–21. (In Russian)
5. Dmitriev P.N., Golubev V.I., Isaev Yu.S., et al. Processing and interpretation satellite radar interferometry data on monitoring landslide processes. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*. 2012; 9 (2): 30–142. (In Russian)
6. Vibration standards for process gas pipelines of compressor stations with centrifugal superchargers. Available: <http://docs.cntd.ru/document/1200003197> (accessed December 22, 2023). (In Russian)
7. Rekam F.V. Calculation of the permissible dynamic loads on a pipeline. *Stroitelnaia mekhanika inzhenernykh konstruksii i sooruzhenii*. 2008; (3): 62–63. (in Russian)
8. Ding X., Yin S., Wang Y., Wang Y., Yang Y., Ni B. Data-driven design of observers and its applications. Available: [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016305481](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016305481) (accessed December 22, 2023).

9. Parker T., Farhadiroushan M., Handerek V.A., Roger A.J. A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin backscatter Letters. *IEEE Photonics Technology*. 1977. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/593372> (accessed December 22, 2023).
10. Priyanka E.B., Thangavel S., Gao X.Z. Review analysis on cloud computing based smart grid technology in the oil pipeline sensor network system. *Petroleum Research*. 2021; 6 (1): 77–90.
11. Rosen P., Hensley S., Joughin I., et al. Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*. 2000; 88 (3): 333–382. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/> (accessed September 5, 2023).
12. Rykov V., Kochueva O., Farkhadov M. Preventive maintenance of a k-out-of-n system with applications in subsea pipeline monitoring. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021; 9 (1): 85.
13. Tejedor J., Macias-Guarasa J. A novel fiber optic based surveillance system for prevention of pipeline integrity threats. *Sensors*. 2017; 17 (2): 355.
14. Thiberville C., Wang Y., Waltrich P. Modeling of smart pigging for pipeline leak detection. *SPE Production and Operations*. 2020; 35 (3): 610–627.
15. Thodi P., Paulin M., DeGeer D. Real-time Arctic pipeline integrity and leak monitoring. In: OTC Arctic Technology Conference. OnePetro, 2015. ISBN: 978-1-61399-431-3. Available: [www.researchgate.net/publication/314698366\\_Real-time\\_Arctic\\_Pipeline\\_Integrity\\_and\\_Leak\\_Monitoring](http://www.researchgate.net/publication/314698366_Real-time_Arctic_Pipeline_Integrity_and_Leak_Monitoring) (accessed December 22, 2023).
16. Varshney S., Kumar C., Swaroop A. Leach based hierarchical routing protocol for monitoring of over-ground pipelines using linear wireless sensor networks. *Procedia Computer Science*. 2018; 125: 208–214.

#### Сведения об авторах

Бурков Петр Владимирович, докт. техн. наук, ст. научный сотрудник, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, burkovpv@mail.ru

Марина Алена Алексеевна, ассистент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, a\_a\_marina@inbox.ru

#### Authors Details

Petr V. Burkov, DSc, Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia; Tomsk State University of Architecture and Building, 2, So-lyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; burkovpv@mail.ru

Alena A. Marina, Research Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia; a\_a\_marina@inbox.ru

#### Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Authors contributions

The authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.10.2023  
Одобрена после рецензирования 23.10.2023  
Принята к публикации 09.11.2023

Submitted for publication 17.10.2023  
Approved after review 23.10.2023  
Accepted for publication 09.11.2023