СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВОЛНОВОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

А.М. Щелудяков, А.Ф. Сальников

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

Развитие трубопроводного транспорта в последние годы связано с широким применением неметаллических трубопроводов, поскольку их преимущества в сравнении с металлическими трубопроводами очевидны: затраты на их обслуживание в процессе эксплуатации минимальны (не требуется коррозионной защиты, специальной химической обработки и др.). Начиная с 80-х гг. XX в. протяженность неметаллических трубопроводов на всей территории России превышает 35 млн км. С развитием трубопроводного транспорта требуется решать задачи определения его остаточной работоспособности. Существующая техническая диагностика связана с оценкой работоспособности металлических трубопроводов. Идентичный способ оценки состояния неметаллических трубопроводов не реализован, поскольку их физико-механические свойства значительно отличаются. Использование существующих методик (применительно к металлическим трубопроводам) невозможно. В работе рассмотрен подход к оценке технического состояния трубопровода, выполненного из полимерного материала, на основе градиентного изменения параметров волнового фронта и амплитудно-частотных характеристик спектрального сигнала, зарегистрированного на оболочке трубы. Поведение трубопроводов в процессе эксплуатации недостаточно изучено, поэтому сложно прогнозировать их остаточную работоспособность при воздействии динамических нагрузок, т.е. при условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации. Это приводит к большому количеству отказов (порывов), что крайне отрицательно влияет на состояние окружающей среды. Предотвращение и ликвидация загрязнения окружающей среды в настоящий момент являются актуальной задачей, следовательно, совершенствование волнового метода оценки технического состояния трубопроводного транспорта из полимерных материалов в процессе его эксплуатации – важная задача, позволяющая снизить риски загрязнения окружающей среды, а также усовершенствовать мониторинг и прогнозирование ее состояния.

Ключевые слова: транспорт трубопроводный, полимерно-армированные трубы, стеклопластиковые трубы, волновой метод, диагностика, остаточная работоспособность, эксплуатация трубопроводов, временной сигнал, спектральный сигнал, амплитудно-частотные характеристики.

IMPROVEMENT OF WAVE METHOD FOR EVALUATION OF TECHNICAL STATE OF POLYMER PIPE DURING ITS OPERATION

A.M. Shcheludiakov, A.F. Salnikov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

Over the last years pipeline transport was developed due to widespread use of non-metallic pipes. In comparison with metallic pipes operating cost of non-metallic is low (there is no need for corrosion protection, special chemical treatment etc.). Since the 1980s, the extent of non-metallic pipelines across Russia exceeds 35 million km. During development of pipeline transport it is needed to solve the problem of residual work capacity determination. Existing technical diagnostics related to the assessment of efficiency of metal pipelines. The same method of estimation of non-metallic pipes state is not implemented because of significantly difference between physical and mechanical properties. Use of existing methods (in terms of metal pipes) is not possible. In this paper the approach to evaluation of technical condition of the pipeline, made of a polymer material is analyzed. The approach is based on the gradient change of wave front parameters, amplitude and frequency characteristics of spectral signal registered on tube cover. The behavior of pipelines during operation are poorly understood, so it is difficult to predict their residual work capacity under dynamic stress, i.e. under operating conditions. This leads to a large number of failures (pipeline ruptures), which has extremely negative impact on the environment. Today prevention and liquidation of environmental pollution is an urgent task, therefore, development the wave method for evaluation of polymer pipelines technical state during its operation is an important objective to reduce the risk of environmental pollution and to improve monitoring and forecasting its state.

Keywords: pipeline transport, polymer-reinforced pipes, fiberglass pipes, wave method, diagnosis, residual work capacity, pipeline operation, time signal, spectral signal, amplitude and frequency characteristics.

Введение

Трубопроводный транспорт является одним из важнейших элементов производственной инфраструктуры страны. Отказы в работе трубопроводов [1, 2] часто имеют достаточно серьезные технологические и техногенные последствия. Затраты на ликвидацию этих последствий варьируются от десятков сотен тысяч до сотен миллионов рублей, поэтому обеспечение безопасности технологического процесса в рамках технической эксплуатации трубопроводов является актуальной задачей, позволяющей снизить риски загрязнения окружающей среды [3, 4], а также усовершенствовать мониторинг и прогнозирование ее состояния [5].

На сегодняшний день срок эксплуатации трубопроводов из полимерных материалов составляет 20–25 лет, соответственно, остро встает вопрос оценки их остаточного ресурса. Производители гарантируют безотказную работу трубопроводов при соблюдении соответствующих технологических параметров перекачки газожидкостных сред в течение 25 лет, следовательно, в ближайшее время проблема оценки работоспособности труб, выполненных из полимерных материалов, в связи с окончанием срока их гарантийной эксплуатации станет актуальной для эксплуатирующих организаций. В случае продления срока эксплуатации исследованного трубопровода возникнет вопрос об установлении точных временных интервалов эксплуатации. Таким образом, разработка методов технической диагностики, обеспечивающих достоверность анализа технического состояния и расчета остаточного ресурса, является актуальной задачей.

При использовании самых современных методик для распознавания дефектов не всегда представляется возможным определить степень их потенциальной опасности. Так, затруднена оценка дефекта как концентратора напряжений, не определяются изменения физико-механических свойств в связи со старением материала, напряжения в теле самой трубы и степень сохранения ее защитных свойств и др. С помощью внутритрубной диагностики пока невозможно решить многие из проблем, связанных с эксплуатацией трубопроводов.

Современные методы и средства неразрушающего контроля и диагностики трубопроводов получили широкое развитие и распространение [6]. Наибольшее применение для исследования стальных трубопроводов получили такие методы, как:

- магнитные (метод магнитной анизотропии, магнитной памяти металла, магнитной проницаемости и др.);
- акустические (импульсные ультразвуковые, волн Лэмба, фазовые, акустоэмиссионные, шумодиагностические и др.);
- электрические;
- оптические (визуальные – эндоскопические, лазерные, топографические и пр.) и др.

Данные методы применяются при контроле различных дефектов, нарушении герметичности, контроле напряженного состояния, контроле сварных соединений, контроле протечек и других параметров, ответственных за эксплуатационную надежность трубопроводов. При этом контроль трубопроводов различного назначения (теплопроводов, газопроводов, нефтепроводов, продуктопроводов, водопроводов и др.) отличается незначительно.

Также все интенсивнее начинают использоваться трубопроводы, изготовленные из композитных материалов (полимерно-армированные (ПАТ), ТСК и др.), которые, обладая рядом преимуществ по сравнению с металлическими, имеют ряд недостатков [7]. Основными из них являются высокая неоднородность физико-механических свойств и наличие дефектов «непроявления» и расслоений. Поэтому проблема неразрушающего контроля и диагностики данных трубопроводов также актуальна, особенно важно исследовать физико-механические свойства и указанные типы дефектов [8].

Анализ отказов трубопроводов (из неметаллических материалов), эксплуатирующихся на предприятии ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», показал, что каждый пятый отказ неметаллических труб происходит по причине механического повреждения при проведении земляных работ в их охранной зоне, каждый второй – по причине нарушения технологии изготовления труб и отступления от технологии строительства трубопроводных магистралей, каждый седьмой отказ вызван нарушением технологии эксплуатации труб. Поэтому формирование подхода по оценке работоспособности трубопроводов из неметаллических материалов на основе волновых процессов [9] и разработка методик и алгоритмов – актуальная задача.

Совершенствование методики контроля технического состояния неметаллических трубопроводов

В настоящий момент разработана методика контроля технического состояния полимерных соединительных элементов, которая

реализована в рамках программного продукта ПАТ-контроль программного комплекса «Камертон» [10].

В программном продукте применяется математический аппарат [11], используемый при контроле сварных соединений. В математической постановке рассматривается динамическая задача теории упругости в перемещениях для случая осевой симметрии расчетной области (уравнения записаны в безразмерной форме). Компоненты тензоров напряжений и деформаций определяются из обобщенного закона Гука.

При неразрушающем методе контроля трубопроводов приведенная деформационная математическая модель должна быть дополнена. С целью учета расположения дефектов необходимо ввести зависимость изменения плотности от длины и радиуса трубопровода. Выявление повреждений трубопровода должно производиться с учетом изменения скорости звука в материале за счет [12, 13]:

- изменения величины плотности (дефект материала);
- частоты (эффекты интерференции и дифракции);
- скорости смещения в звуковой волне из-за разности плотностей используемых материалов в конструкции трубы.

Таким образом, математическая модель, реализованная в программном комплексе «Камертон», должна быть дополнена следующими расчетами

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial z} &= 1 - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{C_z}{m_z} + \frac{C_r}{m_r} + \frac{C_\phi}{m_\phi} \right); \\ \frac{\partial \rho}{\partial r} &= 1 - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{C_z}{m_z} + \frac{C_r}{m_r} + \frac{C_\phi}{m_\phi} \right); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \phi} = 1 - \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{C_z}{m_z} + \frac{C_r}{m_r} + \frac{C_\phi}{m_\phi} \right);$$

$$C_p = \sqrt{\frac{K + 4/3G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}; \quad (2)$$

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}}; \quad (3)$$

$$K_{int} = f \left(\frac{\rho}{\rho_{ф}} \right); \quad (4)$$

где K – модуль всестороннего сжатия; G – модуль сдвига; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; K_{int} – интегральный показатель функции неоднородности плотности.

Программный комплекс «Камертон» включает в себя программное обеспечение, позволяющее регистрировать временные сигналы и анализировать спектральные сигналы, полученные с любого элемента технической системы. Однако в настоящий момент он не позволяет в автоматическом режиме производить оценку состояния рассматриваемых составляющих, подпадающих под исследование, поскольку в указанном комплексе не установлены границы изменения характеристик, связывающие техническое состояние и параметры, полученные в результате анализа.

Лабораторные исследования

Проведенные лабораторные исследования позволили определить основные амплитудно-частотные характеристики, при которых варьировались исследуемые параметры (расстояние между датчиками, количество датчиков, способ заделки трубы и др., рис. 1–3). Исходя из проведенных измерений была построена обобщенная матрица параметров.

Рис. 1. Лабораторные исследования образцов труб ТСК: а – способ крепления датчика на оболочке трубы; б – схема прохождения сигнала между датчиками (1–6)

Рис. 2. Особенности варьирования геометрических параметров – расстановки групп, типа и количества датчиков

a

б

Рис. 3. Проведение измерений характеристик труб разных производителей: *a* – установка датчиков на ПАТ; *б* – возбуждение механической волны

По результатам проведенных исследований рассматривались временные и спектральные сигналы, полученные при измерениях. Их сравнение представлено на рис. 4.

На основе анализа амплитудно-частотных характеристик установлено, что коэффициент сдвига частоты не зависит от длины исследуемого участка, а зависит от наличия дефекта (изменения плотности), коэффициент демпфирования существенно зависит от длины исследуемого участка трубопровода, следовательно, является основным показателем для определения

Рис. 4. Сравнение полученных спектральных сигналов: спектр первого (*a*) и второго (*б*) образца трубы ПАТ

работоспособности трубопровода в реальных условиях эксплуатации.

Таким образом, интегральный коэффициент оценки сплошности характеристик трубы связан с частотным анализом изменения сигнала (рис. 5–6).

Рис. 5. Изменение коэффициента демпфирования при ударе вблизи 1-го датчика: *a* – на максимальном; *б* – на минимальном расстоянии

Рис. 6. Изменение коэффициента демпфирования при ударе вблизи 3-го датчика:
а – на максимальном;
б – на минимальном расстоянии

На основе проведенных лабораторных исследований различных типоразмеров неметаллических труб, имеющих различные повреждения (и не имеющих таковых), получены следующие значения интегральных коэффициентов:

- несплошность материала 0,9–0,95;
- отслоения материала стенки 0,8–0,9;
- микротрещины 0,7–0,8;
- порыв в зависимости от размеров 0,3–0,5.

Полученные значения интегральных коэффициентов были внесены в специальную программу, которая позволяет автоматически рассчитывать и оценивать работоспособность трубопроводов.

Полевые исследования

Помимо лабораторных проведены полевые исследования технического состояния неметаллических трубопроводов (ТСК-130 и ПАТ-95), находящихся в эксплуатации ЦДНГ-5 ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ».

В исследованиях также применен волновой метод неразрушающего контроля (рис. 7–8).

Рис. 7. Схема применения волнового метода контроля трубопровода: 1 – трубопровод; 2 – прибор; 3–8 – места установки датчиков

а

б

Рис. 8. Прибор «Камертон» (а) и шурф стеклопластикового трубопровода (б)

Анализу подлежали временные сигналы, характеризующие амплитуды возбужденной волны, измеренной на оболочке трубопровода в открытом шурфе (см. рис. 8). Для выявления дефекта трубопровода важны условия прохождения волны в зоне дефекта (потери,

Рис. 9. Пример сигнала, пришедшего на принимающий датчик: *а* – сигнал в точке произведения импульсной нагрузки; *б* – сигнал в точке приемного датчика с расстоянием 100 м от точки приложения нагрузки

рассеивание, интерференция, дифракция), т.е. изменения спектров амплитудно-частотных характеристик трубопровода на исследуемом участке [14] (рис. 9–10).

Исследование изменений параметров труб в зависимости от типоразмеров позволило установить, как изменение характеристик с течением времени влияет на остаточную работоспособность.

Согласно схеме шурфования приводились расчетные значения (таблица) и сравнивались с ранее установленным (вычисленным) значением.

Величина затухания сигнала соответствует норме и близка к величине затухания в исправной трубе. Изменение амплитудно-частотных характеристик не достигло предель-

Рис. 10. Сдвиг частоты исследуемого участка трубопровода с 300 до 85 ГГц: *а* – исправная труба; *б* – труба с дефектом

ного уровня. Среднее значение показателя за срок эксплуатации составило 0,806; минимально допустимое – 0,6, таким образом, разница составляет 0,206. Это позволяет утверждать, что участок трубопровода в удовлетворительном состоянии.

Полученные расчеты были использованы для создания методики технической диагностики труб из неметаллических материалов с помощью волнового метода, которая позволяет без демонтажа конструкции оценить работоспособность труб, выполненных из неметаллических материалов [15].

Сопоставление расчетных значений с вычисленными

Номер измерения	Амплитудно-частотная характеристика	Интегральный коэффициент	Нормативное значение	Разница между амплитудно-частотной характеристикой и нормативным значением
1	0,8	0,4	0,6	0,2
2	0,9	0,4	0,6	0,3
3	0,74	0,3	0,6	0,14
4	0,81	0,4	0,6	0,21
5	0,78	0,3	0,6	0,18
Среднее	0,806	0,36	0,6	0,206

В ней приведены способы определения остаточного ресурса труб и рассмотрен порядок выполнения работ.

Методика технической диагностики труб из неметаллических материалов с помощью волнового метода включает в себя следующие этапы:

- порядок выполнения работ при оперативной диагностике, которая осуществляется в период действия гарантийных обязательств строительно-монтажного предприятия и срока службы трубопровода с целью выявления мест случайных повреждений и появления дефектов на потенциально опасных участках;
- комплексное диагностическое обследование (с использованием математического алгоритма расчета) трубопроводов, выполненных из неметаллических материалов, и их обвязок, осуществляемое после гарантийного срока службы трубопровода с целью определения остаточного ресурса;
- порядок проведения измерений амплитудно-частотных характеристик трубопровода и их анализ. На основе замеров получают основные характеристики исследуемого участка, оценка которых позволяет судить о состоянии всего участка трубопровода;
- заключение о техническом состоянии и возможности продления сроков эксплуатации трубопроводов из неметаллических материалов и их обвязок;
- описание правил техники безопасности.

В приложении к методике приведены следующие документы: Акт визуального контроля; Акт технического состояния по результатам оперативной диагностики; Отчет по результатам комплексной диагностики; форма Заключения о продлении срока эксплуатации.

Разработанная методика позволяет учесть важные характеристики, необходимые для оценки состояния труб.

Различные критерии оценки, разные используемые методы и объективные данные, полученные путем проведения тщательно спланированных экспериментов (лабораторные и полевые исследования), учтенные в разработанной методике, позволяют говорить о структурном подходе к оценке остаточной работоспособности труб, выполненных из неметаллических материалов.

Для прогнозирования технического состояния трубопровода была дополнена модель на основе решения задачи по оценке работоспособности трубопроводов из неметаллических материалов согласно алгоритмам экстраполяции. На основании теоретических расчетов была доработана процедурная модель прогнозирования (рис. 11).

Разработан алгоритм, который протестирован импульсной нагрузкой с варьированием величины амплитуды импульса по результатам исследования с помощью образца трубы ПАТ-140.

Рис. 11. Процедурная модель прогнозирования

Рис. 12. Сравнение физического и математического моделирования при импульсном приложении нагрузки: 1 – результаты математического моделирования; 2 – результаты физического моделирования, полученные при натурном эксперименте и нагружении образца

Время действия импульса составляло 0,1 с, амплитуда колебаний давления варьировалась от 4 до 8,5 МПа, среднее (рабочее) давление в образце трубы составляло 4 МПа (таким образом, максимальное давление в импульсе изменялось от 8 до 12,5 МПа). Сопоставление результатов физического и математического моделирования приведено на рис. 12.

На основе проделанной работы подтверждены зоны разрушения неметаллических труб в зависимости от условий приложения нагрузки (рис. 13).

Расчет основных характеристик позволяет отнести участок трубы к определенной зоне – переходной, зоне работоспособности и пр.

Заключение

1. Доработана математическая модель прохождения волнового фронта по многослойной конструкции трубопровода с учетом изменения скорости звука в материале и получены комплексные коэффициенты, связанные с нали-

Рис. 13. Зоны разрушения полимерных армированных труб в зависимости от условий приложения нагрузки:

A^*_{limit} – максимальная амплитуда;

v^*_{self} – собственная частота конструкции

чием определенного вида дефектов в трубопроводе.

2. Доработан волновой метод технической диагностики, учитывающий влияние различных дефектов и условий изменения комплексных коэффициентов при различных параметрах технологического процесса перекачки.

3. Благодаря экспериментальным исследованиям получены новые данные о влиянии на амплитудно-частотные характеристики таких параметров, как несплошность материала, возникающие отслоения, трещины и порывы, а также характеристика грунта и глубина залегания исследуемого трубопровода.

4. Экспериментально выявлены границы влияния дефектов на работоспособность трубопроводов.

5. Усовершенствован волновой метод оценки технического состояния трубопроводного транспорта из полимерных материалов в процессе его эксплуатации.

Список литературы

1. Analysis of pipe conveyor belt damaged by thermal wear / G. Fedorko, V. Molnar, M. Dovica, T. Toth, M. Kopas // Engineering Failure Analysis. – 2014. – № 4. – P. 41–48. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.06.016.
2. 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.
3. Rastorguev G.A. Monitoring and diagnostics of pipe components // Russian Engineering Research. – 2012. – 32 (7–8). – P. 539–543. DOI: 10.3103/S1068798X12060202.
4. Impacts of ambient and ablation plasmas on short- and ultrashort-pulse laser processing of surfaces / N.M. Bulgakova, A.N. Panchenko, V.P. Zhukov, T. Mocek, A.V. Bulgakov // Micromachines. – 2014. – 5 (4). – P. 1344–1372. DOI: 10.3390/mi5041344.
5. 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.
6. Потапов И.А. Акустические методы и средства неразрушающего контроля и дистанционной диагностики трубопроводов: дис. ... канд. техн. наук по спец. 05.02.11. – СПб., 2007. – 229 с.
7. Щелудяков А.М., Сальников А.Ф. Применение полимерно-армированного материала в трубопроводном транспорте // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2012. – № 2. – С. 158–166.
8. Фокин М.Ф., Никитина Е.А. Особенности оценки опасности труб магистральных трубопроводов с «расслоениями», обнаруживаемыми при внутритрубной диагностике // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2008. – № 2. – С. 75–79.
9. Исраилов М.Ш. Исследование установившихся волновых процессов в системе грунт–трубопровод при различных законах взаимодействия трубопровода с грунтом // Проблемы механики. – 2013. – № 3–4. – С. 36–40.

10. Щелудяков А.М., Сальников А.Ф. Разработка методики динамического нагружения в трубопроводах на полнотелых образцах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2010. – № 30. – С. 97–109.
11. Сыпачева Е.С., Сальников А.Ф. Математическая модель полиэтиленовых армированных труб // Молодежная наука Прикамья / Перм. гос. техн. ун-т, 2004 – № 4. – С. 68–72.
12. Щелудяков А.М., Сальников А.Ф., Дутлов О.А. Волновая диагностика трубопроводов из полимерно-армированных труб // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – Т. 1. – С. 254–258.
13. Сальников А.Ф., Сальников С.А., Щелудяков А.М. Оценка влияния динамических нагрузок на остаточную работоспособность полимерно-армированных труб // Газовая промышленность. – 2014. – № 1 (701). – С. 52–55.
14. Щелудяков А.М., Сальников А.Ф. Волновой метод технической диагностики трубопроводов из композиционных материалов в процессе их эксплуатации // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – Т. 1. – С. 379–384.
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 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2014. – № 4. – С. 126–137.

References

1. Fedorko G., Molnar V., Dovica M., Toth T., Kopas M. Analysis of pipe conveyor belt damaged by thermal wear. *Engineering Failure Analysis*, 2014, no. 4, pp. 41–48. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.06.016.
2. 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.
3. Rastorguev G.A. Monitoring and diagnostics of pipe components. *Russian Engineering Research*, 2012, 32 (7-8), pp. 539–543. DOI: 10.3103/S1068798X12060202.
4. Bulgakova N.M., Panchenko A.N., Zhukov V.P., Mocek T., Bulgakov A.V. Impacts of ambient and ablation plasmas on short- and ultrashort-pulse laser processing of surfaces. *Micromachines*, 2014, 5 (4), pp. 1344–1372. DOI: 10.3390/mi5041344.
5. 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.
6. Potapov I.A. Akusticheskie metody i sredstva nerazrushaiushchego kontrolya i dstantsionnoi diagnostiki truboprovodov [Acoustic methods and means of nondestructive testing and remote diagnostics of pipelines]: Thesis of PhD in Engineering on 05.02.11 program. Sankt-Peterburg, 2007. 229 p.
7. Shcheludiakov A.M., Saifnikov A.F. Primenenie polimerno-armirovannogo materiala v truboprovodnom transporte [The use of polymer-reinforced material in the pipeline transportation]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Transport. Transportnye sooruzheniia. Ekologiya*, 2012, no. 2, pp. 158–166.
8. Fokin M.F., Nikitina E.A. Osobennosti otsenki opasnosti trub magistral'nykh truboprovodov s «rassloeniiami», obnaruzhivaemykh pri vnutribiubnoi diagnostike [Features of risk assessment of main pipelines with layering detected during in-line inspection]. *Problemy mashinostroeniia i avtomatizatsii*, 2008, no. 2, pp. 75–79.
9. Israilov M.Sh. Issledovanie ustanovivshikhsia volnovykh protsessov v sisteme grunt-truboprovod pri razlichnykh zakonakh vzaimodeistviia truboprovoda s gruntom [The study of steady state wave processes in the ground-pipe system with the various relationship laws between pipelines and ground]. *Problemy mekhaniki*, 2013, no. 3-4, pp. 36–40.
10. Shcheludiakov A.M., Saifnikov A.F. Razrabotka metodiki dinamicheskogo nagruzheniia v truboprovodakh na polnotelykh obraztsakh [Development of a technique of dynamic loading in the pipeline at full-bodied samples]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaiia tekhnika*, 2010, no. 30, pp. 97–109.
11. Syapacheva E.S., Saifnikov A.F. matematicheskaiia model' polietilenovykh armirovannykh trub [Mathematical model of reinforced polyethylene pipes]. *Molodezhnaia nauka Prikam'ia*. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2004, no. 4, pp. 68–72.
12. Shcheludiakov A.M., Saifnikov A.F., Dutlov O.A. Volnovaia diagnostika truboprovodov iz polimerno-armirovannykh trub [Wave diagnostics of pipelines made of polymer-reinforced pipes]. *Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Perm': Izdatel'stvo Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2014, vol. 1, pp. 254–258.
13. Saifnikov A.F., Saifnikov S.A., Shcheludiakov A.M. Otsenka vliianiia dinamicheskikh nagruzok na ostatocnuuiu rabotosposobnost' polimerno-armirovannykh trub [Assessment of dynamic loads impact on residual work capacity of polymer-reinforced pipes]. *Gazovaiia promyshlennost'*, 2014, no. 1 (701), pp. 52–55.
14. Shcheludiakov A.M., Saifnikov A.F. Volnovoi metod tekhnicheskoi diagnostiki truboprovodov iz kompozitsionnykh materialov v protsesse ikh ekspluatatsii [Wave method of technical diagnostics of pipelines made of composite materials during its operation]. *Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Perm': Izdatel'stvo Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2013, vol. 1, pp. 379–384.
15. Shcheludiakov A.M., Saifnikov A.F., Shcheludiakov M.A., Saifnikov S.A. Transport truboprovodnyi. Problemy i podkhody k otsenke tekhnicheskogo sostoiianiia funktsioniruiushchikh truboprovodov s pomoshch'iu volnovogo metoda nerazrushaiushchego kontrolya [Pipeline transport. Problems and approaches to estimation of technical state of operated pipelines by wave non-destructive testing method]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Transport. Transportnye sooruzheniia. Ekologiya*, 2014, no. 4, pp. 126–137.

Об авторах

Щелудяков Алексей Михайлович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры автомобилей и технологических машин Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: sam@pstu.ru).

Сальников Алексей Федорович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры ракетно-космической техники и энергетических систем Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: Af_salnikov1@mail.ru).

About the authors

Aleksei M. Shcheludiakov (Perm, Russian Federation) – senior lecturer at the Department of Automobiles and Technological Machines of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29 Komsomolsky av.; e-mail: sam@pstu.ru).

Aleksei F. Salnikov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Engineering, Professor at the Department of Rocket and Space Machines and Power Systems of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29 Komsomolsky av.; e-mail: Af_salnikov1@mail.ru).

Получено 29.09.2015

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Щелудяков А.М., Сальников А.Ф. Совершенствование волнового метода оценки технического состояния трубопроводного транспорта из полимерных материалов в процессе его эксплуатации // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 17. – С. 63–71. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.17.7

Please cite this article in English as:

Shcheludiakov A.M., Salnikov A.F. Improvement of wave method for evaluation of technical state of polymer pipe during its operation. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2015, no. 17, pp. 63-71. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.17.7