

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-2-142-147>

УДК 620.164.3

Применение методов математического моделирования для определения влияния грунта на частоты собственных колебаний трубопроводов

Чанчина В. Е.*, Гапоненко С. О., Кондратьев А. Е., Федотова А. О., Мустафина Г. Р.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

ул. Красносельская, д. 51, 420066, г. Казань, Россия

Поступила / Received 12.01.2021

Принята к печати / Accepted for publication 03.06.2021

При осуществлении на трубопровод внешнего воздействия, способного влиять на частоту собственных колебаний, происходит изменение параметров собственных колебаний, что повышает погрешность измерений, а зачастую и просто искажает результаты вибрационного контроля. Для трубопроводов таким воздействием может оказаться влияние грунта при бесканальной прокладке. Различные виды грунта по-разному влияют на изменение частоты собственных колебаний трубопровода.

Целью статьи является анализ влияния грунтов различного типа на параметры собственных колебаний трубопровода. Задачей исследования являлось теоретическое подтверждение зависимости изменения частоты колебания трубопровода при воздействии грунтов. Произведен модальный анализ собственных колебаний 5 полиэтиленовых трубопроводов. В качестве исходных данных принято, что расчетный трубопровод уложен в траншею с наклонными стенками, заложение откоса на плоское основание на глубине равно 2,5 м. Расчеты произведены в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS. С целью построения математической модели определена степень воздействия грунта на трубопроводы путем исследования вертикального и бокового давления грунта на вышеуказанные трубопроводы, проанализированы собственные колебания трубопроводов.

Представлены результаты модального анализа для полиэтиленовых труб при схеме укладки с наклонными стенками и различным грунте (пески гравелистые, крупные и средней крупности; глины тяжелые). Выбор грунта обусловлен наибольшим распространением его на территории России.

Таким образом, полученная зависимость степени влияния различного грунта на собственные частоты трубопроводов значительно повышает достоверность вибрационной диагностики заглубленных коммуникаций, может облегчить работы по ее организации и позволит определять долгосрочные прогнозы эксплуатации трубопроводов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: надежность, трубопровод, модальный анализ, собственные колебания

Адрес для переписки:

Чанчина В. Е.

ФГБОУ ВО «КГЭУ», кафедра ПТЭ

ул. Красносельская, 51, 420066, г. Казань, Россия

e-mail: veronika.zaharova.95@mail.com

Address for correspondence:

Chanchina V. E.

Kazan State Power Engineering University, Department PTE

Krasnoselskaya str., 51, 420066, Kazan, Russia

e-mail: veronika.zaharova.95@mail.com

Для цитирования:

Чанчина В. Е., Гапоненко С. О., Кондратьев А. Е., Федотова А. О., Мустафина Г. Р. Применение методов математического моделирования для определения влияния грунта на частоты собственных колебаний трубопроводов. *Надежность и безопасность энергетики*. 2021 – Т. 14, №2. – С. 142–147.

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-2-142-147>

For citation:

Chanchina V. E., Gaponenko S. O., Kondratyev A. E., Fedotova A. O., Mustafina G. R. [Application of mathematical modeling methods to determine the effect of soil on natural vibration frequencies of pipelines]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*. 2021. vol. 14, no. 2, pp. 142–147 (in Russian).

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-2-142-147>

Application of mathematical modeling methods to determine the effect of soil on natural vibration frequencies of pipelines

Chanchina V. E.*, Gaponenko S. O., Kondratyev A. E., Fedotova A. O., Mustafina G. R.

Kazan State Power Engineering University, Department PTE
Krasnoselskaya str., 51, 420066, Kazan, Russia

When a pipeline is subjected to an external influence that can affect the frequency of its natural vibrations, the parameters of its natural vibrations change, which increases the measurement error, and often simply distorts the results of vibration control. For pipelines, such an impact may be the influence of the soil when pipelines are laid without a channel. Different types of soil affect the change in the natural vibration frequency of the pipeline in different ways.

The purpose of the article is to analyze the influence of various types of soils on the parameters of natural vibrations of the pipeline. The aim of the study was to theoretically confirm the dependence of the change in the frequency of vibration of the pipeline under the influence of soil.

A modal analysis of natural oscillations of 5 polyethylene pipelines was performed. As initial data, it is assumed that the design pipeline is laid in a trench with inclined walls, with the slope laid on a flat base at a depth of 2.5 m. The calculations were performed in the ANSYS finite element analysis software package. In order to build a mathematical model, the degree of soil impact on pipelines is determined by studying the vertical and lateral pressure of the soil on the above pipelines, and the natural vibrations of pipelines are analyzed.

The results of the modal analysis for polyethylene pipes with a laying scheme with inclined walls and different soils (gravel sands, coarse and medium-sized; heavy clays) are presented. The soils were chosen that are the most common on the territory of Russia.

Thus, the obtained dependence of the degree of influence of different soil on the natural frequencies of pipelines significantly increases the reliability of vibration diagnostics of buried communications, can facilitate the work on its organization and allow determining long-term forecasts of pipeline operation.

KEYWORDS: reliability, pipeline, modal analysis, natural vibrations

На сегодняшний день системы трубопроводов являются основным источником и способом обеспечения потребителей главными продуктами: водой, газом, теплом и др. Также они используются для отвода бытовых и производственных отходов [1 – 2].

В целях надежного и устойчивого развития трубопроводных систем в России уложено 2 миллиона километров подземных трубопроводов, протяженность трубопроводных сетей внутренних коммунальных систем зданий составляет 3 – 5 млн км. Около половины протяженности систем трубопроводов находится в эксплуатации жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), обеспечивая население России всеми необходимыми коммунальными продуктами [3].

В зависимости от применения и назначения трубы классифицируются на металлические и пластмассовые. В настоящее время все большее применение находят пластмассовые трубы. Данный материал применяется в сфере ЖКХ и внедрен в обустройство систем водоснабжения и канализации. Устаревшие конструкции всё чаще модернизируют, заменяя металл на легкий, практичный и долговечный пластик [4].

Когда объект контроля оказывается под внешним воздействием, способным влиять на частоту собственных колебаний, происходит изменение параметров собственных колебаний, что повышает погрешность измерений, а зачастую и просто искажает результаты вибрационного контроля.

Известно много способов технической диагности-

ки трубопроводов, одним из которых является метод колебаний. В объекте контроля возбуждаются вибрационные колебания и производится анализ их параметров в некотором удалении от точки возбуждения. Наиболее информативными являются собственные колебания, частота которых зависит от параметров объекта контроля. Задача усложняется, когда объект контроля оказывается под внешним воздействием, способным влиять на частоту собственных колебаний. В частности, для трубопроводов таким воздействием может оказаться влияние грунта при бесканальной прокладке. В этом случае происходит изменение параметров собственных колебаний, что повышает погрешность измерений, а зачастую и просто искажает результаты вибрационного контроля [5 – 7].

Различные виды грунта по-разному влияют на изменение частоты собственных колебаний трубопровода. Целью работы являлся анализ влияния грунтов различного типа на параметры собственных колебаний трубопровода.

Ранее было экспериментально определено, что воздействие различных грунтов изменяют частоту собственных колебаний трубопровода в сторону уменьшения [8].

Задачей данного исследования являлось теоретическое подтверждение зависимости изменения частоты колебания трубопровода при воздействии грунтов.

Для расчета было выбрано 5 полиэтиленовых труб со следующими характеристиками: 125x31; 180x4,4;

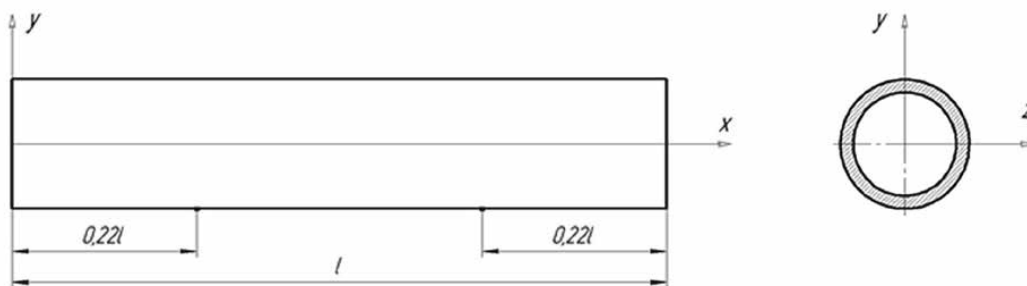


Рисунок 1. Расчетная схема трубопровода, закрепленного с двух сторон на расстоянии 0,22L

Figure 1. Design diagram of a pipeline fixed on both sides at a distance of 0.22L

250x6,2; 355x8,7 и 630x15,4. Параметры соответствуют требованиям ГОСТа 18599-2001 «Трубы напорные из полиэтилена». По заданным условиям моделирования трубопровод закреплен с двух сторон на расстоянии 0,22L, где L — длина трубопровода.

На рисунке 1 представлена расчетная схема трубопровода диаметром 180 мм, толщиной стенки трубы 4,4 мм. Расчетный трубопровод уложен в траншею с наклонными стенками, заложение откоса на плоское основание на глубине равен 2,5 м в песчаном грунте (Г-I). Удельный вес грунта составляет 16,7 кН/м³ и модуль деформации грунта — 1,1 МПа.

С целью построения математической модели определена степень воздействия грунта на трубопровод, заложённый на глубине H в массиве грунта, путем исследования вертикального q_v и бокового давления грунта q_h на вышеуказанный трубопровод, что условно показано на рисунке 2 [9–11].

Расчеты произведены в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS, который является универсальным и довольно популярным у специалистов в сфере автоматизированных инженерных расчетов. Количество ячеек и узлов начальной расчетной сетки составило 1986197 [12–14].

В качестве исходных данных были приняты параметры полиэтиленовых трубопроводов и двух типов грунтов. Выбор грунта обусловлен наибольшим распространением его на территории России и представлен в таблице 1.

Условием устойчивости итерационных процессов являлись неизменные исходные данные: длина и условия прокладки трубопровода, параметры грунта в соответ-

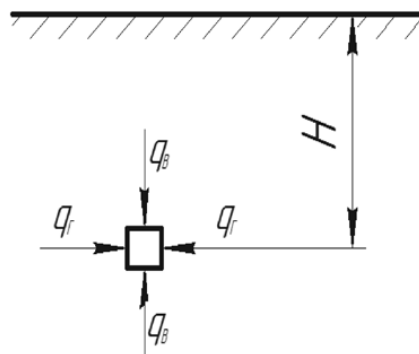


Рисунок 2. Подземное сооружение в грунте

Figure 2. Underground structure in the ground

ствии с таблицей 1. Параметры температуры и плотности грунта были приняты условно постоянными.

Ниже представлен алгоритм расчета, предлагаемый программным комплексом ANSYS.

Расчет произведен согласно СП 31.13330.2012 «ВОДОСНАБЖЕНИЕ. НАРУЖНЫЕ СЕТИ И СООРУЖЕНИЯ».

Коэффициент концентрации давления грунта засыпки K_H при укладке труб на ненарушенный грунт в насыпи определяется согласно формуле (1):

$$K_H = \frac{3(P_L + P_{ГР})}{2(P_L + 2P_{ГР})}, \quad (1)$$

где P_L — жесткость трубопровода по М. Леви, МПа; $P_{ГР}$ — жесткость грунта засыпки, МПа.

Вертикальное и боковое давление грунта на полиэтиленовый трубопровод, кН/м (2–3):

$$Q_{ГР}^B = n\gamma H D_H K_H, \quad (2)$$

где n — коэффициент перегрузок для внешних, постоянных и временных нагрузок; γ — удельный вес грунта, кН/м³; D_H — наружный диаметр трубы, м; K_H — коэффициент концентрации давления грунта засыпки при укладке труб на ненарушенный грунт в насыпи.

$$Q_{ГР}^Г = n\gamma \left(H + \frac{D_H}{2}\right) D_H \lambda_H, \quad (3)$$

где H — глубина погружения трубопровода, м; λ_H — коэффициент при нормальной степени уплотнения засыпки.

На основании полученных данных определяется дав-

Таблица 1. Категории рассматриваемого грунта

Table 1. Categories of considered soil

Категория грунта Soil category	Наименование грунта Name of soil	q , кН/м ³	
		355x8,7	630x15,4
Г-I	Пески гравелистые, крупные и средней крупности Gravelly, coarse and medium-sized sands	48,9908462	48,7741223
Г-VI	Глины тяжелые Heavy clays	58,9495442	58,8673744

Таблица 2. Полученные результаты собственных частот трубопровода

Table 2. Obtained results of natural frequencies of the pipeline

Мода Mode	Трубопровод метровый / Meter pipeline								
	125x3,1			180x4,4			250x6,2		
	-	Г-I	Г-VI	-	Г-I	Г-VI	-	Г-I	Г-VI
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Частота, Гц / Frequency, Hz								
1	49,488	47,486	47,021	50,137	48,768	48,461	26,533	25,463	25,208
2	119,18	112,26	110,64	119	114,88	113,97	69,424	63,89	62,588
3	142,65	133,81	131,78	134,36	129,08	127,92	78,846	72,211	70,731
4	154,41	152,1	151,51	151,95	150,05	149,61	122,81	116,99	115,62
...									
61	1433,4	1424,3	1422,6	1448,5	1445,6	1445	1164,6	1160,6	1159,7
62	1458,2	1447,9	1445,9	1457,2	1456,2	1456	1170	1166	1165,2
63	1506,4	1496	1493,9	1482,2	1480,1	1479,7	1180	1174,7	1173,8
64	1536,5	1525,9	1523,7	1492	1489,1	1488,6	1200,6	1199,8	1199,6
...									
97	2144,6	2134,6	2132,5	2011,3	2009,6	2009,2	1595,8	1593,3	1586,6
98	2163,5	2153,3	2150,6	2016,4	2013,8	2013,2	1612,4	1608,4	1592,8
99	2172,6	2165,7	2164,7	2038,9	2032,5	2031,3	1636,3	1634,3	1633,8
100	2186,8	2183,2	2182	2051,5	2049,1	2048,5	1641,6	1639,5	1639

Таблица 3. Полученные результаты собственных частот трубопровода

Table 3. Obtained results of natural frequencies of the pipeline

Мода Mode	Трубопровод метровый / Meter pipeline					
	355x8,7			630x15,4		
	-	Г-I	Г-VI	-	Г-I	Г-VI
1	2	3	4	5	6	7
	Частота, Гц / Frequency, Hz					
1	12,608	11,096	10,598	4,6314	0	0
2	34,119	27,132	25,104	12,447	0	0
3	37,954	28,302	25,867	15,101	6,8391	4,4181
4	67,465	56,796	54,254	26,596	16,143	12,462
...						
61	863,84	862,6	862,32	495,67	493,77	493,4
62	868,24	864,85	864,24	499,15	496,12	495,49
63	886,44	883,89	883,31	511,22	504,82	503,34
64	895,85	892,64	891,9	514,7	510,06	508,7
...						
97	1138	1136,8	1136,6	651,39	647,51	646,72
98	1142,8	1139,2	1138,5	659,82	655,48	654,11
99	1169,7	1165,1	1164,1	670,93	663,27	661,74
100	1192,8	1189,9	1188,9	678,47	676,49	676,09

ление, кН/м², оказываемое грунтом на трубопровод (4):

$$q = \frac{Q_{эKB}}{D_H}, \quad (4)$$

где $Q_{эKB}$ — расчетная линейная приведенная эквивалентная нагрузка, кН/м.

Результаты расчетов частот собственных колебаний трубопроводов заданных параметров без учета влияния грунта и с его учетом, представлены в таблицах 2 и 3. В них указаны собственные частоты ν [Гц] (моды с 1 по 100) различных типоразмеров трубопроводов без воздействия грунта (графа «-») и под воздействием грунтов типа Г-I и Г-VI.

Анализ полученных результатов показал, что частоты собственных колебаний свободных трубопроводов (без воздействия грунта) и заглубленных (с воздействием грунта) изменяются в сторону уменьшения значения, при этом более плотный грунт оказывает большее влияние [15].

Для 63 моды, как и для остальных, при смене грунта на более плотный собственная частота всех трубопроводов разных диаметров имеет устойчивую тенденцию к ее уменьшению, что видно из таблиц 2 и 3.

Для наглядности представлены графики уменьшения частоты собственных колебаний различных трубопроводов области частот от 1150 до 1600 Гц (моды 61 – 64), показанные на рисунке 3, а – с.

Таким образом, подтвердились экспериментальные данные, полученные в [16].

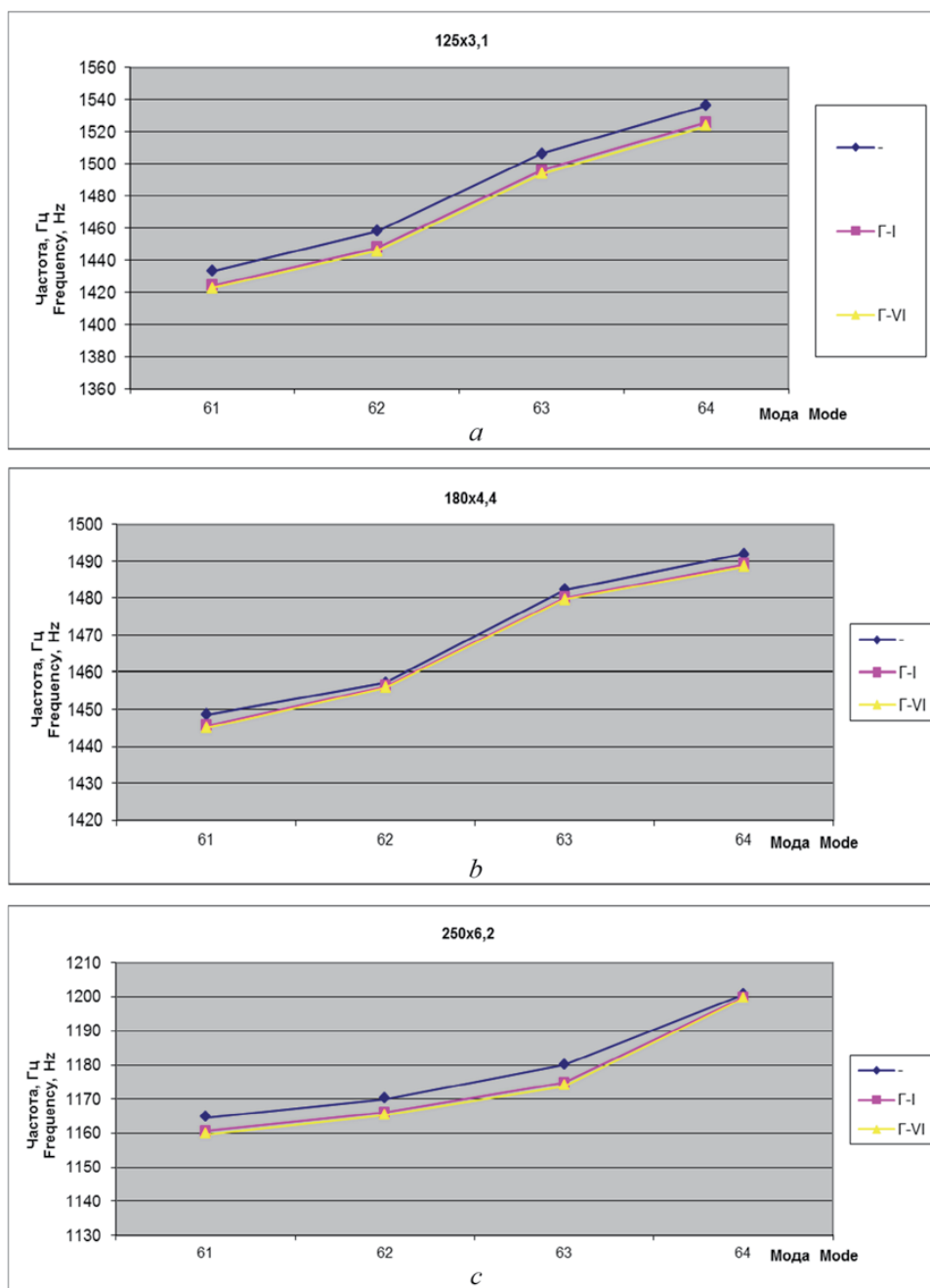


Рисунок 3 (а, б, с). Графики изменения собственных частот колебаний трубопроводов различного размера
Figure 3 (a, b, c). Graphs of changes in natural frequencies of vibrations of pipelines of various sizes

Выводы

Произведен модальный анализ собственных колебаний полиэтиленовых трубопроводов как с учетом, так и без учета вертикального и бокового давления различных грунтов. Расчеты проводились в программном комплексе ANSYS.

В результате аналитических исследований влияния грунта различного вида на изменение собственной частоты трубопроводов пяти типов, было выяснено, что грунт оказывает определенное влияние на изменение частот собственных колебаний этих трубопроводов, при этом наименьшее значение частот достигается при укладке коммуникации в грунт типа Г-VI (глины тяжелые),

что может быть объяснено его вязкостью и пластичностью.

Таким образом, полученная зависимость степени влияния различного грунта на собственные частоты трубопроводов значительно повышает достоверность вибрационной диагностики заглубленных коммуникаций, может облегчить работы по ее организации и позволить разрабатывать долгосрочные прогнозы эксплуатации трубопроводов.

Список использованных источников

1. Берзин П. О. Контроль и диагностика теплоэнергетического оборудования. В сборнике материалов VIII всероссийской, научно-

практической конференции молодых ученых с международным участием "Россия молодая", Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева 2016; 325.

2. Герасимова А. Г. Принципы выбора материалов теплоэнергетического оборудования и трубопроводов ТЭС. Наука – образованию, производству, экономике: материалы 14-й Международной научно-технической конференции 2019; 1: 91.

3. Дудоров В. Е., Тимофеев И. С. Анализ аварийности на объектах трубопроводного транспорта (нефть, нефтепродукты). Фундаментальные исследования основных направлений технических и физико-математических наук. Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции 2018; 71–74.

4. Никулин Н. Ю., Куцев Л. А., Темников Д. О. Современные технологические аспекты развития систем теплоснабжения. Современное строительство и архитектура 2016; 4 (04).

5. Сазонова С. А., Сушко Е. А. Разработка методов и алгоритмов технической диагностики и обеспечение безопасности систем пожаротушения, тепло-, водо-, газоснабжения и промышленных технологических трубопроводов. Современные проблемы гражданской защиты 2017; 2 (23): 40–45.

6. Дмитриев А. В. Исследование частоты свободных колебаний для трубопроводов с различными физикомеханическими свойствами материала. Интернет-журнал «Транспортные сооружения» 2020; 1.

7. Коваль А. И., Медведев А. Е. Меры технической диагностики состояния трубопроводов. Материалы III Всероссийской студенческой научно-технической конференции 2017; 97–98.

8. Гапоненко С. О., Ибадов А. А., Кондратьев А. Е. Определение информативных частотных диапазонов для контроля местоположения заглубленных трубопроводов. Научному прогрессу – творчество молодых. Поволжский государственный технологический университет 2018; 2: 68–71.

9. Шлычков Д. И. Проблемы технического состояния действующих трубопроводных систем. Инновации и инвестиции 2020; 4: 207–210.

10. Продоус О. А., Васильева М. А. Упрощенный вид нормативной зависимости для гидравлического расчета трубопроводов из полимерных материалов. Водоснабжение и санитарная техника 2017; 9: 53–56.

11. Викулин П. Д. Гидравлика и аэродинамика систем водоснабжения и водоотведения. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет 2018; 386.

12. Федорова Н. Н., Вальгер С. А., Данилов М. Н., Захарова Ю. В. Основы работы в ANSYS 17 2017; 210.

13. Секачева А. А., Пастухова Л. Г., Носков А. С. Моделирование динамических характеристик вертикального элемента трубопровода. Сборник докладов VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием 2019; 334–341.

14. Байкова Л. Р., Новичков А. В. Использование программного комплекса ANSYS при исследовании гидродинамических параметров и вибрации трубопроводов. Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья 2020; 3.

15. Гапоненко С. О., Кондратьев А. Е. Перспективные методы и методики поиска скрытых каналов, полостей и трубопроводов виброакустическим методом. Вестник Северо-Кавказского федерального университета 2015; 2(47): 9–13.

16. Nazarychev S. A., Gaponenko S. O., Kondratyev A. E. Determination of informative frequency ranges for buried pipeline location control. Helix 2018; 8: 2481.

References

1. Berzin P. O. Control and diagnostics of heat and power equipment. In the collection of materials in the VIII All-Russian, scientific and practical conference of young scientists with international participation "Young Russia", Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev 2016; 325.

2. Gerasimova A. G. Principles of choosing materials for heat and power equipment and pipelines of TPP. Science – education, production, Economy: proceedings of the 14th International Scientific and Technical Conference 2019; 1: 91.

3. Dudorov V. E., Timofeev I. S. Analysis of accidents at pipeline transport facilities (oil, oil products). Fundamental research of the main directions of technical and physical-mathematical sciences. Collection of articles on the results of the International Scientific and Practical Conference 2018; 71–74.

4. Nikulin N. Yu., Kushchev L. A., Temnikov D. O. Modern technological aspects of the development of heat supply systems. Modern construction and Architecture 2016; 4 (04).

5. Sazonova S. A., Sushko E. A. Development of methods and algorithms for technical diagnostics and ensuring the safety of fire extinguishing systems, heat, water, and gas supply and industrial technological pipelines. Modern problems of civil protection 2017; 2 (23): 40–45.

6. Dmitriev A. V. Investigation of the frequency of free vibrations for pipelines with different physical and mechanical properties of the material. Online magazine "Transport Facilities" 2020; 1.

7. Koval A. I., Medvedev A. E. Measures of technical diagnostics of the state of pipelines. Materials of the III All-Russian Student Scientific and Technical Conference 2017; 97–98.

8. Gaponenko S. O., Ibadov A. A., Kondratyev A. E. Determination of informative frequency ranges for monitoring the location of buried pipelines. Scientific progress – the creativity of the young. Povolzhsky State Technological University 2018; 2: 68–71.

9. Shlychikov D. I. Problems of the technical condition of existing pipeline systems. Innovation and Investment 2020; 4: 207–210.

10. Prodous O. A., Vasilyeva M. A. Simplified type of normative dependence for hydraulic calculation of pipelines made of polymer materials. Water supply and sanitary engineering 2017; 9: 53–56.

11. Vikulin P. D. Hydraulics and aerodynamics of water supply and sanitation systems. National Research Moscow State University of Civil Engineering 2018; 386.

12. Fedorova N. N., Valger S. A., M Danilov, N., Zakharova Yu. V. Osnovy raboty v programmnom complex ANSYS 17 2017; 210.

13. Sekacheva A. A., Pastukhova L. G., Noskov A. S. Modeling of dynamic characteristics of a vertical pipeline element. Collection of reports of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation 2019; 334–341.

14. Baykova L. R., A Novikov N. V. The use of the software package of the finite element method in the study of hydrodynamic parameters and vibration of pipelines. Transportation and storage of petroleum products and hydrocarbons 2020; 3.

15. Gaponenko S. O., Kondratyev A. E. Perspective methods and methods of searching for hidden channels, cavities and pipelines by vibroacoustic method. Bulletin of the North Caucasus Federal University 2015; 2(47): 9–13.

16. Nazarychev S. A., Gaponenko S. O., Kondratyev A. E. Determination of informative frequency ranges for monitoring the location of a buried pipeline. Spiral 2018; 8: 2481.