

DOI: 10.15593/24111678/2017.01.10

УДК 622.692.4.053-419.8:534

**А.М. Щелудяков**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА,  
ВЫПОЛНЕННОГО ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ,  
С ПОМОЩЬЮ ВОЛНОВОЙ ДИАГНОСТИКИ  
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ**

Рассмотрены средства диагностики трубопроводов. Выделены наиболее интенсивно развивающиеся из них. Особое внимание уделено волновой диагностике трубопроводов, с помощью которой проведено исследование амплитудно-частотных характеристик трубопровода, выполненного из полимерно-армированного материала. Предложена оценка состояния трубопровода на основе расчета изменения частоты. Рассмотрен способ обеспечения экологической безопасности эксплуатации трубопроводного транспорта, выполненного из полимерных материалов. Представлены результаты экспериментальных исследований, временные сигналы, зарегистрированные на оболочке трубопровода при изменении внутреннего давления. Указаны временные сигналы, преобразованные спектральные характеристики, подлежащие анализу. Основным критерием волновой диагностики технического состояния является периодичность проведения исследований спектральных составляющих конкретных трубопроводов. Указан определенный интервал времени, на основе которого имеется возможность вычислить градиент изменения частоты. В случае увеличения временного промежутка у трубы, имеющей повреждения, разница между частотами будет максимальной. Проведены расчеты в программном продукте SolidWorks. Сопоставлены результаты теоретических и практических исследований расчета частот по полимерно-армированным (ПАТ) и стеклопластиковым композитным (СТК) трубам. Определено отклонение между расчетными значениями частот и частотами, полученными в результате механического возбуждения оболочки трубопровода. Результаты сопоставления повлияли на диапазон частот (смещения и размытия) при появлении дефектов оболочки трубопровода в процессе эксплуатации.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, порыв трубопровода, диагностика трубопровода, волновой метод, расчет остаточного ресурса.

**A.M. Shcheludiakov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**ENSURING ENVIRONMENTAL SAFETY USE  
OF PIPELINE TRANSPORTATION MADE OF POLYMERIC  
MATERIALS THROUGH THE USE OF WAVE DIAGNOSTICS  
OF TECHNICAL CONDITION**

The article explores means of pipeline diagnostics and points out the most intensively developing of them. Special attention is paid to pipeline wave diagnostics used to define amplitude-frequency characteristics of the pipeline made of polymer-reinforced material. An assessment of the pipeline con-

dition is given based on the frequency change calculation. The article reviews the method of ensuring ecological safety of polymer materials pipeline transport operation, presents the results of experimental studies, the time signals registered on the shell of the pipeline at the internal pressure change and points out time signals and converted spectral characteristics for further analysis. The main criteria of technical condition wave diagnostics is the regularity of the spectral components studies of the particular pipeline. The author defines a certain time interval on which basis there is a possibility to calculate the gradient of frequency change. When the damaged pipe time interval increases the difference between the frequencies is maximum. The calculations were carried out with the SolidWorks software. The results of theoretical and practical studies of the frequency calculation for polymer-reinforced and fiberglass composite tubes are compared. The deviation between the calculated frequencies and the frequencies obtained as a result of mechanical pipeline shell excitation was found. The results of matching have influenced the frequency range (offset and blur).

**Keywords:** environmental safety, pipeline ruptures, diagnostics pipeline wave method, the calculation of remaining life.

Старение систем магистральных газонефтепроводов ставит задачу обеспечения экологической безопасности эксплуатации трубопроводного транспорта и надежности его функционирования в ряд важнейших государственных проблем. В настоящее время общая протяженность магистральных трубопроводов в России превышает 300 тыс. км, при этом около 40 % газопроводов и 60 % нефтепроводов находятся в эксплуатации более двадцати лет [1, 2].

Задача предупреждения серьезных техногенных аварий и катастроф обуславливает необходимость применения все более достоверных диагностических решений и обоснованного прогноза работоспособности оборудования и трубопроводных конструкций из полимерного материала [3–5]. Несвоевременный контроль за техническим состоянием и нарушение сроков обслуживания могут приводить к порывам, что крайне отрицательно влияет на экологическую безопасность окружающей среды [3].

Условно средства диагностики трубопроводов из композиционных материалов [6] можно разделить на два вида:

- средства контроля трубопроводов при прокладке и ремонте;
- средства контроля трубопроводов в процессе их эксплуатации [7–9].

Наиболее интенсивно развивающимся направлением в настоящий момент является диагностика трубопроводов в процессе их эксплуатации [10–12], которая связана с реальной оценкой технического состояния трубопровода и возможным определением остаточного ресурса его эксплуатации. Кроме того, использование волнового метода [13, 14], который предполагает анализ и оценку изменения волнового фронта в широком частотном диапазоне – от 5 до 5000 Гц, обеспечивает возможность прохождения низкочастотной акустической волны на значительные расстояния между зонами измерений.

В работе [15] авторами рассмотрен подход к оценке технического состояния функционирующего трубопроводного транспорта с помощью указанного метода, приводятся зависимости амплитудно-частотных характеристик трубопровода от времени его использования, на основании которых рассматривается вопрос о наличии (либо отсутствии) дефектов на исследуемом участке. При анализе изменения спектральных характеристик во временном интервале рассчитывается интегральный коэффициент, который позволяет качественно оценить состояние трубопровода.

Предложена методика определения наличия дефектов в трубопроводе, основанная на волновом методе [14]. К исследованию принимается участок трубопровода, выбираются места расположения датчиков (акустических или вибрационных – зависит от способа возбуждения волны), затем производится возбуждение, и снимаются временной и спектральные сигналы трубопровода.

Для качественной оценки прохождения волны между первой и второй группами датчиков необходимо анализировать (причем одновременно) сигнал и его основные составляющие: затухание, спектр, смещение (частотное и амплитудное), фазовую характеристику (дифракцию и интерференцию). Одновременный анализ дает возможность выявить действительные закономерности и отклонения от них, что в переходе от общего к частному случаю позволит дать оценку прохождению волн между группами датчиков. В качестве прямого параметра, кроме указанных выше, используется коэффициент затухания, или коэффициент демпфирования.

В ходе данной работы были проведены исследования прохождения волнового сигнала на трубопроводе из полимерно-армированного материала. Для измерений был выбран участок трубопровода. Глубина залегания трубопровода – 1,2 м, грунт – песчаный. С целью проведения измерений были открыты шурфы, в которых устанавливались акустические датчики, подключенные к прибору «Камертон», позволяющему измерять и анализировать вибрации.

Измерения проводились при различном давлении в трубопроводе (0,1–4,0 МПа), которое изменялось с шагом 0,5 МПа. Полученный временной сигнал представлен на рис. 1, где в левом окне представлен сигнал, снятый с датчика, возле которого проводилось возбуждение волны, а в правом окне – сигнал с датчика, на который пришла волна. Возбуждение проводилось 4 раза, что отображается

в виде резкого увеличения амплитуды виброускорения на временном сигнале.

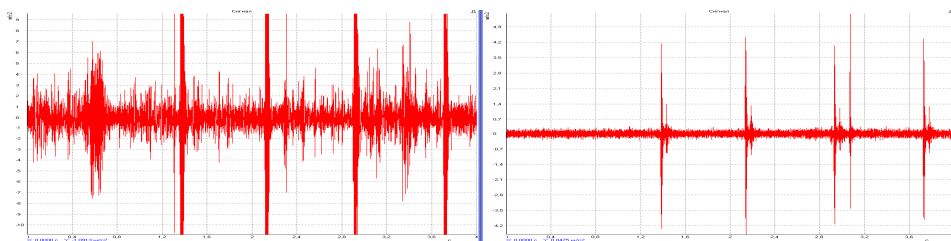


Рис. 1. Сравнение сигналов при измерении давления в трубопроводе

Для проведения расчета остаточной работоспособности труб необходимо получение аналогичных данных через определенный интервал времени (3–6 месяцев), на основании которых вычисляется градиент падения частоты. С целью сопоставления результатов натурального эксперимента и моделирования в среде SolidWorks проанализированы частотные составляющие и их амплитуда в спектрах. Созданы 3D-модели рассматриваемых трубопроводов (рис. 2, 3).

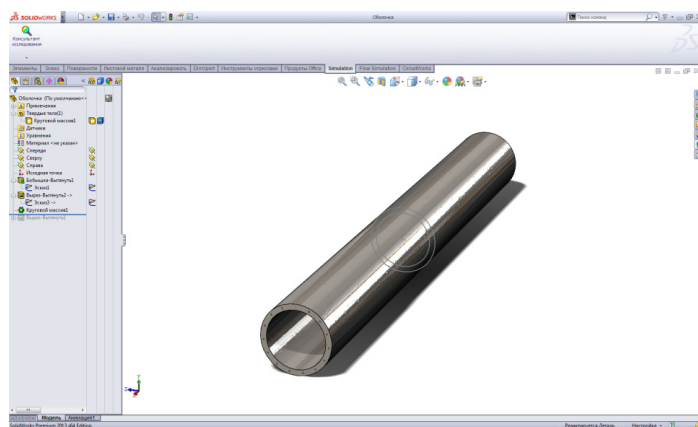


Рис. 2. Интерфейс программы SolidWorks

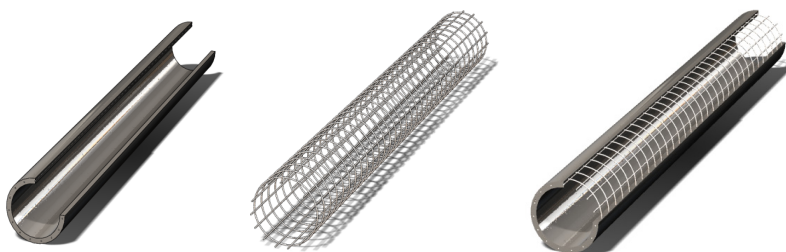


Рис. 3. Поэтапное построение сборки полимерно-армированной трубы

На основе полученной 3D-модели далее осуществлялись проверочные расчеты в подмодуле SolidWorks Simulation для расчета механики деформируемого твердого тела (на основе метода конечных элементов), SolidWorks Flow Simulation – для расчета механики жидкости и газа (на основе метода конечных объемов).

Для связи 3D-моделей, полученных в SolidWorks, и программного продукта «ООР-альтернатив» предусматривается специальный формат файла. На основе взаимодействия указанных программ у исследователей имеется возможность реструктуризировать алгоритм программы «ПАТ-контроль» и создать возможность применения методов решения задач на основе распространения механически возбужденной волны не по элементам законцовок (стыков труб ПАТ), а по оболочке трубы для возможности оценки распространения волны по трубе.

По алгоритмам произведены расчеты частот по трубам ПАТ и ТСК. Их результаты в сравнении с экспериментально полученными при проведении натуральных исследований указаны в таблице.

Результаты расчета частот по трубам ПАТ и ТСК  
в сравнении с данными, полученными экспериментально

Образец	Среднее значение частоты при ударах $f$ , Гц	Расчетное значение частоты $f$ , Гц	Погрешность, %
№ 14, трубы ТСК 130-4,0	150	141	6,5
	300	318	
	550	543	
	700	650	
	1080	1009	
№ 10, трубы ПАТ ЗП95.09.00.000	220	213	3,2
	400	387	
	500	516	
	820	793	
№ 11, трубы ПАТ ЗП95.09.00.000	100	104	4,8
	280	293	
	320	335	
	500	524	
	1200	1257	
№ 2, трубы ТГ 110-В	100	106	6,6
	240	255	
	350	373	
	500	467	
	580	541	
	1080	1008	

С помощью реструктурированного алгоритма программы «ПАТ-контроль» и алгоритма расчета собственных частот конструкции трубопровода в зависимости от начальных и граничных условий применительно к трубопроводам из альтернативных материалов исследованы диапазоны частот смещения и размытия при появлении различных дефектов на основе моделирования.

Проведенные тестовые сравнительные испытания на образцах № 14 трубы ТСК 130-4,0; № 10 трубы ПАТ ЗП95.09.00.000; № 11 трубы ПАТ ЗП95.09.00.000; № 2 трубы ТГ 110-В позволили оценить погрешности расчета частот, которые находятся в пределах 5–7 % с экспериментальными частотами на модели. Погрешность в оценке по частоте также составляет не более 5 %.

Таким образом, исследования амплитудно-частотных характеристик трубопровода, выполненных из полимерно-армированного материала, в процессе его эксплуатации позволяют заранее предусмотреть оперативные мероприятия, связанные с предупреждением порывов и, как следствие, разливом нефтепродуктов. Предотвращение порывов положительно скажется на экологической безопасности окружающей среды при эксплуатации трубопроводов, выполненных из полимерных материалов.

### Список литературы

1. Телегина Е.А., Алекперов В.Ю., Арбатов А.А. Безопасность России. Энергетическая безопасность (Нефтяной комплекс России). – М.: Знание, 2000. – 432 с.
2. Владимиров В.А. Разливы нефти: причины, масштабы, последствия // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2014. – Т. 4, № 1. – С. 217–229.
3. Бухин В.Е. Состояние нормативной базы обеспечения производства и применения труб из полимерных материалов // Трубопроводы и экология. – 2007. – № 1. – С. 2–4.
4. Перспективы применения труб из полимерных материалов в нефтяной промышленности / В.И. Агапчев, В.А. Мартяшева, Н.Г. Михайленко [и др.] // Борьба с коррозией и защита окружающей среды. – М.: ВНИИОЭНГ, 1988. – Вып. 3 (77). – С. 44.
5. Пастернак В.И., Седых А.Д. Пластмассовые трубы, применяемые в газовой и нефтяной промышленности. Обзорная информация.

Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности. – М.: ВНИИОЭНГ, 1981. – Вып. 9. – С. 40.

6. Потапов И.А. Акустические методы и средства неразрушающего контроля и дистанционной диагностики трубопроводов: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2007. – 229 с.

7. Salnikov A.F., Nechayeva E.S., Anoshkin A.N. Experimental and theoretical research into polymer-based reinforced pipe operation // GAS Industry of Russia. – 2008. – № 2. – P. 7–10.

8. Карнаухов Н.Н., Якубовская С.В. Оценка конструктивной надежности полиэтиленовых трубопроводов при применении новых методов строительства // Известия вузов. Нефть и газ. – 2005. – № 2. – С. 9–15.

9. Якубовская С.В. Оценка конструктивной надежности газонепротективных и сборных сетей из полимерных материалов // Технологии ТЭК. – 2005. – № 4. – С. 36–39.

10. Document characterization of gas-liquid two-phase flow pattern based on complexity measures analysis / F. Dong, L.-D. Fang, H.-L. Li, Y. Zhu // Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics. – 2012. – Vol. 3. – P. 996–1000. DOI: 10.1109/ICMLC.2012.6359490

11. Rastorguev G.A. Monitoring and diagnostics of pipe components // Russian Engineering Research. – 2012. – № 32 (7-8). – P. 539–543. DOI: 10.3103/S1068798X12060202

12. Research on flow diagnosis of multipath ultrasonic flowmeter / D.-D. Zheng, J.-L. Zhang, S.-S. Zhao, H.-X. Wang, Z.-Q. Cui // Conference Record – IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. – 2015. – July. – P. 1353–1357. DOI: 10.1109/I2MTC.2015.7151470

13. Щелудяков А.М., Сальников А.Ф. Применение полимерно-армированного материала в трубопроводном транспорте // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2012. – № 2. – С. 158–166.

14. Щелудяков А.М., Сальников А.Ф. Разработка методики динамического нагружения в трубопроводах на полнотелых образцах // Вестник Перм. гос. техн. ун-та. Аэрокосмическая техника. – 2010. – № 30. – С. 97–109.

15. Транспорт трубопроводный. Проблемы и подходы к оценке технического состояния функционирующих трубопроводов с помощью волнового метода неразрушающего контроля / А.М. Щелудяков,

А.Ф. Сальников, М.А. Щелудяков, С.А. Сальников // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2014. – № 4. – С. 126–137.

### References

1. Telegina E.A., Alekperov V.Iu., Arbatov A.A. Bezopasnost' Rossii. Energeticheskaja bezopasnost' (Neftianoi kompleks Rossii) [Security of Russia. Energy Security (Oil Complex of Russia)]. Moscow, Znanie, 2000, 432 p.

2. Vladimirov V.A. Razlivy nefti: prichiny, masshtaby, posledstviia [Oil spills: causes, scales, consequences]. *Strategiia grazhdanskoj zashchity: problemy i issledovaniia*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 217-229.

3. Bukhin V.E. Sostoianie normativnoi bazy obespecheniia proizvodstva i primeneniia trub iz polimernykh materialov [State of the regulatory framework for the production and use of polymer pipes]. *Truboprovody i ekologiia*, 2007, no. 1, pp. 2-4.

4. Agapchev V.I., Martiasheva V.A., Mikhailenko N.G. et al. Perspektivy primeneniia trub iz polimernykh materialov v neftianoi promyshlennosti [Prospects for use pipes made of polymer materials in the oil industry]. *Bor'ba s korroziei i zashchita okruzhaiushchei sredy*. Moscow, Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut organizatsii, upravleniia i ekonomiki neftegazovoi promyshlennosti, 1988, iss. 3 (77), pp. 44.

5. Pasternak V.I., Sedykh A.D. Plastmassovye truby, primeniaemye v gazovoi i neftianoi promyshlennosti. Obzornaia informatsiia [Plastic pipes used in the gas and oil industries. Overview information]. *Korroziia i zashchita v neftegazovoi promyshlennosti*. Moscow, Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut organizatsii, upravleniia i ekonomiki neftegazovoi promyshlennosti, 1981, iss. 9, 40 p.

6. Potapov I.A. Akusticheskie metody i sredstva nerazrushaiushchego kontrolya i distantsionnoĭ diagnostiki truboprovodov [Acoustic methods and means of nondestructive testing and remote diagnostics of pipelines]. Ph. D. thesis. Saint Petersburg, 2007, 229 p.

7. Salnikov A.F., Nechayeva E.S., Anoshkin A.N. Experimental and theoretical research into polymer-based reinforced pipe operation. *GAS Industry of Russia*, 2008, no. 2, pp. 7-10.

8. Karnaukhov N.N., Iakubovskaja S.V. Otsenka konstruktivnoi nadezhnosti polietilenovykh truboprovodov pri primeneniĭ novykh metodov stroitel'stva [Evaluation of the structural reliability of polyethylene pipelines



in the application of new construction methods]. *Izvestiia vuzov. Neft' i gaz*, 2005, no. 2, pp. 9-15.

9. Iakubovskaia SV. Otsenka konstruktivnoi nadezhnosti gazonefteraspredelitel'nykh i sbornykh setei iz polimernykh materialov [Estimation of constructive reliability of gas-oil distribution and precast networks of polymer materials]. *Tekhnologii toplivno-energeticheskogo kompleksa*, 2005, no. 4, pp. 36-39.

10. Dong F., Fang L.-D., Li H.-L., Zhu Y. Document characterization of gas-liquid two-phase flow pattern based on complexity measures analysis. *Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2012, vol. 3, pp. 996-1000. DOI: 10.1109/ICMLC.2012.6359490

11. Rastorguev G.A. Monitoring and diagnostics of pipe components. *Russian Engineering Research*, 2012, no. 32 (7-8), pp. 539-543. DOI: 10.3103/S1068798X12060202

12. Zheng D.-D., Zhang J.-L., Zhao S.-S., Wang H.-X., Cui Z.-Q. Research on flow diagnosis of multipath ultrasonic flowmeter. *Conference Record – IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2015, July, pp. 1353-1357. DOI: 10.1109/I2MTC.2015.7151470

13. Shcheludiakov A.M., Sal'nikov A.F. Primenenie polimerno-armirovannogo materiala v truboprovodnom transporte [Application of polymer-reinforced material in pipeline transport]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhaiushchei sredy, transport, bezopasnost' zhiznedeiatel'nosti*, 2012, no. 2, pp. 158-166.

14. Shcheludiakov A.M., Sal'nikov A.F. Razrabotka metodiki dinamicheskogo nagruzheniia v truboprovodakh na polnotelykh obraztsakh [Development of the method of dynamic loading in pipelines on solid samples]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaiia tekhnika*, 2010, no. 30, pp. 97-109.

15. Shcheludiakov A.M., Sal'nikov A.F., Shcheludiakov M.A., Sal'nikov S.A. Transport pipeline. Problems and approaches to assessing the technical condition of pipelines operated by a wave nondestructively controlling method. *PNRPU Journal. Transport. Transport facilities. Ecology*, 2014, no. 4, pp. 126-137.

Получено 28.02.2017

### **Об авторе**

**Щелудяков Алексей Михайлович** (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Автомобили и технологические машины», Пермский национальный исследовательский политехнический университета (614000, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: sam@pstu.ru).

### **About author**

**Aleksei M. Shcheludiakov** (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Automobiles and Production Machines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614000, Russian Federation, e-mail: sam@pstu.ru).