

**А.М. Щелудяков, А.Ф. Сальников**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

**М.А. Щелудяков**

ООО «НПО „Эталон“», Пермь, Россия

**С.А. Сальников**

ОАО «Северо-Западные магистральные нефтепроводы,  
Пермь, Россия

## **ТРАНСПОРТ ТРУБОПРОВОДНЫЙ. ПРОБЛЕМЫ И ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ ТРУБОПРОВОДОВ С ПОМОЩЬЮ ВОЛНОВОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

Работоспособность трубопроводов в составе трубопроводного транспорта зависит от условий возникновения нагрузок и наличия дефектов в оболочке трубы при их эксплуатации. Накопление повреждений существенно снижает остаточный ресурс трубопроводов, рассчитанный по статическим нагрузкам. В статье представлен подход, основанный на волновом методе, в котором проводится анализ прохождения волны в широком частотном диапазоне по трубе. По структурному изменению волнового фронта, измеренного между двумя группами датчиков, расположенных на относительной длине друг от друга, осуществляется оценка технического состояния трубы. Кроме того, по градиентному изменению параметров волнового фронта алгоритм позволяет оценить остаточную работоспособность трубопровода.

**Ключевые слова:** транспорт трубопроводный, трубопровод, волновой метод, диагностика, дефект, остаточный ресурс.

**A.M. Shcheludiakov, A.F. Sal'nikov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**M.A. Shcheludiakov**

Ltd. "NPO "ETALON"", Perm, Russian Federation

**S.A. Sal'nikov**

OJSC "North-Western Trunk Pipelines", Perm, Russian Federation

## **TRANSPORT PIPELINE. PROBLEMS AND APPROACHES TO ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF PIPELINES OPERATED BY A WAVE NONDESTRUCTIVELY CONTROLLING METHOD**

The problem of efficiency pipeline composed of pipeline transport depends on the conditions of occurrence of loads and the presence of defects in the shell of the tube during their operation. Damage accumulation significantly reduces residual life of pipelines, designed to static loads. In this paper we present an algorithm based on the wave method, which provides an analysis of wave propagation in a wide frequency range of the pipe. While on the structural change of the wavefront measured between the two groups of sensors located on the relative length of each other is evaluation of the technical state of the pipe. In addition, the gradient change in the parameters of the wavefront algorithm allows to estimate the remaining amount of the pipeline.

**Keywords:** transport pipeline, pipeline, wave method, diagnosis, defect, remaining resource.

Трубопроводный транспорт является одним из важнейших элементов производственной инфраструктуры страны. Отказы в работе трубопроводов часто имеют достаточно серьезные технологические и техногенные последствия. Затраты на ликвидацию этих последствий варьируются от нескольких сотен тысяч рублей до сотен миллионов рублей. Поэтому обеспечение безопасности технологического процесса эксплуатации трубопроводов является актуальной задачей.

Одним из опасных с точки зрения эксплуатации трубопровода факторов являются динамические нагрузки [1]. Исследование законов влияния данного вида нагрузок на ресурс труб имеет важное научное значение.

Развитие технологии изготовления из полимерных материалов более сложных конструкций нашло применение в газовых сетях, в частности при изготовления труб из армированного стальной проволокой полимерного материала. Применение в проектировании новых конструкций полимерно-армированных труб (ПАТ) зависимостей, описы-

вающих основные прочностные характеристики используемого материала, учет при эксплуатации трубопровода параметра оценки технического состояния, определение значения рассматриваемого параметра, при превышении которого труба становится неработоспособной, определение динамики изменения параметра оценки технического состояния во времени и разработка расчета остаточного рабочего ресурса имеют огромное практическое значение [2].

Начало исследований ресурса полиэтиленовых труб положено в 1950-х гг. с момента активного промышленного использования данного типа трубопроводного транспорта. На сегодняшний день подробно исследованы режимы квазистатического нагружения трубы. Развиваются исследования динамических нагрузок, нестационарных режимов. Внимание исследователей привлекает также решение вопросов влияния динамических нагрузок на величину остаточного ресурса труб [3].

Одним из важных подходов к изучению влияния динамических нагрузок на величину остаточного ресурса полимерных армированных труб, используемых для транспортировки нефти и газа, является проведение натуральных экспериментов с целью выявления механических характеристик материала, применяемого при изготовлении ПАТ в условиях очень быстрого нагружения [4].

При использовании самых современных методик для распознавания дефектов не всегда представляется возможным определить степень их потенциальной опасности. Так, например, затруднена оценка дефекта как концентратора напряжений, не определяются изменения физико-механических свойств в связи со старением материала, напряжения в теле самой трубы и сохранение ее защитных свойств и др. Внутритрубная диагностика пока не в состоянии решить многие проблемы, связанные с эксплуатацией трубопроводов.

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

- магнитные (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 др.) и т.д.

Данные методы применяются при контроле различных дефектов, нарушения герметичности, контроле напряженного состояния, сварных соединений, протечек и других параметров, ответственных за эксплуатационную надежность трубопроводов. При этом методы контроля трубопроводов различного назначения (теплопроводов, газопроводов, нефтепроводов, продуктопроводов, водопроводов и др.) несущественно отличаются друг от друга.

В настоящий момент достаточно интенсивно используются трубопроводы, изготовленные из пластмасс и композитов, которые, обладая рядом преимуществ по сравнению с металлическими, имеют ряд недостатков. Основными из них являются высокая неоднородность физико-механических свойств и наличие дефектов «непроклея» и расслоений. Поэтому для данных трубопроводов также актуальна проблема их неразрушающего контроля и диагностики, особенно физико-механических свойств и указанных типов дефектов [5].



Рис. 1. Полимерно-армированная труба в разрезе (схема ячейки)

Конструктивный элемент полимерно-армированной трубы (ТУ 2248-005-54112451-04) представляет собой полый толстостенный цилиндр, состоящий из полиэтилена марок ПЭ-80, ПЭ-100, SPEX или полипропилена ПП-3 марки 23007-30Т, армированных сварным каркасом из стальной проволоки (ГОСТ 3282 или ГОСТ 2246). Армирование полиэтилена и полипропилена стальным каркасом проводится с целью повышения их прочностных характеристик. Изменение диаметра проволоки стального армирующего каркаса (2; 2,5; 3; 4 мм) и размера ячейки проволочного каркаса позволяет варьировать значения прочностных характеристик трубы в широких пределах (рис. 1). Внутри цилиндрического образца – сетка армирующего проволочного каркаса, сваренная во всех точках контакта осевых и кольцевых армирующих элементов точечной контактной сваркой. В настоящее время промыш-

ленно изготавливаются и введены в эксплуатацию ПАТ со следующими характеристиками:

- шаги намотки осевого и кольцевого элементов каркаса – 3,5–9 мм;
- диапазон диаметров – 90–400 мм;
- толщина стенки – 12,0–12,5 мм (при диаметре армирующей проволоки 3 мм).

В ходе анализа несущей способности конструктивных элементов трубопроводов из ПАТ при длительной эксплуатации фактор скорости приложения нагрузки является достаточно существенным. Это связано, во-первых, с тем, что для полимерных материалов, в отличие, например, от металлов, характерна сильная зависимость физико-механических и прочностных свойств от скорости приложения нагрузки. Во-вторых, при действии на конструкцию циклической нагрузки различной амплитуды и частоты изменяется предельное количество циклов нагружения, которое конструкция может выдержать без разрушения. Таким образом, оценка срока эксплуатации трубопроводов из полимерных армированных труб должна проводиться на основе анализа динамических нагрузок, возникающих в конкретной системе «трубопровод – столб жидкости» с учетом изменения прочностных свойств конструкции в зависимости от времени эксплуатации, т.е. от количества циклов нагружения при известных амплитудно-частотных характеристиках нагружающей системы.

Полимерные соединительные детали (ПАСД – ТУ 2248-005-54112451–04) изготавливаются из элементов полимерных армированных труб методом сварки встык. Соединительные детали (отводы) изготавливают с углами соединения 30, 45, 60 и 90°. Методом сварки встык изготавливаются равнопроходные тройники.

В настоящий момент разработана методика контроля технического состояния полимерных соединительных элементов. Данная методика реализована в рамках программного продукта «ПАТ-контроль» программного комплекса «Камертон».

В программном продукте реализован математический аппарат [6], 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:

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} = c_1 \left( \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} \right) + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} + c_2 \frac{\partial^2 u_z}{\partial r \partial z};$$

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} = c_1 \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial r} + c_2 \left( \frac{\partial^2 u_r}{\partial r \partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial z} \right),$$

где  $u$  – перемещения;  $ur$  – перемещения по радиусу;  $uz$  – перемещения по длине;  $r$  – координата радиуса;  $z$  – координата длины;  $c_1$  – радиальный коэффициент жесткости;  $c_2$  – осевой коэффициент жесткости.

Для оценки прочности элемента трубы может быть использован интегральный критерий прочности, полученный на основе соотношений. Для выполнения критерия прочности энергия формоизменения в сечении трубы должна быть меньше, чем потенциальная энергия связи в материале в этом же сечении:

$$U^f = 2\pi \int_{R_0}^R U_0^f dr;$$

$$U_0^f = \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right];$$

$$U^f < U_{lv}^f,$$

где  $U^f$  – энергия деформирования;  $U_0^f$  – энергия работы внутренних сил;  $\sigma$  – напряжения матрицы НДС.

Однако 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, а выявление повреждений трубопровода должно производиться с учетом изменения скорости звука в материале за счет:

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

С целью разработки алгоритмов для формирования программы-методики оценки технического состояния и расчета остаточного ресурса неметаллических трубопроводов проведены исследования волновых

процессов на стеклопластиковых и полимерно-армированных трубопроводах, находящихся в эксплуатации [7].

В исследованиях применен волновой метод неразрушающего контроля с целью анализа прохождения волны (в широком диапазоне частот) по конструкции трубопровода. Оценкой дефектности трубопровода являются условия прохождения волны в зоне дефекта (потери, рассеивание, интерференция, дифракция), т.е. изменение спектров амплитудно-частотных характеристик трубопровода на исследуемом участке [8].

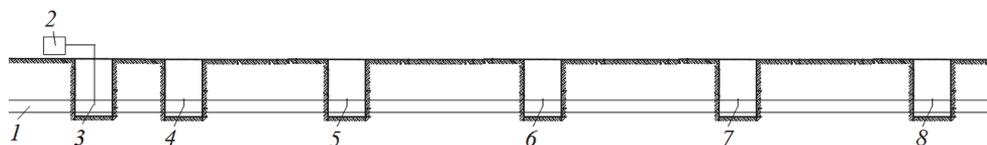


Рис. 2. Схема волнового метода контроля трубопровода: 1 – трубопровод; 2 – прибор; 3 – места установки датчиков

Датчики по радиусу трубопровода располагались в соответствии с рис. 3. На рис. 4–6 представлены шурфы и пример крепления датчиков на трубопроводе.

С целью возбуждения волны в трубопроводе наносился удар, при этом волна распространялась от первой группы датчиков ко второй (рис. 7). Регистрировались значения виброускорения, виброперемещения и виброскорости стенки трубопровода [9].

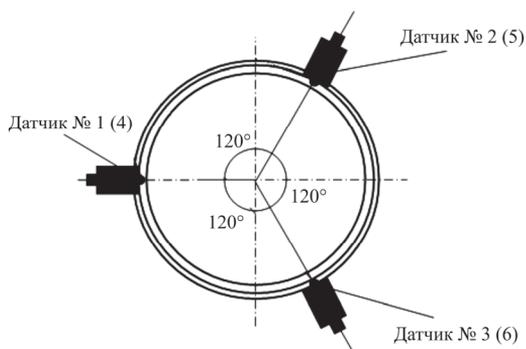


Рис. 3. Схема расположения датчиков по радиусу



Рис. 4. Место шурфования трубопровода

В дальнейшем сопоставлялись спектры, полученные при измерении первой группой датчиков, и спектры, полученные второй группой датчиков (рис. 8, 9).



Рис. 5. Пример крепления датчика на трубопроводе ТСК



Рис. 6. Шурф трубопровода ПАТ

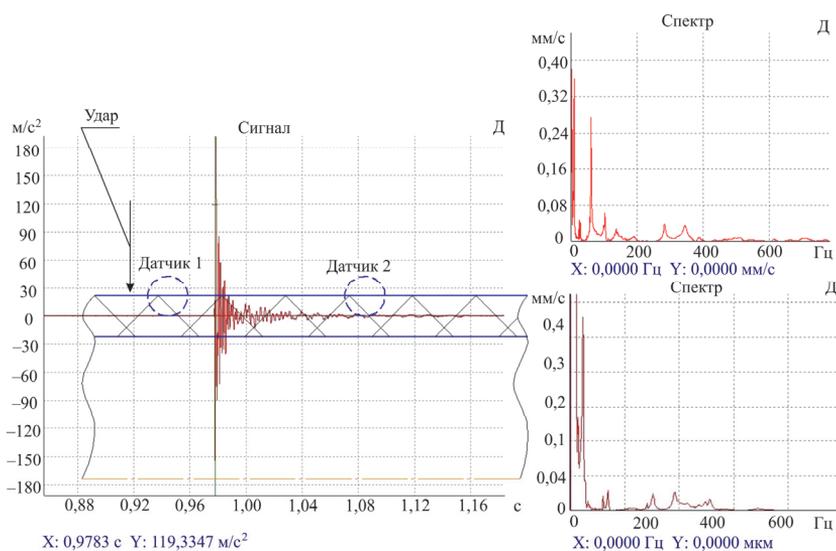


Рис. 7. Схема и результаты распространения волнового сигнала

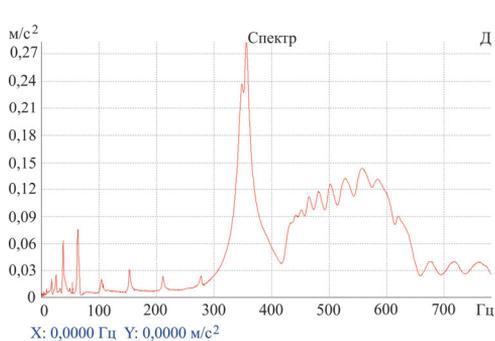


Рис. 8. Спектр виброскорости в шурфе № 1

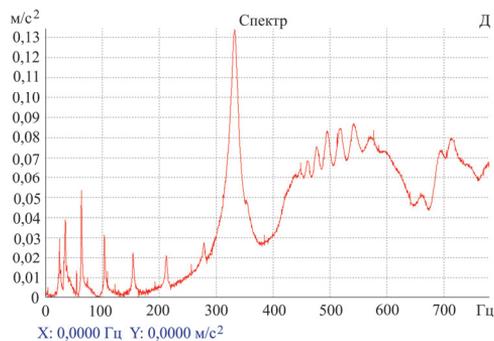


Рис. 9. Спектр виброскорости в шурфе № 2

По результатам анализа спектров на основе сравнения полученных амплитудно-частотных характеристик и нормативного значения интегрированного коэффициента, свидетельствующего о наличии дефекта в стенке трубопровода, в соответствии с разработанной методикой дается заключение о дальнейшей возможности (невозможности) эксплуатации исследуемого участка трубопровода.

### Список литературы

1. Сальников А.Ф., Нечаева Е.С., Аношкин А.Н. Экспериментально-теоретическое исследование работоспособности полимерных армированных труб // Газовая промышленность. – 2008. – № 3. – С. 88–91.
2. Сальников С.А., Нечаева Е.С., Сальников А.Ф. Управление технологическим процессом транспортировки рабочей среды с учетом остаточного ресурса трубопровода // Газовая промышленность. – 2009. – № 9. – С. 66–68.
3. 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.
4. 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.
5. Потапов И.А. Акустические методы и средства неразрушающего контроля и дистанционной диагностики трубопроводов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2007. – 24 с.
6. Сыпачева Е.С., Сальников А.Ф. математическая модель полиэтиленовых армированных труб // Молодежная наука Прикамья. – 2004. – № 4. – С. 68–72.
7. 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. гос. техн. ун-та, 2014. – Т. 1. – С. 254–258.
8. 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.

9. 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. гос. техн. ун-та, 2013. – Т. 1. – С. 379–384.

### References

1. Sal'nikov A.F., Nechaeva E.S., Anoshkin A.N. Eksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie rabotosposobnosti polimernykh armirovannykh trub [Experimental and theoretical investigation of performance polymeric reinforced pipes]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2008, no. 3, pp. 88-91.

2. Sal'nikov S.A., E.S. Nechaeva, Sal'nikov A.F. Upravlenie technologicheskim protsessom transportirovki rabochei sredy s uchetom ostatochnogo resursa truboprovoda [Process control fluid transport, taking into account the residual life of pipelines]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2009, no. 9, pp. 27-32.

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

4. Shcheludyakov A.M., Salnikov A.F. Razrabotka metodiki dinamicheskogo nagruzheniya v truboprovodah na polnotelykh obrazcah [Development 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.

5. Potapov I.A. Akusticheskie metody i sredstva nerazrushaiushchego kontrolya i distantsionnoi diagnostiki truboprovodov [Acoustic methods and means not destroying control and remote diagnostic of pipelines]. Thesis of Ph.D.'s degree dissertation, Saint Petersburg, 2007, 24 p.

6. Sypacheva E.S., Sal'nikov A.F. Matematicheskaiia model' polietilenovykh armirovannykh trub [Mathematical model of performance polyethylene reinforced pipes]. *Molodezhnaia nauka Prikam'ia*, 2004, no. 4. pp. 68-72.

7. Shcheludiakov A.M., Sal'nikov A.F., Dutlov O.A. Volnovaia diagnostika truboprovodov iz polimerno-armirovannykh trub [Wave diagnostics of pipelines made of polymer-reinforced pipes]. *Materialy mezhdunarodnoi*

*nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse"*. Perm: Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2014, vol. 1, pp. 254-258.

8. Sal'nikov A.F., Sal'nikov S.A., Shcheludiakov A.M. Otsenka vlianiia dinamicheskikh nagruzok na ostatochnuiu rabotosposobnost' poli-merno-armirovannykh trub [Assessment of dynamic loads on the remaining amount of the polymer-reinforced pipes]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2014, no. 1 (701), pp. 52-55.

9. Shcheludiakov A.M., Sal'nikov A.F. Volnovoi metod tekhnicheskoi diagnostiki truboprovodov iz kompozitsionnykh materialov v protsesse ikh ekspluatatsii [Wave methods of technical diagnostics of pipelines of composite materials during their operation]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse"*. Perm: Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2013, vol. 1, pp. 379-384.

Получено 4.12.2014

### **Об авторах**

**Щелудяков Алексей Михайлович** (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Автомобили и технологические машины» автомобильного факультета, аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» аэрокосмического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: sheludya-kov\_am@mail.ru).

**Сальников Алексей Федорович** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: afsalnikov\_1@mail.ru).

**Щелудяков Михаил Александрович** (Пермь, Россия) – ООО «НПО "ЭТАЛОН"», e-mail: sma\_tes@mail.ru.

**Сальников Семен Алексеевич** (Пермь, Россия) – главный метролог Пермского районного нефтепроводного управления (ПРНУ), ОАО «Северо-Западные магистральные нефтепроводы» (614065, г. Пермь, ул. Мира, 115а, e-mail: afsalnikov\_1@mail.ru).

### **About the authors**

**Shcheludiakov Aleksei Mikhailovich** (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Cars and Technological Machines, Road Faculty, Postgraduate student, Department of Rocket-Space Technology and Energy Systems, Aerospace Faculty, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: sheludyakov\_am@mail.ru).

**Sal'nikov Aleksei Fedorovich** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Rocket-Space Technology and Energy Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: afsalnikov\_1@mail.ru).

**Shcheludiakov Mikhail Aleksandrovich** (Perm, Russian Federation) – LLC “NPO “ETALON”, e-mail: sma\_tes@mail.ru.

**Sal'nikov Semen Alekseevich** (Perm, Russian Federation) – Chief metrologist, Perm Regional Oil Pipeline Governance, JSC “North-Western Trunk Pipelines” (115a, Mir st., Perm, 614065, Russian Federation, e-mail: afsalnikov\_1@mail.ru).