

**Received:** 07.11.2025

**Revised:** 20.01.2026

**Accepted:** 23.01.2026

**DOI:** 10.17804/2410-9908.2026.1.079-098

## EVALUATING THE APPLICABILITY OF THE VIBROACOUSTIC METHOD TO THE DETERMINATION OF THE RESIDUAL LIFE OF PIPES MADE OF POLYMER-REINFORCED MATERIALS

A. V. Fedotova<sup>1, a</sup>, A. F. Salnikov<sup>2, b</sup>, M. V. Bogatov<sup>1, 3, 4, c, \*</sup>, and V. O. Gorshkov<sup>5, d</sup>

<sup>1</sup>NITs Nemetall LLC,

1 Naberezhnaya reki Samara, room 33, Samara, 443036, Russia

<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University,

29 Komsomolskiy Ave., Perm, 614990, Russia

<sup>3</sup>Samara State Technical University,








244 Molodogvardeyskaya St., Samara, 443100, Russia

<sup>4</sup>NPTs Samara LLC,

3 Garazhnyi Dr., Samara, 443022, Russia

<sup>5</sup>Sibur PoliLab LLC,

2 Bolshoy Blvd., Skolkovo Innovation Center, Mozhaisk MD, Moscow, 143026, Russia

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-6345-8137>  [fedotova@nicnemetall.ru](mailto:fedotova@nicnemetall.ru),  
<sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8522-2654>  [afsalnikov\\_1@mail.ru](mailto:afsalnikov_1@mail.ru);  
<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-6232-5666>  [bogatov@npcsamara.ru](mailto:bogatov@npcsamara.ru);  
<sup>d</sup>  [gorshkovvo@sibur.ru](mailto:gorshkovvo@sibur.ru)

\*Corresponding author. Email: bogatov@npcsamara.ru

Address for correspondence: ul. Naberezhnaya reki Samara, 1, room 33, Samara, 443036, Russia

Tel: +7 (927) 768-4726

Advanced methods for protection against various types of complicating factors in the oil and gas industry have always been and will remain a pressing issue. The use of pipes made of alternative materials is a definite trend in this field. Many oil companies are already using polymer-reinforced pipes of various designs to transport hydrocarbons. These pipes undoubtedly offer a number of advantages over steel field pipelines. Evaluation of the service life of steel pipes is a solved and well-known problem, whereas evaluation of the service life of pipes made of alternative materials remains a challenge for scientists. This paper discusses a vibroacoustic method for attempting to identify various types of artificial defects (notches, kinks, impacts) on the surface of flexible polymer-reinforced pipes and decoding their wave signal.

**Keywords:** polymer-reinforced pipes, vibroacoustic method, residual life, testing

### Acknowledgments

*This work was completed with the direct participation of Alexey F. Salnikov, professor at the Vibroacoustic Control and Diagnostics Research Laboratory at Perm National Research Polytechnic University. We express our sincere gratitude to the laboratory staff and to Prof. Salnikov for their many years of experience and for evaluating the results of these tests.*

### References

1. Galeev, A.S., Birbulatova, G.I., Boltneva, Yu.A., and Shulin, V.S. Analysis of the causes of failures of deep-well pumping equipment during operation of wells with rod pumps in difficult conditions. *Izvestiya TulGTU. Tekhnicheskie Nauki*, 2024, 8, 36–38. (In Russian). DOI: 10.24412/2071-6168-2024-8-36-37.

2. Gureeva, E.G., Gureev, K.A., and Akhunov, Yu.A. Advanced analysis of extensive and intensive factors determining the level of field oil production in the fields. In: *Fundamentalnaya i prikladnaya nauka: sostoyanie i tendentsii razvitiya* [Basic and Applied Science: Current Status and Development Trends: Monograph]. MTsNP Novaya Nauka Publ., Petrozavodsk, 2023, pp. 148–159. (In Russian). DOI: 10.46916/05062023-2-978-5-00215-000-7.
3. Strelkova, K.Yu., Gilaev, G.G., Gilaev, G.G., Reshetnikova, Ya.N., and Lipatova, A.R. Causes of formation and technologies for combating asphalt-tar-paraffin deposits. In: *Molodezhnaya Nauka* [Youth Science, Krasnodar, 2021: Proceedings]. KubGTU Publ., Krasnodar, 2022, pp. 66–74. (In Russian).
4. Kakaeva, M.Yu. Technology for predicting salt deposits in oil production. *Nauchnyi Setevoy Zhurnal Stolypinskiy Vestnik*, 2022, 9. (In Russian).
5. Boyzhigitov, A.U., and Zailalova, V.R. Corrosion processes in oil and gas production. In: *Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh, aspirantov i studentov s mezhdunarodnym uchastiem* [The 48<sup>th</sup> All-Russian Scientific and Technical Conference, with International Participation, for Young Scientists, Postgraduates and Undergraduates, Oktyabrskiy, April 23, 2021: Proceedings]. UGNTU Publ., Ufa, 2021, 821–831. (In Russian).
6. Rogachev, M.K. and Aleksandrov, A.N. Justification of a comprehensive technology for preventing the formation of asphalt-resin-paraffin deposits during the production of highly paraffinic oil by electric submersible pumps from multiformation deposits. *Journal of Mining Institute*, 2021, 250, 596–605. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.13.
7. Kravtsiv, V.V. Antoniadi, D.G., Gilaev, G.G., Grigoriev, M.V., and Reshetnikova, Ya.N. Mechanical impurities and their influence on the operation of ESP in oil production. In: *Molodezhnaya Nauka* [Youth Science: Collection of the Best Research Papers by Young Scientists]. KubGTU Publ., Krasnodar, pp. 28–36. (In Russian).
8. Roshchin, P.V., Zinovev, A.M., Riazanov, A.A., Soboleva, E.I., Nikitin, A.V., and Murzakhanov, A.R. Improving the efficiency of heavy oil production using solvents: laboratory tests and implementation in oil production. *Vestnik Evraziyskoy Nauki*, 2021, 13 (2). (In Russian). Available at: <https://esj.today/PDF/24SAVN221.pdf>
9. Mitroshin, A.V. Determination of the minimum measures in the well to prevent the formation of asphalt-resin-paraffin deposits. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2021, 21 (2), 94–100. DOI: 10.15593/2712-8008/2021.2.7.
10. Misyurkeeva, N.V., Buddo, I.V., Shelokhov, I.A., Smirnov, A.S., and Nezhdanov, A.A. Arctic gas hydrates: possibilities and prospects of studying by electromagnetic methods. *Nauki o Zemle i Nedropolzovanie*, 2024, 47 (4), 368–380. (In Russian). DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-4-368-380.
11. Rustamov, M.M.U. Influence of sulfate-reducing bacteria (SRB) during oil production. *Universum: Tekhnicheskie Nauki: Elektronnyi Nauchnyi Zhurnal*, 2024, 6 (123). (In Russian). DOI: 10.32743/UniTech.2024.123.6.17721. Available at: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17721>
12. Kantyukov, R.R., Zapevalov, D.N., and Vagapov, R.K. Analysis of the application and impact of carbon dioxide media on the corrosion state of oil and gas facilities. *Journal of Mining Institute*, 2021, 250, 578–586. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.11.
13. Shkodin, A.A. and Tlekhusezh, M.A. Corrosion and methods of struggle against it in oil industrial branches. *Nauchnoe Obozrenie. Pedagogicheskie Nauki*, 2019, 4–4, 97–101. (In Russian).
14. Kadyrov, Ya.A. Corrosion of equipment of oil production, gathering, and processing systems. *Nauka i Mirovozzrenie*, 2024, 27, 462–465. (In Russian).
15. Chudakova, M.V., Ovchinnikov, K.A., Ulyanov, D.N., Kunakova, A.M., Saifutdinova, L.R., Pimenov, A.A., and Maximov, A.L. Carbon dioxide corrosion inhibitors: current state of research and development. *Journal of Mining Institute*, 2025, 271, 3–21.

16. Novoselova, E.A. and Ivakhnyuk, S.G. Selection of corrosion resistant steels and iron-based alloys to reduce damage from corrosion of oil pipelines. *Tekhnosfernaya Bezopasnost*, 2021, 2 (31), 11–20. (In Russian).
17. Bogatov, M.V., Yudin, P.E., and Amosov, A.P. The use of internal multifunctional coatings for pump and compressor pipes to protect against the formation of asphalt, resin and paraffin deposits. *Neftegazovoe Delo*, 2023, 21 (3), 149–160. (In Russian). DOI: 10.17122/ngdelo-2023-3-149-160.
18. Bikmasov, R.G. Problems of application of polymer-reinforced pipes at facilities of field oil and gas pipelines. *Voprosy Razvitiya Sovremennoy Nauki i Tekhniki*, 2021, 1, 5–8. (In Russian).
19. Valitov, B.R., Yunusova, A.F., and Ismagilov, I.R. Prospects for the use of polymer reinforced pipes in the oil and gas industry. *Ekonomika Stroitelstva*, 2022, 6, 116–118. (In Russian).
20. Gabbasov, A.I., Romanchuk, A.S., Vinogradov, P.V., Burkutbaev, A.B., Gundorova, I.G., and Valiakhmetov, R.I. Improvement of approaches to strength calculations of flexible polymer-reinforced pipes with non-metallic reinforcement. *Ekspozitsiya Neft Gaz*, 2024, 8, 122–126. (In Russian). DOI: 10.24412/2076-6785-2024-8-122-126.
21. Shcherban, P.S. Development of quality criteria systems for polymer reinforced pipes and their connections. questions of mathematical processing of these indicators. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk*, 2024, 26 (2), 80–95. (In Russian). DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-2-80-95.

Подана в журнал: 07.11.2025

УДК 691.175

DOI: 10.17804/2410-9908.2026.1.079-098

## ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРУБ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ АРМИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. В. Федотова<sup>1, а</sup>, А. Ф. Сальников<sup>2, б</sup>, М. В. Богатов<sup>1, 3, 4, в, \*</sup>, В. О. Горшков<sup>5, г</sup>

<sup>1</sup>ООО «НИЦ «Неметалл»,

ул. Набережная реки Самары, д 1, ком 33., г. Самара, 443036, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,

Комсомольский пр-т, д. 29, г. Пермь, 614990, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»,








ул. Молодогвардейская, д. 244, г. Самара, 443100, Россия

<sup>4</sup>ООО «НПЦ «САМАРА»,

Гаражный проезд, д. 3Б, г. Самара, 443022, Россия

<sup>5</sup>ООО «СИБУР ПолиЛаб»,

Большой бульвар, 2, Инновационный центр «Сколково», Можайский м. о., Москва, 143026, Россия

<sup>а</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-6345-8137>  [fedotova@nicnemetall.ru](mailto:fedotova@nicnemetall.ru);  
<sup>б</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8522-2654>  [afsalnikov\\_1@mail.ru](mailto:afsalnikov_1@mail.ru);  
<sup>в</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-6232-5666>  [bogatov@npcsamara.ru](mailto:bogatov@npcsamara.ru);  
<sup>г</sup>  [gorshkovvo@sibur.ru](mailto:gorshkovvo@sibur.ru)

\*Ответственный автор. Электронная почта: bogatov@npcsamara.ru

Адрес для переписки: ул. Набережная реки Самары, д 1, ком. 33, г. Самара, 443036, Россия

Тел.: +7 (927) 768-47-26

Перспективные методы защиты от различных видов осложняющих факторов в нефтегазовой отрасли всегда были, есть и будут актуальным вопросом. Применение труб из альтернативных материалов является определенным трендом в данной сфере деятельности. Большое количество нефтяных компаний уже сейчас используют полимерные армированные трубы различных исполнений для транспортировки углеводородного сырья. Безусловно, есть ряд преимуществ последних по сравнению со стальными промышленными трубопроводами. Если оценка ресурса стальных труб является решенной и хорошо известной задачей, то оценка ресурса труб из альтернативных материалов пока является вопросом, ответ на который у научного сообщества отсутствует. В данной статье рассматривается виброакустический метод для попытки идентификации различных видов искусственно нанесенных дефектов (надрез, залом, удар) на поверхности гибких полимерных армированных труб и расширения их волнового сигнала.

**Ключевые слова:** армированные полимерные трубы, виброакустический метод, остаточный ресурс, апробация

### 1. Введение

Этап поздней разработки месторождений в нефтегазовой отрасли характеризуется различными видами осложняющих факторов [1–3]. Синергетический эффект последних приводит к большим экологическим катастрофам, страдает флора и фауна. Также нефтегазовые компании терпят большие убытки из-за иррационального использования методов защиты от воздействия различных осложняющих факторов. Стоит отметить, что наиболее распростра-

ненными факторами при добыче нефти и газа являются коррозионные процессы, образование асфальтосмолопарафиновых и солевых отложений, эрозионный износ, образование высоковязких эмульсий, газогидратных отложений, образование механических пробок в колонне насосно-компрессорных труб (НКТ) и т. д. [4–10]. Данные физико-химические процессы также осложняются повышенной температурой (до 250 °С) в пласте и высоким давлением забоя (порядка 600 атмосфер). Несмотря на развитие научно-технического потенциала нефтегазовой отрасли и смежных институтов в плане защиты от различных видов осложняющих факторов, до сих пор серьезной проблемой являются различные виды коррозионных процессов, которые могут протекать по вариативным механизмам в зависимости от наличия активных газов в составе нефти (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) [11–14]. Здесь существуют различные методы защиты от воздействия коррозионно-активной среды на стенки труб: ингибиторы коррозии, защитные покрытия, стали с повышенной коррозионной стойкостью и др. [15–17]. В зависимости от конкретных условий эксплуатации применяются один или несколько методов в совокупности для минимизации или исключения коррозионных процессов.

Одним из перспективных методов защиты не только от коррозионных процессов, но и от других видов осложняющих факторов является применение полимерных армированных труб (ПАТ). Данные виды изделий уже сейчас эксплуатируются в большинстве нефтегазовых компаний, таких как ПАО «НК «Роснефть», ПАО «Лукойл», ПАО «Газпром нефть» и др. [18–20]. За счет своих безусловных преимуществ данные виды труб внедряются в технологический процесс добычи и транспортировки нефтяного флюида и заменяют углеродистые стали и сплавы. В связи с вышеизложенным существует актуальный вопрос об оценке ресурса ПАТ в процессе эксплуатации. Если в случае со стальными изделиями методики оценки существуют с прошлого века, то в случае с трубами из альтернативных материалов они на данный момент времени отсутствуют.

В качестве метода оценки ресурса ПАТ был выбран виброакустический метод, который себя довольно хорошо зарекомендовал на объектах нефтегазодобывающей промышленности в качестве оценки свариваемости стыков полиэтиленовых труб [21, 22].

Данный метод основан на исследовании изменения виброакустического волнового поля трубного образца (изделия) в зависимости от различных видов наружных дефектов. Волновое поле формируется внешней импульсной нагрузкой, что приводит к возникновению механических и акустических колебаний конструктивных элементов в изделии, формируя его виброакустическое поле. Анализ данного поля объекта осуществляется программным продуктом:

- во временной области реакция происходит в виде механических (или акустических) колебаний с изменением их амплитудно-частотных характеристик;

- в частотной области анализ временного сигнала дает спектр, содержащий серию пиков, соответствующих спектрам реакций систем на механическое воздействие;

Данный алгоритм предполагает исследование изменений в виброакустическом поле объекта в зависимости от развития дефектов, их вида и расположения в элементной базе изделия.

Целью данной работы является апробация виброакустического метода исследования ПАТ для оценки остаточного ресурса представленных труб в исходном состоянии и после искусственного нанесения дефектов (повреждение наружной оболочки до армирующего слоя (надрез), загиб труб, воздействие прямого удара), возникающих в процессе эксплуатации данных изделий.

## 2. Материал и методика

В качестве объектов исследования были предоставлены образцы гибкой полимерной армированной трубы КТС-140/180-6,3 по ТУ 22.21.21-127-32990936-2022 с фитингами под

приварку (в количестве 30 шт.) с целью выполнения комплекса испытаний для диагностики виброакустическим методом. Внешний вид труб представлен на рис. 1. Также для идентификации образцов им была присвоена внутренняя маркировка СБ-Д № 1 – СБ-Д № 30.



Рис. 1. Внешний вид представленных образцов для проведения исследований

Для проведения испытаний необходимо установить образец исследуемой трубы на стойки (опоры), чтобы был свободный доступ к образцу для установки датчиков. Для устранения влияния стоек на измерения виброакустического поля в образце в точке контакта «образец – стойка» должна находиться прокладка из мягкого материала (резины или войлока) толщиной не менее 10 мм.

Виброакустические датчики устанавливаются вблизи границы его длины с обеих сторон: с одной из сторон – датчики под номерами 1–3, с противоположной стороны – 4–6 (рис. 2).

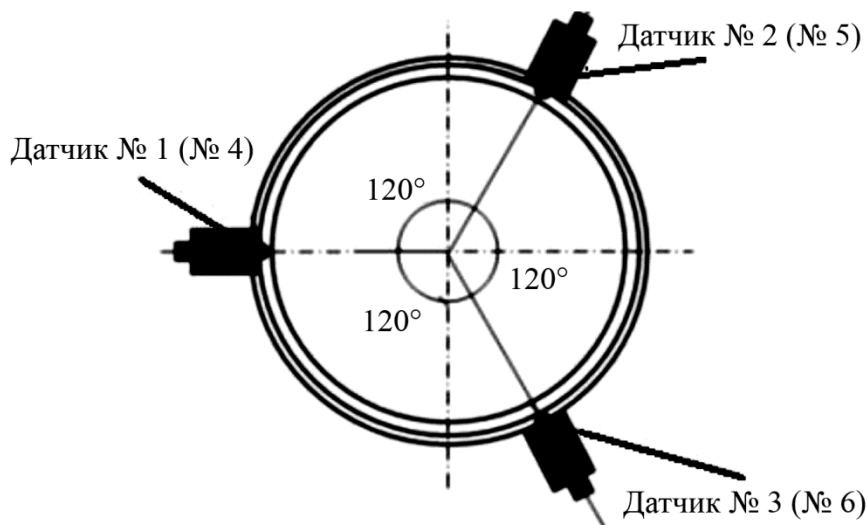


Рис. 2. Установка датчиков на образце по диаметру

После установки датчиков и проверки работы прибора «Камертон» необходимо воспроизвести с помощью молотка весом не более  $100 \pm 10$  г ударную нагрузку у каждого датчика на расстоянии около 10 мм; произвести регистрацию волновых полей в изделии и сделать запись в памяти прибора; повторить воздействие нагрузки не менее 4 раз и переустановить датчики со сдвигом на  $60^\circ$ ; повторить замеры еще не менее 5 раз. Таким образом формируется определенная база результатов измерения: 10 измерений на каждом датчике, всего 60 сигналов записи результатов исследования для одного образца. Внешний вид образца ПАТ с датчиками представлен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид образца с датчиками для детектирования волнового сигнала

После контроля виброакустического сигнала труб в исходном виде на наружную поверхность были нанесены различного рода искусственные дефекты. Данные дефекты классифицируются следующим образом:

- продольный надрез защитного слоя различной длины (100, 200, 300 мм) на всю толщину слоя, под углом  $55^\circ$  по направлению намотки;
- залом образцов на углы  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ ;
- удар падающим грузом массой 100 кг (бетонный блок).

Был проведен сравнительный анализ частотных характеристик труб в исходном виде (без дефектов) с частотными характеристиками аналогичных труб, но с нанесенными дефектами, описанными выше.

### 3. Результаты и обсуждение

Анализ спектров сводится к определению значений амплитуд для конкретных частот в спектре. Обычно количество частотных пиков в спектре при модальном анализе будет соответствовать количеству элементов в объекте. Если образец идеален и нет никаких дефектов (повреждений), нарушений в технологическом процессе его изготовления, транспонировке, хранении, то в идеальном случае к количеству частотных пиков будет добавлен один пик – это модальная (парциальная) частота образца.

Любой дефект в спектральной линии модальной частоты даст эффект «размыва» линии спектра (разная плотность материала в зоне дефекта) за счет изменения скорости

звука виброакустической волны при прохождении через зону дефекта (эффект дифракции и фазового смещения во фронте волны). Кроме того, в спектре появится высокочастотная составляющая, которая связана с эффектом интерференции (излучения дефектом акустической волны). Частота этого акустического излучения дефекта будет определяться геометрией данного дефекта. На рис. 4 приведены спектральные характеристики для образца СБ-Д1.

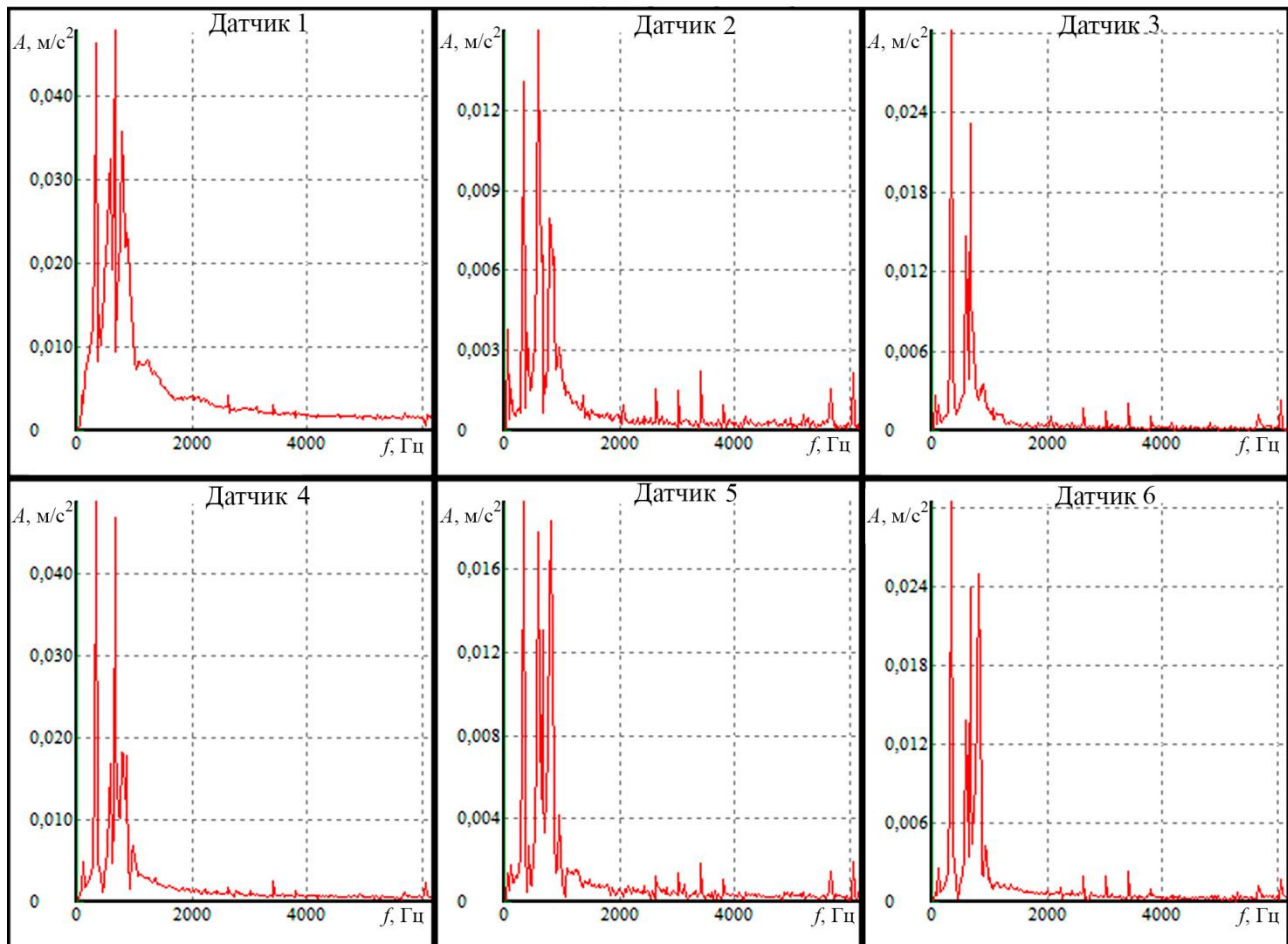
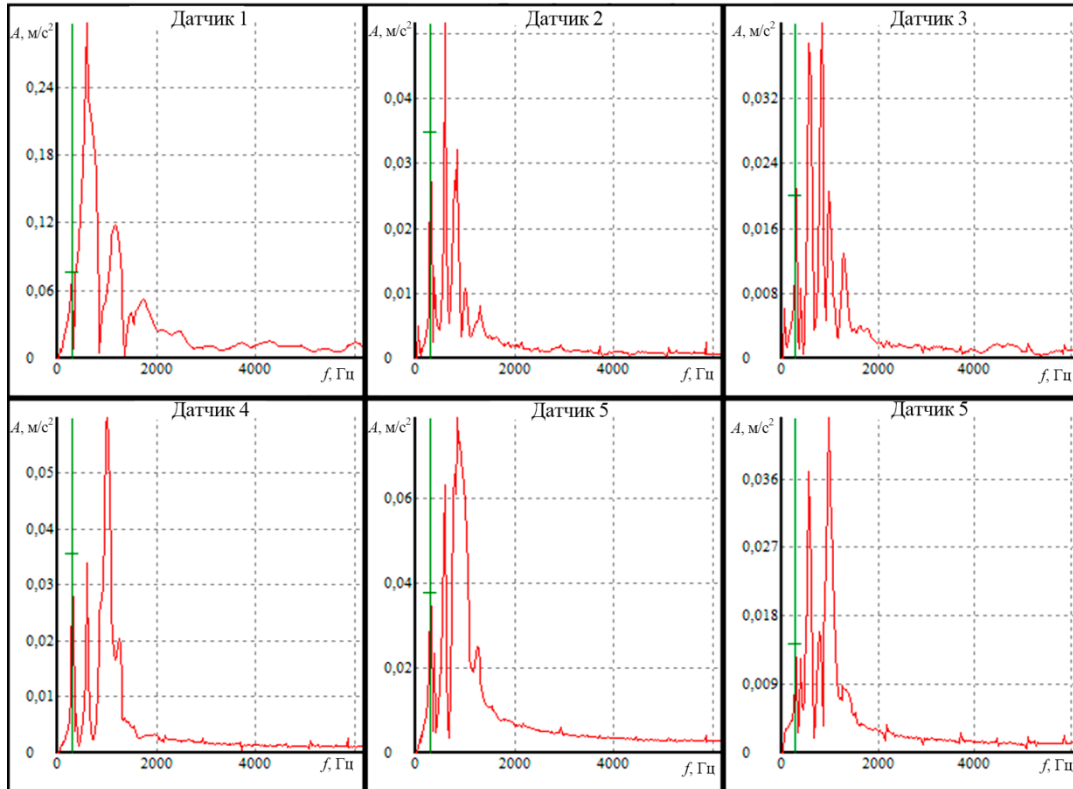


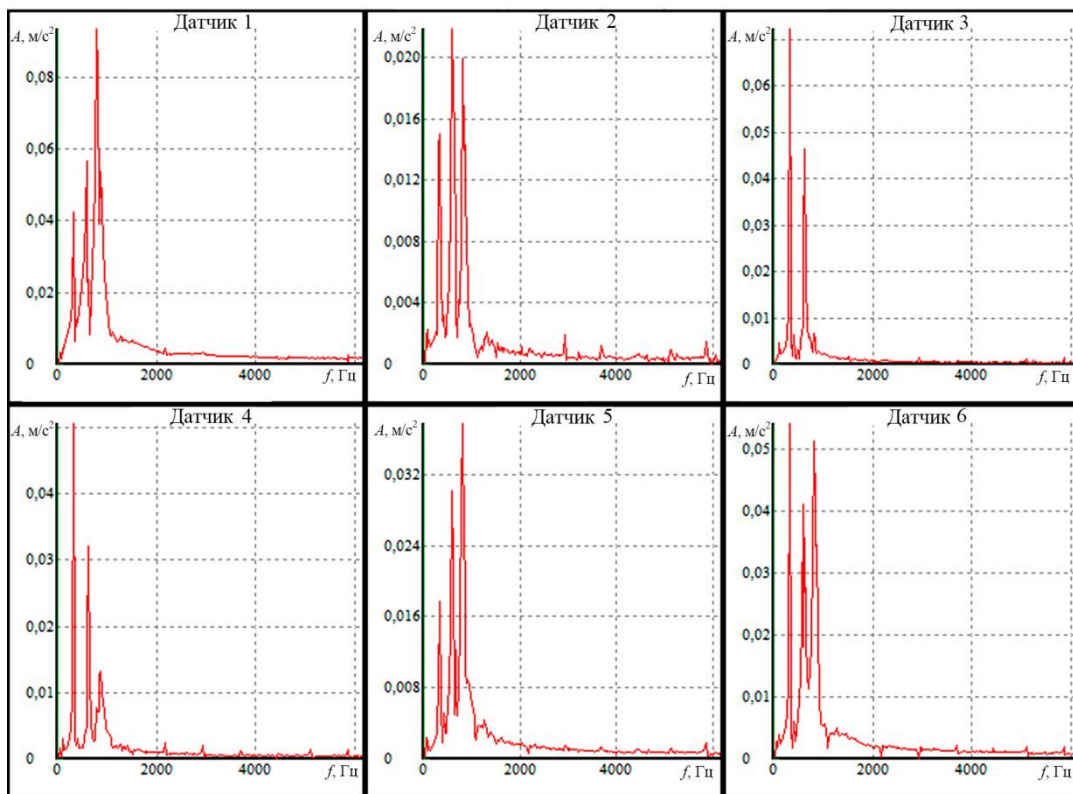
Рис. 4. Спектр сигналов модального анализа образца СБ-Д1 (без дефектов). Здесь и далее обозначения на графиках следующие:  $A$  – амплитуда колебаний на данной частоте,  $\text{м/с}^2$ ,  $f$  – частота, Гц

*3.1. Анализ частотных спектров при дефекте типа «надрез» длиной 100 мм под углом  $55^\circ$  по середине образца (на равном удалении от датчиков)*

Сравнительный анализ спектральных характеристик «бездефектного» образца СБ-Д1 и образца СБ-Д2 при длине надреза 100 мм приведен на рис. 5. Существует достаточно существенная разница в спектральных характеристиках, если брать за основу спектр импульсной волны, сформированной у СБ-Д2. Характер частотного распределения парциальных частот элементов конструкции показывает, что имеется смещение частот в спектре модальных характеристик. Особенно это заметно на частотах 292 Гц, которые являются парциальной частотой наружного слоя полиэтилена. Парциальная частота металлического каркаса, в зависимости от условий намотки, лежит в диапазоне частот от 570 до 610 Гц. Это следует из частотного анализа для условно «годного» образца.



*a*



*б*

Рис. 5. Пример сравнительных значений спектров: образец СБ-Д1 (*a*);  
образец СБ-Д2 с надрезом длиной 100 мм под углом 55° (*б*)

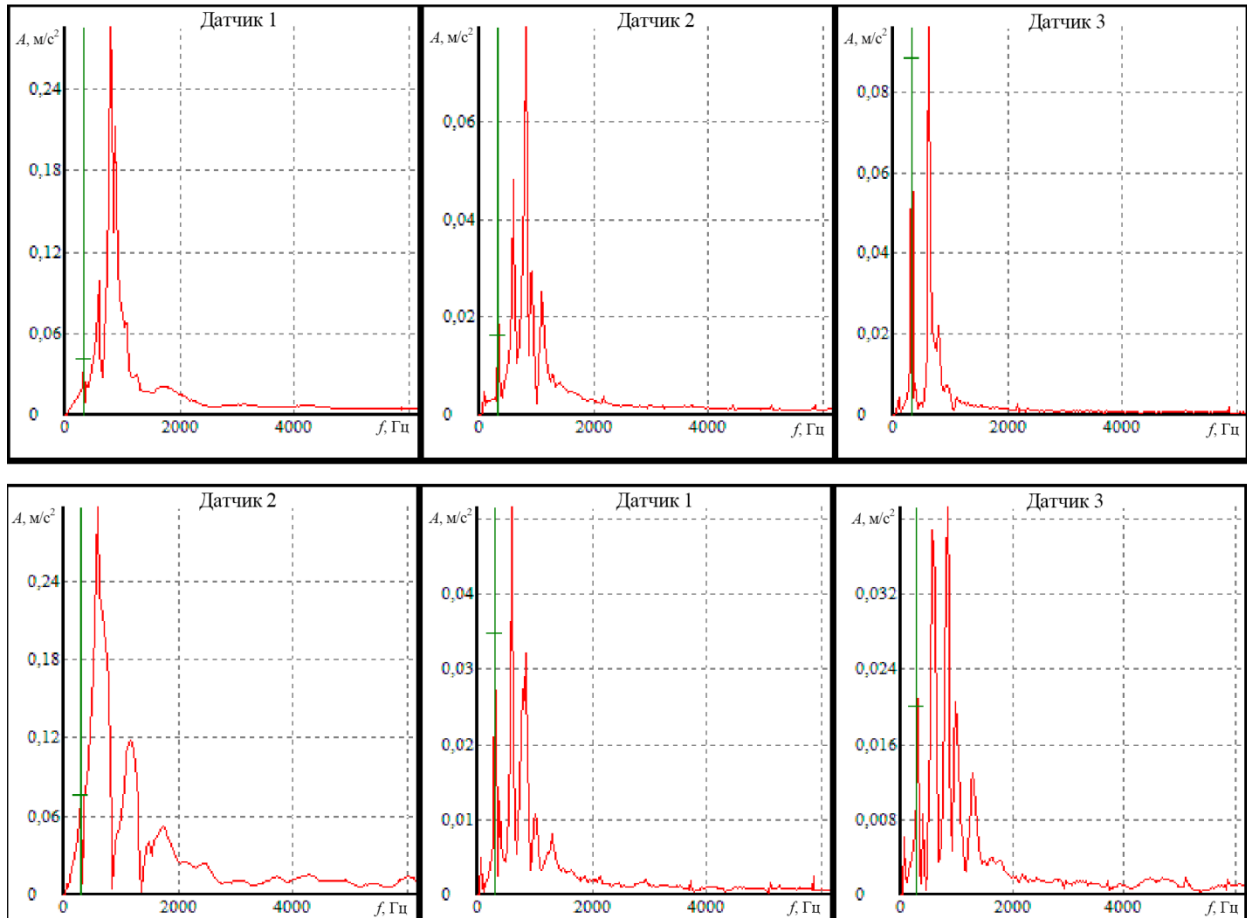


Рис. 6. Сравнительный анализ спектров прохождения виброакустической волны СБ-Д2 до нанесения дефекта и с дефектом – надрезом длиной 100 мм под углом 55°

На рис. 6 можно увидеть размытости спектральных характеристик датчиков Д4–Д6 по сравнению со спектром Д2. Важным является идентификация на полученных спектрах участков спектральных характеристик, в которых отображается данный дефект. Для этого необходимо провести анализ спектральных характеристик прохождения виброакустической волны, сформированной импульсным воздействием около того или иного датчика при прохождении от датчика к противоположному датчику (т. е. от Д1 до Д4, от Д2 до Д5 и от Д3 до Д6 и в обратном направлении; кроме того, в анализе прохождения импульсной виброакустической волны, в том числе от Д1 до Д5 и Д6, от Д2 до Д4 и Д6, от Д6 до Д4 и Д5, от Д4 до Д2 и Д3, от Д5 до Д1 и Д3, от Д6 к Д1 и Д2), чтобы условно на одном дефекте по геометрическим параметрам и расположению выявить определенную закономерность в спектральных изменениях, они могут быть разными по амплитуде, но в частотной области близкими. Основная задача, которую необходимо решить в этом случае для построения анализа развития дефекта, – определение участка спектральной характеристики, отображающего данный дефект, и это отображение должно присутствовать в определенном виде на всех вышеперечисленных спектральных характеристиках всех сигналов.

Для выявления дефекта «надрез» на различное расстояние (100, 200, 300 мм) необходимо провести обработку 36 пар спектральных характеристик для образцов СБ-Д2, СБ-Д3, СБ-Д12, СБ-Д13, СБ-Д22 и СБ-Д23 для двух серий измерений:

- измерение в плоскости установки образца на ложементы;
- измерение в плоскости с поворотом датчиков на 90°.

В качестве примера для данного дефекта на рис. 6 приведены характеристики спектрального размывания парциальной частоты полиэтилена поверхностного слоя на образцах СБ-Д2. Волна от импульсного воздействия шла от Д1 по длине образца к Д3 до и после нанесения дефекта.

Для всех образцов (СБ-Д2, СБ-Д3, СБ-Д12, СБ-Д13, СБ-Д22 и СБ-Д23) с данным видом дефекта (надрезом длиной 100 мм под углом 55°) произошло падение частотной характеристики в среднем с 341 до 292 Гц.

### *3.2. Анализ частотных спектров при дефекте типа «надрез» длиной 200 мм под углом 55°*

Обработка спектров прохождения виброакустической волны, сформированной импульсной нагрузкой, проводится аналогично приведенному выше описанию.

Сравнительный анализ спектральных характеристик бездефектного образца СБ-Д11 и образца СБ-Д14 (длина надреза 200 мм) приведен на рис. 7. Он показывает, что есть достаточно существенная разница в спектральных характеристиках, если брать за основу спектр импульсной волны, сформированной у Д2. Характер частотного распределения парциальных частот элементов конструкции показывает, что имеется смещение частот в спектре модальных характеристик. Особенно это заметно на частотах 300 – 260 Гц, которые являются парциальной частотой наружного слоя полиэтилена.

В целом для всех представленных образцов (СБ-Д4, СБ-Д5, СБ-Д14, СБ-Д15, СБ-Д24 и СБ-Д25) с данным видом дефекта (надрезом длиной 200 мм под углом 55°) произошло падение частотной характеристики в среднем с 321 до 238 Гц.

### *3.3. Анализ частотных спектров при дефекте типа надрез длиной 300 мм под углом 55°*

Сравнительный анализ спектральных характеристик «бездефектного» образца СБ-Д1 и образца СБ-Д6 с надрезом длиной 300 мм под углом 55° приведен на рис. 8. Здесь показано, что есть достаточно существенная разница в спектральных характеристиках. Характер частотного распределения парциальных частот элементов конструкции показывает, что имеется смещение частот в спектре модальных характеристик. Особенно это заметно в интервале частот от 260 до 300 Гц, который является диапазоном изменения парциальной частоты наружного слоя полиэтилена.

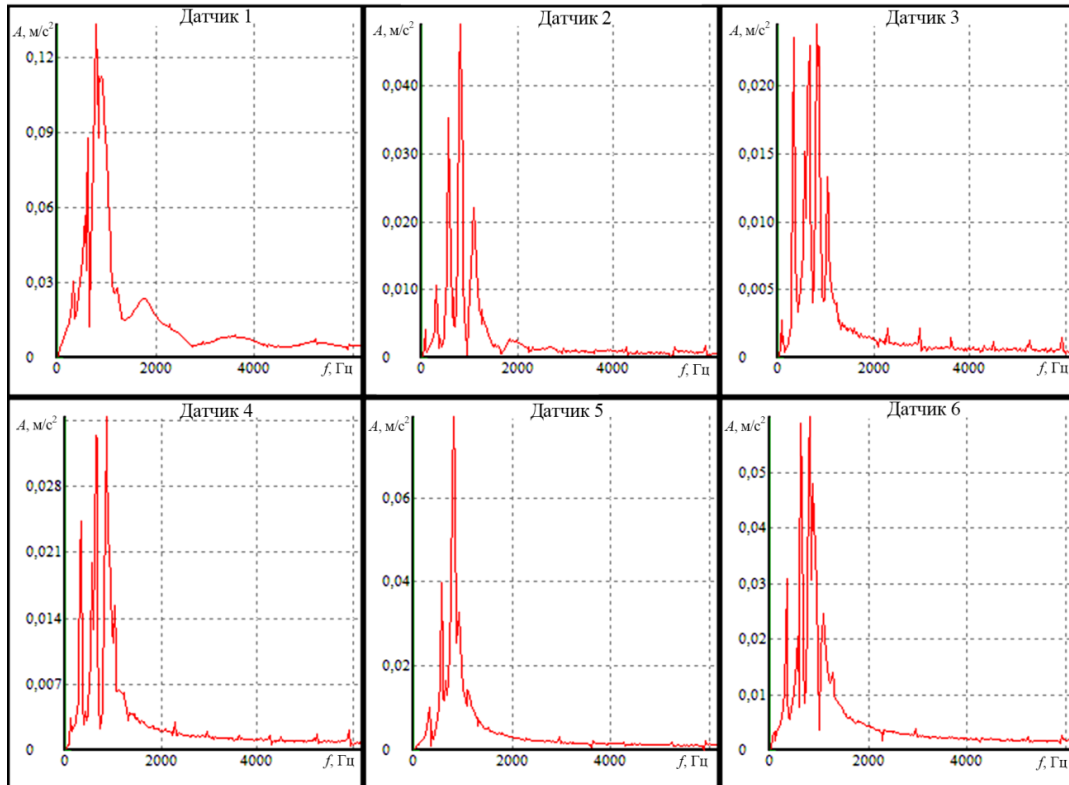
В определении частотных характеристик на данных объектах исследования (СБ-Д6, СБ-Д16, СБ-Д26) с данным видом дефекта (надрезом длиной 300 мм под углом 55°) произошло падение частотной характеристики в среднем с 317 до 170 Гц.

При изменении частотной характеристики на образцах (СБ-Д7, СБ-Д17 и СБ-Д27) с дефектом «залом» на угол 30° были обнаружены следующие тенденции. На рис. 9 в качестве примера приведены спектральные характеристики «бездефектного» образца СБ-Д1 и образца СБ-Д7.

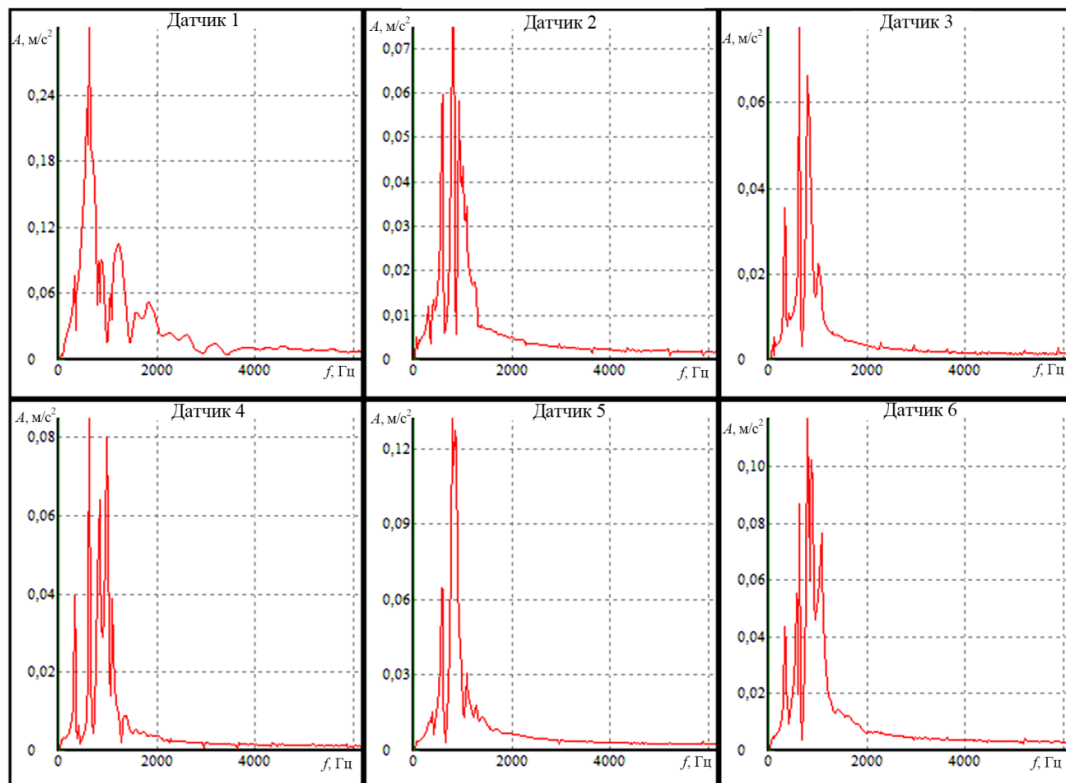
Анализ изменений в спектрах частот показывает, что изменение частот происходит в широком диапазоне – от 292 до 1089 Гц. Для принятия решений, на какие изменения спектральных характеристик, связанных с дефектом «залом», необходимо обращать внимание, следует проанализировать их изменение (до нанесения дефекта и после нанесения дефекта).

Для более корректной оценки изменения парциальных частот элементов ПАТ необходимо сравнение спектров одного и того же образца до нанесения дефекта «залом». На рис. 10 приведены спектры изменения частот для образца СБ-Д7.

Сравнительный анализ показывает, что для классификации этого дефекта необходимо в первую очередь выделять парциальные частоты металлического каркаса, снижение которых происходит в различных диапазонах для представленных образцов (СБ-Д7, СБ-Д17, СБ-Д27). Средняя тенденция снижения частотных характеристик образцов следующая: происходит снижение с частоты 647 Гц до 573 Гц для образца без залома и с частоты 866 Гц до 793 Гц для образца с заломом.

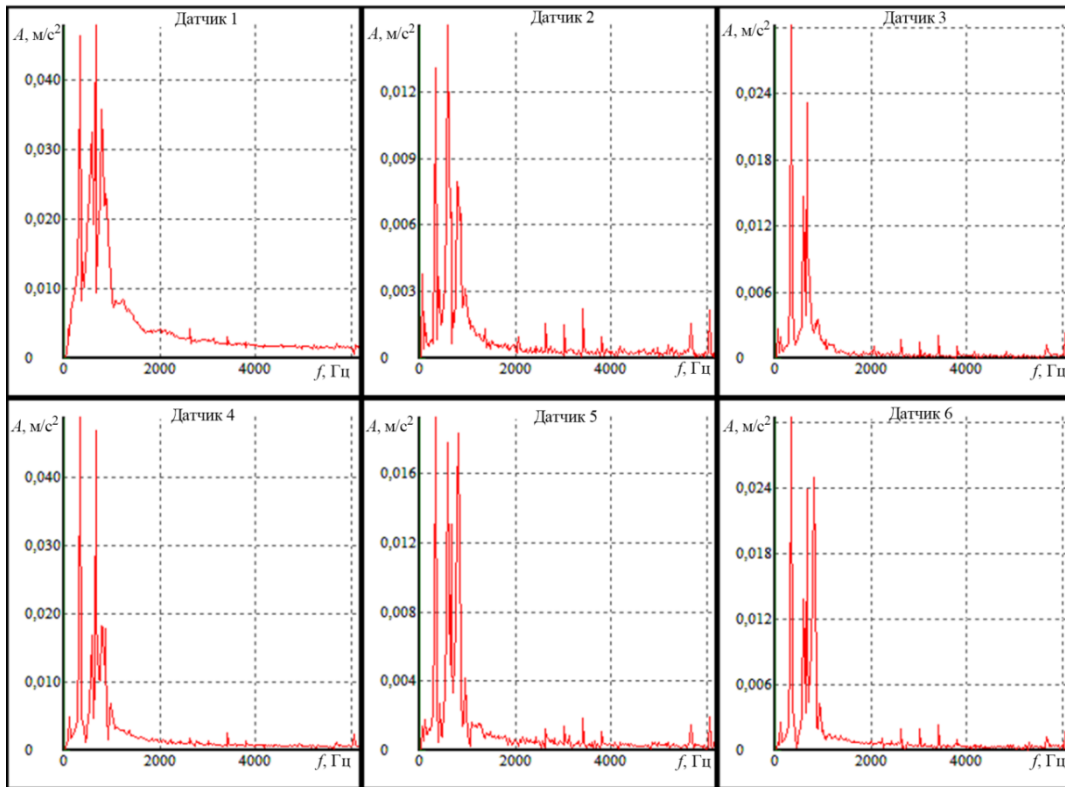


*a*

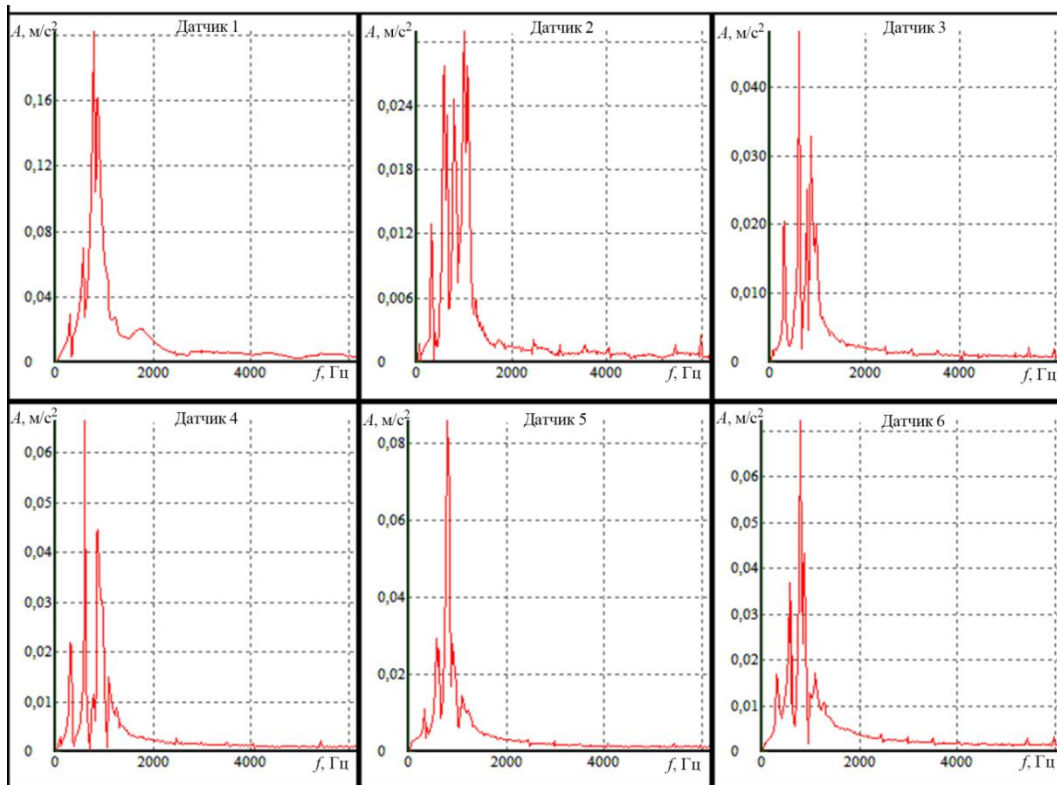


*б*

Рис. 7. Сравнительный анализ спектров прохождения виброакустической волны СБ-Д11 (*a*) без дефекта и СБ-Д14 (*б*) с дефектом – надрезом длиной 200 мм под углом 55°

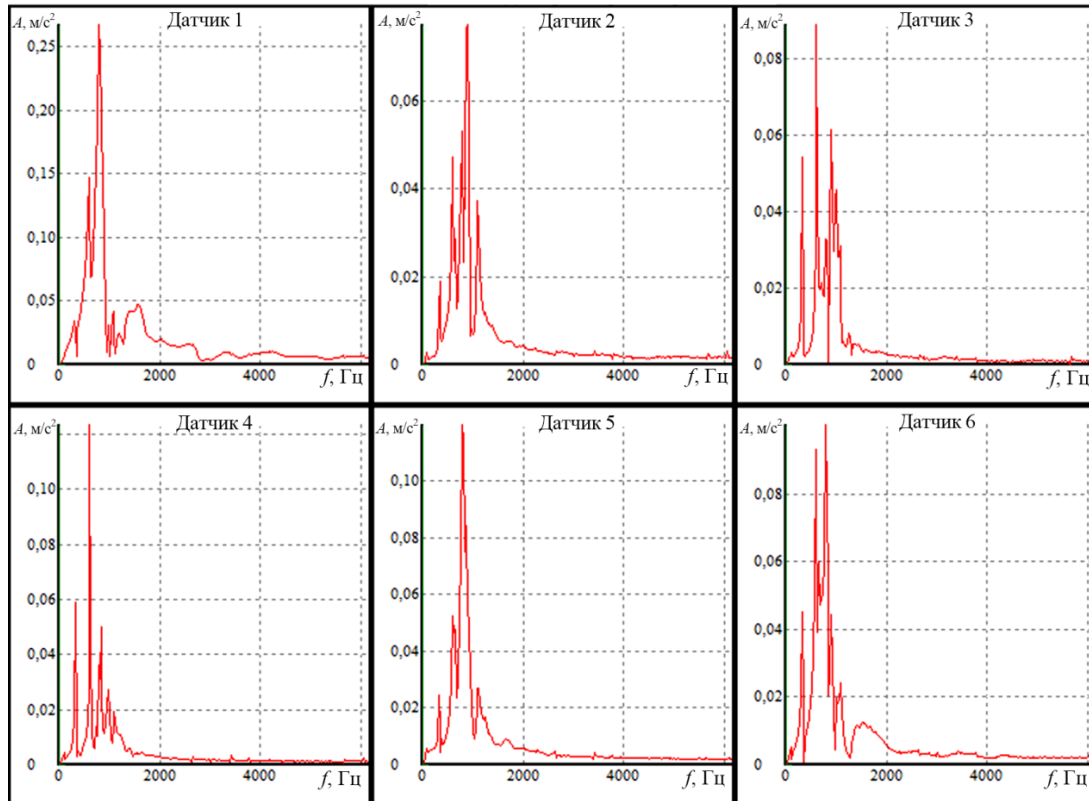


*a*

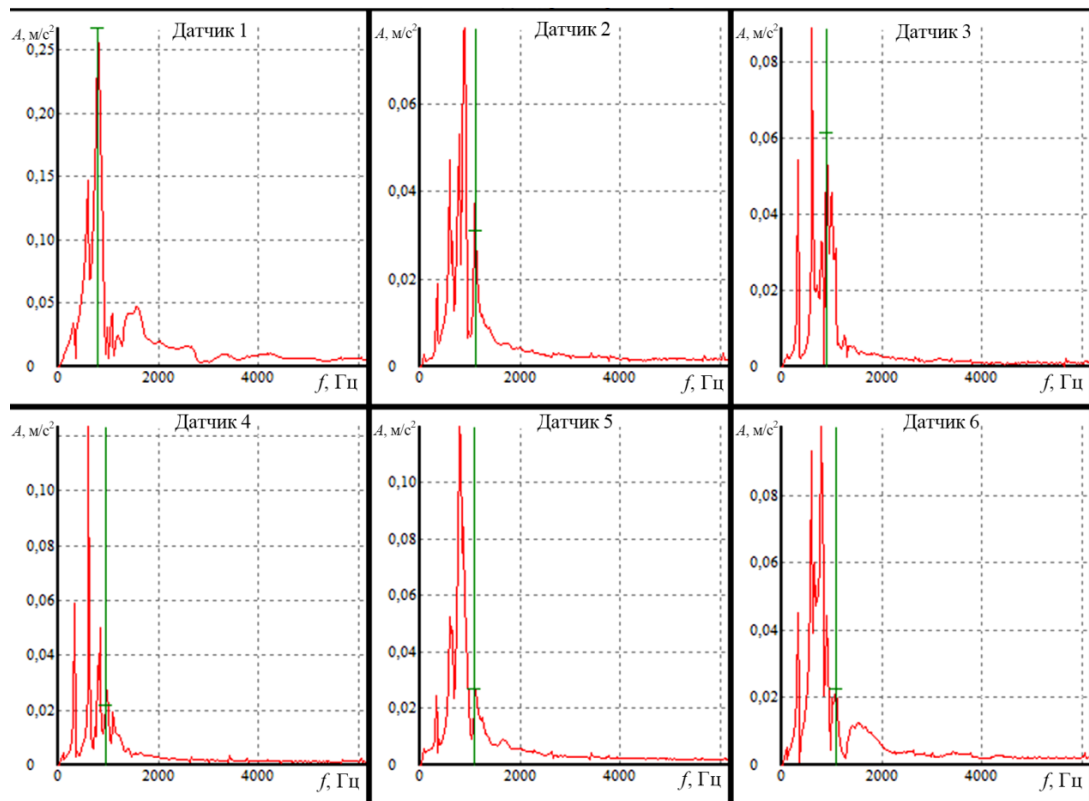


*б*

Рис. 8. Сравнительный анализ спектров прохождения виброакустической волны в образце СБ-Д1 (*a*) без дефекта и образце СБ-Д6 (*б*) с дефектом – надрезом длиной 300 мм под углом 55°

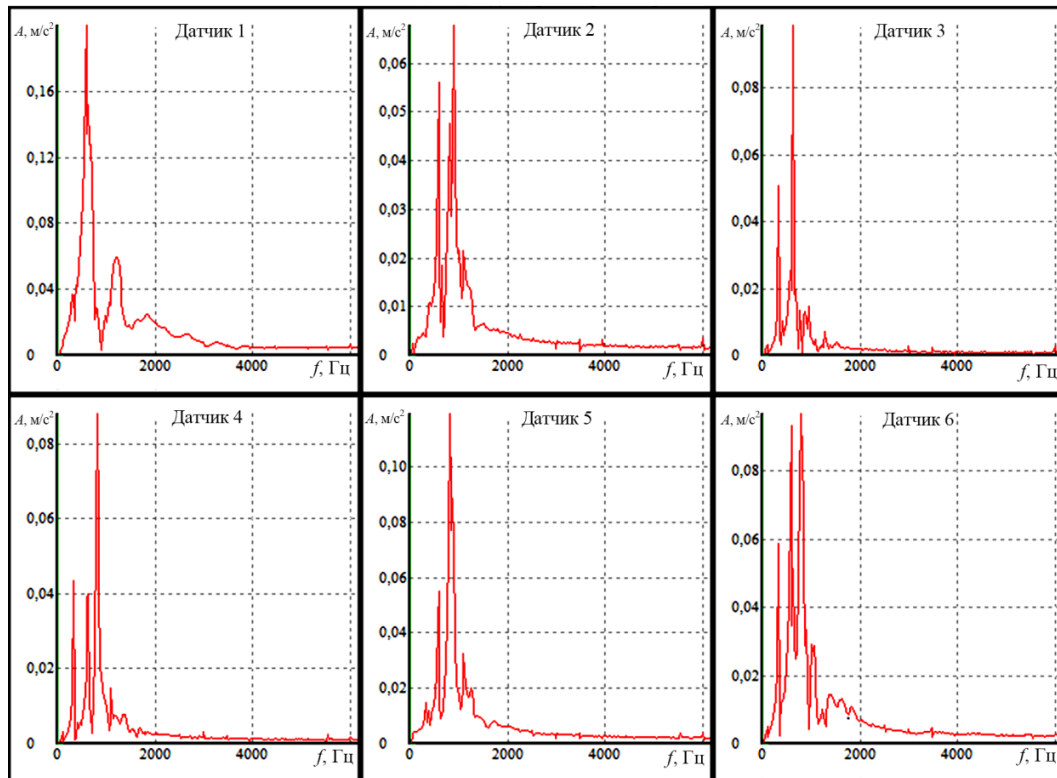


*a*

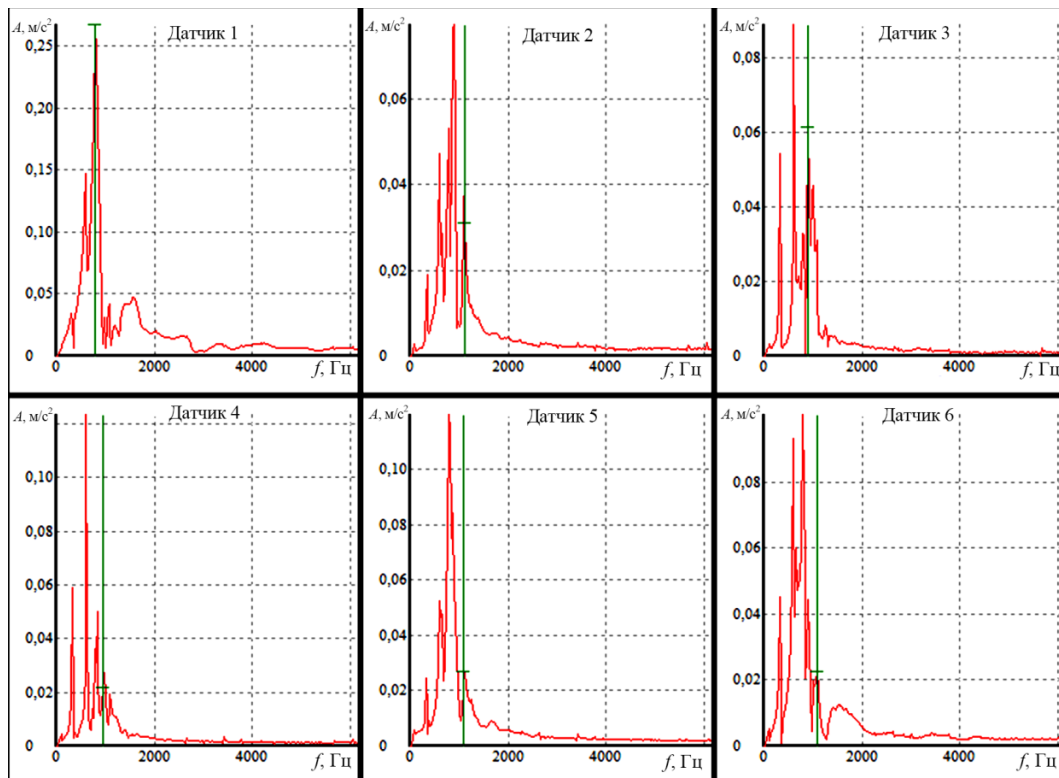


*б*

Рис. 9. Сравнительный анализ спектров прохождения виброакустической волны в образце СБ-Д7 (дефект «залом 30°») (*б*) и в бездефектном образце СБ-Д1 (*а*)

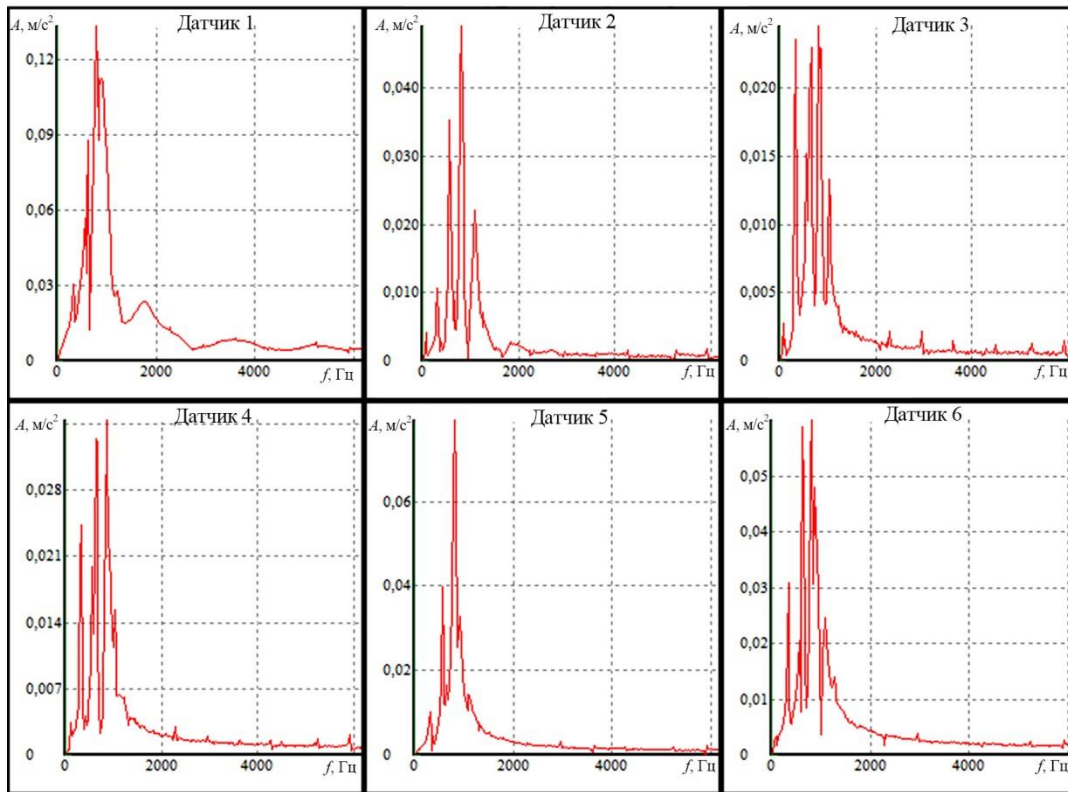


*a*

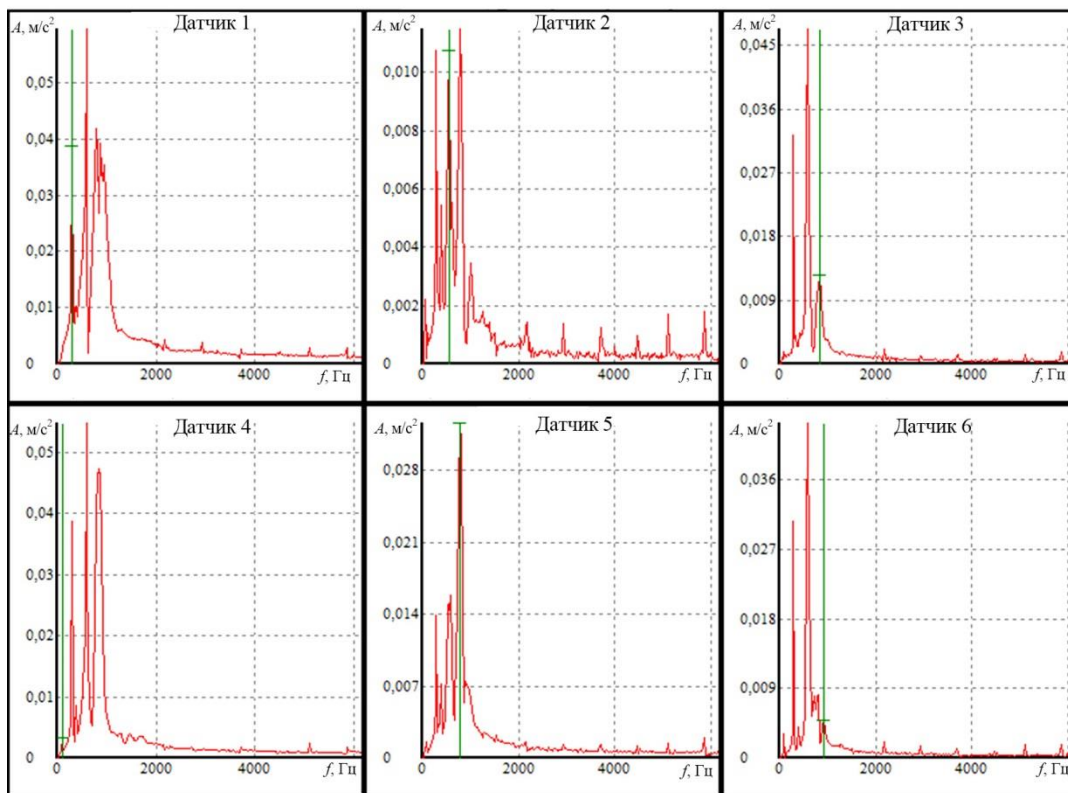


*б*

Рис. 10. Сравнительный анализ спектров прохождения виброакустической волны в образце СБ-Д7 с заломом 30° (*a*) и в бездефектном образце СБ-Д7 (*б*) до воздействия механической нагрузки



*a*



*б*

Рис. 11. Сравнительный анализ спектров прохождения виброакустической волны в бездефектном образце СБ-Д10 (*a*) и с дефектом «удар массой 100 кг» (*б*)

Следующий вид дефекта – удар падающим грузом массой 100 кг (бетонный блок) – выполнен на трех образцах: СБ-Д10, СБ-Д20 и СБ-Д30. В качестве примера представлены результаты частотной характеристики прохождения виброакустического сигнала по телу образца с данным видом дефекта (рис. 11 *а, б*).

Анализ изменений частотного спектра на представленных образцах с дефектом (удар массой 100 кг) показывает, что также наблюдается снижение величин парциальной частоты элементов (полиэтилена и стального каркаса). Для металлического каркаса частота изменяется с 586 Гц для образца без излома до 488 Гц и с частоты 854 Гц до 805 Гц, с частоты 952 Гц до частоты 866 Гц, парциальные частоты наружного слоя полиэтилена падают с 292 до 97 Гц.

Таблица

Сравнительные характеристики частотных откликов по виброакустическому методу исследуемых образцов ПАТ

Вид дефекта	Исходная частотная характеристика, Гц	Частотная характеристика образца с дефектом, Гц
Надрез длиной 100 мм под углом 55°	Наружный слой полиэтилена	
	317	292
Надрез длиной 200 мм под углом 55°	Наружный слой полиэтилена	
	321	238
Надрез длиной 300 мм под углом 55°	Наружный слой полиэтилена	
	317	170
Залом образца на угол 30°	Металлический каркас	
	647	573
	866	793
Залом образца на угол 40°	Металлический каркас	
	610	452
	756	611
	951	817
	Наружный слой полиэтилена	
317	280	
Залом образца на угол 50°	Металлический каркас	
	607	427
	868	742
	1111	940
	Наружный слой полиэтилена	
304	122	
Удар падающим грузом массой 100 кг	Металлический каркас	
	586	488
	854	805
	952	866
	Наружный слой полиэтилена	
292	97	

При изменении частотной характеристики на образцах (СБ-Д8, СБ-Д18 и СБ-28) с дефектом «залом» на угол 40° были определены такие же закономерности, как и в предыдущем случае. Помимо этого, прослеживается изменение частотной характеристики наружного слоя полиэтилена. Изменение парциальных частот наружного слоя полиэтилена произошло с 317 до 280 Гц, а металлического каркаса – с 610 до 452 Гц, с 756 до 611 Гц, с 951 до 817 Гц.

Дефект «залом 50°» выполнен, как и в предыдущих случаях, на трех образцах (СБ-Д9, СБ-Д19 и СБ-Д29). Определение частотного изменения осуществляется путем сравнения частотных спектров для образца до и после нанесения дефекта «залом». Характер частотных характеристик практически такой же, как при заломе на угол 40°. Выделяются частотные характеристики как полиэтиленового слоя, так и армирующего металлического каркаса. Изменение парциальных частот наружного слоя полиэтилена произошло с 304 до 122 Гц, а металлического каркаса – с 607 до 427 Гц, с 868 до 742 Гц, с 1111 до 940 Гц.

Исходя из результатов проведенной работы по использованию технологии виброакустического контроля технического состояния ПАТ, можно констатировать, что метод достаточно чувствителен к любым изменениям в структуре элементов системы, в том числе и к наличию дефектов.

#### 4. Заключение

Спектральный анализ «бездефектного» образца позволил определиться с базовыми модальными частотами конструкции образца ПАТ. Из него следует, что модальная (собственная) частота наружного герметизирующего полиэтиленового слоя лежит в интервале  $290 \pm 5$  Гц, внутреннего герметизирующего полиэтиленового слоя – в интервале  $310 \pm 10$  Гц. Данный увеличенный разброс связан с дополнительными напряжениями в этом слое при намотке на него металлической ленты. Намного сложнее с модальными (собственными) частотами армирующего слоя. Они находятся в диапазоне от 560 до 1030 Гц. Наиболее повторяющиеся модальные частоты для 60 % всех образцов – это 561, 830 и 952 Гц. Для достаточно большого объема образцов этот спектр модальных частот «размазан» с максимальным пиком по амплитуде либо на частоте 856 Гц.

Исходя из определения частотной характеристики сигнала, хорошо идентифицируются дефекты различной длины. Также в полученных спектрах возникают высокочастотные колебания, которые практически не изменяются по амплитуде. Можно предположить, что таким образом реализуется другой размер надреза – ширина или глубина.

В случае с другим видом дефекта исследуемой трубы – заломом на различные углы (30, 40 и 50 градусов) – также присутствуют существенные различия в частотных характеристиках сигнала. Анализ спектральных изменений по сравнению с условно «годным» образцом показывает, что меняются практически все частотные характеристики собственных частот.

Другой вид дефекта – удар падающим грузом массой 100 кг – приводит к локальному дефекту в теле трубы. В этом случае происходит размывание всех модальных частот конструкции образца. Кроме того, локальные внутренние дефекты приводят к отклику на виброакустическое поле данных дефектов в высокочастотной области.

Для разработки алгоритма программы оценки технического состояния трубы и корректной оценки дефекта данного количества образцов недостаточно. Необходимо не менее 25 штук по каждому виду дефекта, чтобы получить корреляционную функцию частотного проявления дефекта при анализе прохождения виброакустической волны по телу ПАТ.

#### Благодарность

*Работа выполнена при непосредственном участии профессора научно-исследовательской лаборатории виброакустического контроля и диагностики Пермского национального исследовательского политехнического университета Сальникова Алексея Федоровича. Выражаем огромную благодарность сотрудникам лаборатории и Алексею Федоровичу за многолетний опыт в проведении данных испытаний и оценку результатов.*

## Литература

1. Анализ причин отказов глубинного-насосного оборудования при эксплуатации скважин штанговыми насосами в осложненных условиях / А. С. Галеев, Г. И. Бикбулатова, Ю. А. Болтнева, В. С. Шулин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – №. 8. – С. 36–38. – DOI: 10.24412/2071-6168-2024-8-36-37.
2. Гуреева Е. Г., Гуреев К. А., Ахунов Ю. А. Расширенный анализ экстенсивных и интенсивных факторов, определяющих уровень добычи нефти на месторождениях // Фундаментальная и прикладная наука: состояние и тенденция развития : монография. – Петрозаводск : МЦНП «Новая наука», 2023. – С. 148–159.
3. Причины образования и технологии борьбы с асфальтосмолопарафиновыми отложениями / К. Ю. Стрелкова, Г. Г. Гиляев, Г. Г. Гиляев, Я. Н. Решетникова, А. Р. Липатова // Молодежная наука, Краснодар, 2021 г. : сборник трудов конференции. – Краснодар : КубГТУ, 2022. – С. 66–74.
4. Какаева М. Ю. Технология прогнозирования солеотложений при нефтедобыче // Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник» – 2022. – № 9.
5. Бойжигитов А. У., Зайлалова В. Р. Коррозионные процессы при добыче нефти и газа // Материалы 48-й Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием, Октябрьский, 23 апреля 2021 г. : статья в сборнике трудов конференции. – Уфа : Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2021. – С. 827–831.
6. Rogachev M. K., Aleksandrov A. N. Justification of a comprehensive technology for preventing the formation of asphalt-resin-paraffin deposits during the production of highly paraffinic oil by electric submersible pumps from multiformation deposits // Journal of Mining Institute. – 2021. – Vol. 250. – P. 596–605. – DOI: 10.31897/PMI.2021.4.13.
7. Механические примеси и их влияние на эксплуатацию УЭЦН при добыче нефти / В. В. Кравцов, Д. Г. Антониади, Г. Г. Гиляев, М. В. Григорьев, Я. Н. Решетникова // Молодежная наука: сборник лучших научных работ молодых ученых / отв. ред. С. А. Удодов. – Краснодар : КубГТУ, 2021. – 131 с.
8. Повышение эффективности добычи высоковязкой нефти с использованием реагенторастворителей: лабораторные испытания и внедрение на производстве / П. В. Рощин, А. М. Зиновьев, А. А. Рязанов, Е. И. Соболева, А. В., Никитин А. Р. Мурзаханов // Вестник Евразийской науки. – 2021. – Т. 13 (2). – URL: <https://esj.today/PDF/24SAVN221.pdf>
9. Митрошин А. В. Определение минимальных мероприятий в скважине по предотвращению образования асфальтосмолопарафиновых отложений // Недропользование. – 2021. – Т. 21 (2). – С. 94–100. – DOI: 10.15593/2712-8008/2021.2.7.
10. Газовые гидраты в Арктике: возможности и перспективы изучения электромагнитными методами / Н. В. Мисюркеева, И. В. Буддо, И. А. Шелохов, А. С. Смирнов, А. А. Нежданов // Науки о Земле и недропользование. – 2024. – Т. 47 (4). – С. 368–380. – DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-4-368-380.
11. Рустамов М. М. у. Влияния сульфатвосстанавливающих бактерий (СВБ) в процессе добычи нефти // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. – 2024. – 6 (123). – DOI: 10.32743/UniTech.2024.123.6.17721. – URL: <https://universum.com/ru/tech/archive/item/17721>
12. Kantuykov R. R., Zapevalov D. N., Vagapov R. K. Analysis of the application and impact of carbon dioxide media on the corrosion state of oil and gas facilities // Journal of Mining Institute. – 2021. – Vol. 250. – P. 578–586. – DOI: 10.31897/PMI.2021.4.11.
13. Шкодин А. А., Тлехусеж М. А. Коррозия и методы борьбы с ней в нефтепромысловых отраслях // Научное обозрение. Педагогические науки. – 2019. – № 4-4. – С. 97–101.
14. Кадыров Я. А. Коррозия оборудования систем добычи, сбора и подготовки нефти // Наука и мировоззрение. – 2024. – № 27. – С. 462–465.

15. Carbon dioxide corrosion inhibitors: current state of research and development / M. V. Chudakova, K. A. Ovchinnikov, D. N. Ulyanov, A. M. Kunakova, L. R. Saifutdinova, A. A. Pimenov, A. L. Maximov // *Journal of Mining Institute*. – 2025. – Vol. 271. – P. 3–21.
16. Новоселова Е. А., Ивахнюк Г. К. Выбор коррозионностойких сталей и сплавов на основе железа для предотвращения чрезвычайных ситуаций, вызванных коррозией нефтепроводов // *Техносферная безопасность*. – 2021. – № 2 (31). – С. 11–20.
17. Богатов М. В., Юдин П. Е., Амосов А. П. Применение внутренних многофункциональных покрытий насосно-компрессорных труб для защиты от образования асфальтосмолопарафиновых отложений // *Нефтегазовое дело*. – 2023. – Т. 21 (3). – С. 149–160. – DOI: 10.17122/ngdelo-2023-3-149-160.
18. Бикмасов Р. Г. Проблемы применения полимерно-армированных труб на объектах промышленных нефтегазопроводов // *Вопросы развития современной науки и техники*. – 2021. – № 1. – С. 5–8.
19. Валитов Б. Р., Юнусова А. Ф., Исмагилов И. Р. Перспективы применения полимерных армированных труб в нефтяной и газовой промышленности // *Экономика строительства*. – 2022. – № 6. – С. 116–118.
20. Совершенствование подходов к расчетам на прочность гибких полимерно-армированных труб с неметаллическим армированием / А. И. Габбасов, А. С. Романчук, П. В. Виногорадов, А. Б. Буркутбаев, И. Г. Гундорова, Р. И. Валиахметов // *Экспозиция Нефть Газ*. – 2024. – № 8. – С. 122–126. – DOI: 10.24412/2076-6785-2024-8-122-126.
21. Щербань П. С. Разработка систем показателей качества полимерных армированных труб и их соединений. Вопросы математической обработки данных // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2024. – Т. 26 (2). – С. 80–95. – DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-2-80-95.