УДК 621.644.07

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ УПРУГОЙ ЛИНИИ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА СПЛАЙНОМ 3-Й СТЕПЕНИ

RELIABILITY ESTIMATION OF MATHEMATICAL DESCRIPTION OF MAIN GAS PIPELINE TOUGH LINE WITH 3RD DEGREE SPLINE

С. А. Лазарев, С. А. Пульников, Ю. С. Сысоев, Н. В. Казакова
S. A. Lazarev, S. A. Pulnikov, Yu. S. Sysoev, N. V. Kazakova

ООО «Газпром трансгаз Сургут», г. Сургут
Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Ключевые слова: мониторинг деформаций, газотранспортная система; линейная часть; техническое состояние; геокриологические процессы; геотехническая система
Key words: deformation monitoring; gas-transport system; lineal part; technical condition; geocryological processes; geotechnical system

Развитию технологий мониторинга пространственного положения трубопроводов последние 5 лет уделено особое внимание. Прорыв в микропроцессорной и компьютерной технике обусловил создание устройств, способных сегодня регистрировать изменение пространственного положения конструкций, включая подземные, с точностью, измеряемой в миллиметрах. С появлением подходящей элементной базы, позволяющей создавать комплексные системы мониторинга пространственного положения подземных протяженных объектов, многими компаниями уже созданы первые опытные разработки, которые проходят испытания на действующих системах магистральных газопроводов.

Сегодня накопленный опыт эксплуатации газопроводов ПАО «Газпром» позволяет утверждать, что достоверность ранних расчетных методик в направлениях оценки и обеспечения устойчивости и прогнозировании пространственного положения линейной части обеспечена только для узкого круга типовых задач проектирования. Для применения в сложных инженерно-геологических условиях, где в натурных условиях эксплуатации подземный газопровод фактически не имеет строго прямолинейных и защемленных участков, подобный подход неприемлем. Современные технологии проектирования, сооружения, комплексного диагностирования и визуализации информации также диктуют необходимость перехода к оперированию и представлению сложных систем газотранспортной сети в качестве единого целого, с привязкой всех данных о структурных элементах к единым координатам общей геоинформационной базы [1].

Для того чтобы соответствовать современным трендам методического и технологического развития способов строительства и диагностирования МГ, первым требованием, предъявляемым к системам мониторинга пространственного положения, является функциональная применимость на участках любой протяженности, обусловливаемая экономической эффективностью (соотношение количества применяемых структурных элементов системы мониторинга, средств измерений) на единицу длины газопровода и режим работы системы (периодичность измерений) по капитальным затратам должны окупаться внутри заданного периода эксплуатации диагностируемого участка и досто-

верностью получаемых результатов (технически и методически система мониторинга должна быть обеспечена таким образом, чтобы параметры протяженности и конфигурации диагностируемого участка не оказывали решающего влияния на точность определения линии пространственного положения газопровода, а их соотношение оставалась постоянным по длине).

Нормативной документацией по оценке технического состояния ПАО «Газпром» к системам мониторинга пространственного положения газопроводов установлены определенные требования [2].

1. Требования по технологической универсальности. Конструктивно системы мониторинга должны быть приспособлены к применению на любых структурных элементах газопровода и инженерно-геологических условиях, в том числе на участках:

- проложенных в сильнольдистых и пучинистых грунтах;
- пересекающих границы талых и вечномерзлых грунтов;
- на косогорах с льдонасыщенными грунтами и оползневых участках;
- на пересечениях селевых потоков и на подрабатываемых территориях;
- с воздушными и подводными переходами;
- пересечений с другими трубопроводами и коммуникациями;
- переходов под железными и автомобильными дорогами;
- содержащих крановые узлы, компенсаторы, отводы и др.

2. Требования по фиксируемым процессам. Система мониторинга пространственного положения должна быть способна регистрировать просадки и выпучивания конструктивных элементов линейной части; деформации участков в вертикальной и горизонтальной плоскости; продольные перемещения на прямолинейных и криволинейных участках.

3. Требования по методическому обеспечению. Система мониторинга обеспечивается методикой оценки технического состояния, содержащей метод обработки результатов мониторинга для получения линии пространственного положения диагностируемого участка; параметры оценки изменения пространственного положения диагностируемых участков газопроводов; классификацию категорий технических состояний по критерию пространственного положения, основанных на значениях заданных параметров оценки.

Наиболее технически совершенными, испытанными и соответствующими установленным требованиям по экономической эффективности и достоверности результатов являются системы мониторинга пространственного положения, позволяющие независимо от производственных условий и конструктивных особенностей регистрировать координаты жестко зафиксированных точек или элементов трубопровода. На магистральных трубопроводах газотранспортной системы ПАО «Газпром» применяются системы мониторинга пространственного положения как «внутреннего», так и «внешнего» способа регистрации координат. «Внутренний» способ реализуется с помощью применения внутритрубных снарядов, снабженных особыми измерительно-диагностическими и геолокационными модулями, позволяющими в выбранной системе отсчета регистрировать пространственные координаты (x, y, z) маркеров (геодезических марок), устанавливаемых непосредственно на трубопровод, или конструктивных элементов линейной части (стыков секций труб, опор, хомутов, запорной арматуры, отводов и др.) [3, 4].

«Внешний» способ реализуется в двух направлениях:

- на основе совмещения результатов съемки положения трубопровода, полученных с помощью приборов-трассоискателей (для получения высотных координат z маркеров) и технологий GPS-навигации и магнитной локации (для получения координат маркеров в плане x, y и привязки их к высотным z);
- на основе технологии тахеометрической съемки геодезических маркеров, жестко закрепленных на линейной части, планово-высотное положение которых (x, y, z) регистрируется и отождествляется с фиксированной точкой на поверхности трубопровода, как правило, расположенной на его верхней образующей.

С учетом указанных технических и технологических особенностей применяемых в ПАО «Газпром» систем мониторинга пространственного положения для получения

параметров оценки его изменения необходимо на первом этапе разработать математическую модель кривой трубопровода, где в качестве исходных данных используется набор координат x, y, z маркеров (точек), располагаемых вдоль трубопровода. При этом по методическим требованиям современной теории комплексного диагностирования протяженных объектов точность расчета положения пространственно-временной кривой не должна обусловливаться длиной диагностируемого участка трубопровода, его конструктивными особенностями (конфигурацией) или способом регистрации координат маркеров. Разработка математической модели кривой положения трубопровода, обладающей вышеуказанными особенностями, привнесет ряд преимуществ в сравнении с традиционными способами описания линии пространственного положения, применяемыми на практике в настоящее время [5, 6].

Для реализации модели пространственно-временной кривой положения трубопровода авторами предлагается способ, основанный на теории сплайнов. Искомая кривая отождествляется с линией верхней образующей трубопровода, положение которой описывается в виде радиус вектора с координатами, аппроксимированными с помощью кубического сглаживающего сплайна относительно заданного количества измеряемых точек (геодезических маркеров).

Применение сплайна обусловлено необходимостью проведения процедуры сглаживания ошибок, вносимых в результаты расчета погрешностью измерительных средств, которыми реализуется регистрация пространственных координат. Степень сплайна обусловлена свойством, связывающим кубические сплайны с решением вариационной задачи о минимуме квадратичного функционала потенциальной энергии изгиба упругого стержня

$$\Phi\left(w\right)=\alpha\int_{0}^{s_{max}}\left[w^{"}(s)\right]^{2}ds+\sum_{i=0}^{i=n}p_{i}\left(w\left(i\right)-\overline{w}_{i}\right)^{2},\qquad(1)$$

где *w(i)* — искомое аналитическое описание соответствующей координаты *i*-й точки (*x*, *y* или *z*); p_i — набор множителей, обусловливающих значимость и «вес» точки в процессе построения кривой; *w(s)* — искомая функция параметра *s*, используемого для описания зависимости соответствующей координаты; w_i — измеренные с контролируемой ошибкой значения координат соответствующей точки (*x*, *y* или *z*).

Жестко закрепленные на трубопроводе геодезические маркеры физически отождествляются в пространстве и времени с постоянными точками на верхней образующей поэтому номер измеряемой точки (маркера) может быть использован в качестве Лагранжевой координаты для описания и сравнения положения трубопровода в пространстве.

На основании вышеизложенного сформулирован порядок построения сглаживающего сплайна, описывающего положение верхней образующей трубопровода в заданный момент времени, состоящий из двух шагов.

1. Первый шаг характеризуется приведением значений всех измеренных координат точек к значениям, соответствующим единому моменту времени, что решает задачу исполнимости программы мониторинга на МГ, где в силу производственных или инженерно-геологических условий невозможно обеспечить постоянную скорость, строгую последовательность или равную периодичность между сериями измерений. Определяются координаты *x*, *y*, *z* для любой точки в произвольно задаваемый момент времени *t*, то есть на данном этапе становится известен радиус-вектор для всех измеряемых точек

$$\vec{r}_k\left(t\right)=\left(x_k\left(t\right),y_k\left(t\right),z_k\left(t\right)\right).\qquad(2)$$

2. Второй шаг характеризуется построением пространственно-временной линии верхней образующей диагностируемого трубопровода. Получив на шаге приведения результатов мониторинга к единому времени набор координат $r_k(t)$, порядок построения сглаживающего сплайна для $k = 0,1,\ldots,n$, где $n + 1$ — число измеряемых точек на наблюдаемом участке трубопровода, будет предполагать последовательность:

1) Выявляется закладываемая в исходные данные ошибка измерений σ_{exp}.

2) Проводится построение нормированных переменных

$$\tilde{x}_k(t) = \frac{x_i(t) - x_0(t)}{x_{max}(t)},\ \tilde{y}_k(t) = \frac{y_i(t) - y_0(t)}{y_{max}(t)},\ \tilde{z}_k(t) = \frac{z_i(t) - z(t)}{z_{max}(t)}. \quad (4)$$

3) На основе подбора параметра сглаживания для каждой из координат проводится построение сглаживающего сплайна.

В результате выполнения приведенной последовательности было получено аналитическое описание пространственно-временной линии положения верхней образующей диагностируемого трубопровода

$$\tilde{w}(t) = \varphi_w(s_k) \to w(t) = w_0 + w_{max}\varphi_w\left(\frac{k}{n}\right). \quad (5)$$

Зависимость (5) позволяет описывать пространственно-временное положение верхней образующей трубопровода неограниченной протяженности в любых производственных условиях без строгих требований к периодичности и способам регистрации данных. На втором этапе исследования разработан способ сравнения пространственного положения трубопровода в разные периоды мониторинга для получения оценочных параметров. Представление верхней образующей трубопровода в виде кубического пространственно-временного сплайна позволяет получить выражения для оценки общей протяженности диагностируемого участка в произвольный момент времени, длины любого его отрезка между измеряемыми точками и изменений формы кривой в пространстве. Длина кривой в *i*-м сечении для заданного момента времени *t* равна

$$l_i(t) = \int_0^{i/n} \sqrt{\left(x_k'\right)^2 + \left(y_k'\right)^2 + \left(z_k'\right)^2}\, dk, \quad (6)$$

где

$$x(k,t) = x_0 + x_{max}\varphi_x\left(\frac{k}{n}\right) \to x_k'(k,t) = \frac{x_{max}}{n}\varphi_x'\left(\frac{k}{n}\right). \quad (7)$$

Полученные аналитические выражения, используемые для описания поведения пространственно-временной кривой верхней образующей трубопровода, позволяют в произвольный момент времени оценивать изменения положения каждого отдельного сечения трубопровода и получать целиком его форму.

Для описания формы верхней образующей участка трубопровода в заданный момент времени *t* ее точка представлена в виде радиус-вектора

$$\vec{r}(k,t) = \left(x(k,t), y(k,t), z(k,t)\right), \quad (8)$$

где ее положение определяется числом $k = [0; n]$, совпадающим с номером точки (первая измеряемая точка $k = 0$; последняя $k = n$) (рис. 1).

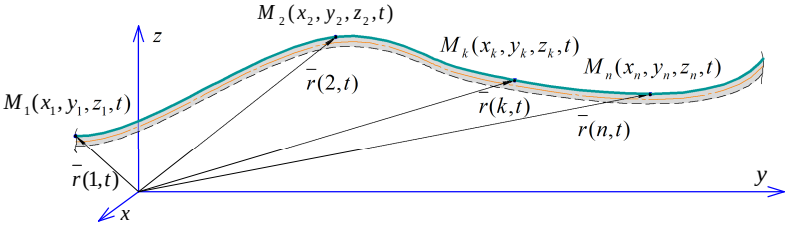


Рис. 1. ***Пространственно-временная кривая верхней образующей, полученная по точкам, представленным в виде радиус-вектора***

Получены выражения для практического определения параметров оценки изменения пространственного положения, наиболее полно характеризующих деформации трубопровода во времени.

1. Изменение абсолютной длины диагностируемого участка трубопровода во времени

$$l_i(t) = \int_0^i \left|\vec{r}'_k(k,t)\right| dk = \int_0^i \sqrt{\left(x'_k\right)^2 + \left(y'_k\right)^2 + \left(z'_k\right)^2}\, dk\,, \tag{9}$$

где i — параметр, определяющий положения точки на кривой; при t = const рассчитывается абсолютная длина кривой в заданный момент времени.

2. Абсолютное удлинение диагностируемого участка трубопровода

$$\Delta l_i = l_i(t) - l_i(t_0)\,, \tag{10}$$

где t_0 — момент времени, соответствующий начальному положению кривой, а t — момент времени, соответствующий положению кривой, которое необходимо сравнить с базовым.

3. Продольное перемещение заданных точек трубопровода. Оценивается по отношению к аналогичным точкам начального положения кривой в момент времени t_0

$$\Delta l_{np} = (\vec{\delta}, \vec{\tau})\,, \tag{11}$$

где τ — единичный касательный вектор к базовой кривой для заданного сечения k (рис. 2)

$$\vec{\tau} = \vec{r}'_k(k,t_0) \Big/ \left|\vec{r}'_k(k,t_0)\right|. \tag{12}$$

4. Поперечное перемещение заданных точек трубопровода. Оценивается по отношению к аналогичным точкам начального положения кривой в момент времени t_0

$$\Delta l_{npp} = (\vec{\delta}, \vec{n})\,, \tag{13}$$

где n — единичный вектор, перпендикулярный к базовой кривой для сечения k (рис. 2)

$$\vec{n} = \frac{\vec{r}''_{kk}(k,t_0)}{\left|\vec{r}''_{kk}(k,t_0)\right|}\,. \tag{14}$$

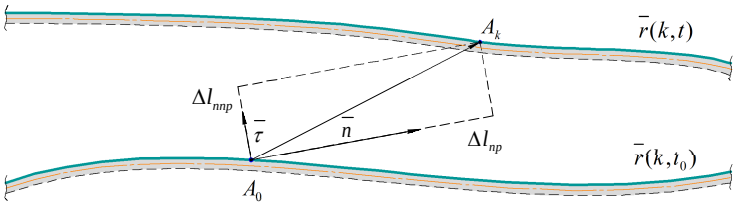


Рис. 2. ***Схема оценки поперечных и продольных перемещений точек диагностируемого трубопровода***

Для подтверждения достоверности предлагаемых зависимостей выполнено решение проверочной задачи с оценкой погрешности расчета положения верхней образующей и параметров оценки изменения пространственного положения трубопровода. Для оценки искомых погрешностей применен метод, основанный на сравнении особенностей изменения положения пространственно-временных кривых предварительно известной функции, построенных по координатам точек, задаваемых двумя способами: истинно (без погрешности) и с заданной погрешностью.

В проверочной задаче для аппроксимации положения линии верхней образующей трубопровода во времени и пространстве использована функция, имеющая вид кривой, составленной из отрезков парабол с вершинами по оси OY и периодом $4l$

$$z_s(x) = \sin\left(\frac{\pi x}{2l}\right). \tag{15}$$

В проверочной задаче исходные данные для построения базового положения кривой верхней образующей трубопровода были подобраны таким образом, чтобы имитировать масштаб и производственные условия функционирования действующей системы мониторинга пространственного положения. Проведена оценка искомых погрешностей для участка трубопровода длиной 3 км, кривая пространственного положения

которого имеет заданную форму согласно функции (15) и проходит через 15 точек, расположенных с шагом 200 м, координаты которых последовательно регистрировались с помощью 12-ти серий измерений в течение 450 часов с погрешностью σ_{exp} = 0,1 м.

1. Оценка погрешности расчета удлинения кривой верхней образующей $\sigma_{\Delta l}$.

Оценка проведена методом сопоставления результатов расчета удлинений кривой, полученной по координатам, измеренным с заданной ошибкой, и кривой, полученной по координатам, измеренным без ошибки. Результаты приведены на рисунке 3.

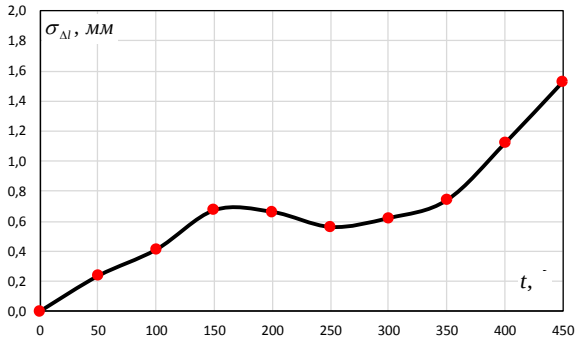


Рис. 3. ***Зависимость изменения погрешности расчета удлинения кривой вер хней образующей $\sigma_{\Delta l}$ от момента времени измерения t***

В заданном интервале наблюдений погрешность расчета $\sigma_{\Delta l}$ изменяется в пределах 0,1–1,5 мм. Максимальная погрешность 1,5 мм зафиксирована в последней серии измерений при t = 450 ч; минимальная 0,1 мм — во второй серии измерений при t = 15 ч (см. рис. 3).

3. Оценка погрешности расчета продольных смещений точек кривой $\sigma_{\Delta lnp}$.

Оценка проведена сопоставлением результатов расчета смещений точек кривой, полученной по координатам, измеренным с заданной ошибкой, и кривой, полученной по координатам, измеренным без ошибки. Результаты оценки приведены на рисунке 4.

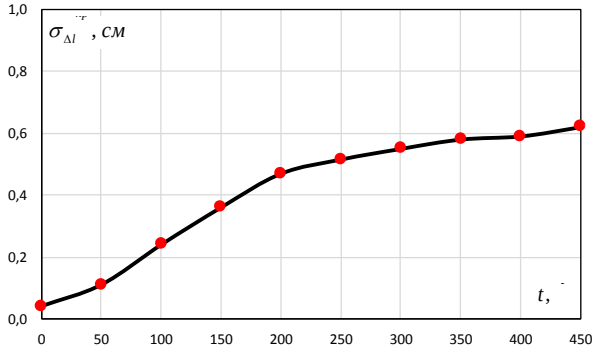


Рис. 4. ***Зависимость изменения погрешности расчета продольных смещений точек кривой верхней образующей $\sigma_{\Delta lnp}$ от момента времени измерения t***

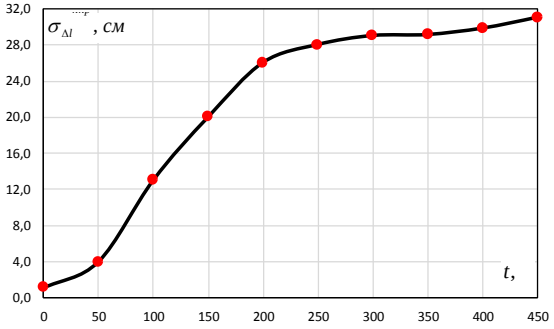
В заданном интервале наблюдений погрешность расчета продольных смещений точек кривой $\sigma_{\Delta lnp}$ изменяется в пределах 0,1–0,6 см. Максимальная погрешность 0,6 см зафиксирована в последней серии измерений при t = 450 ч; минимальная 0,1 см — во второй серии измерений при t = 15 ч (рис. 5).

4. Оценка погрешности расчета поперечных смещений точек кривой $\sigma_{\Delta lnnp}$.

Результаты оценки приведены на рисунке 5.

В заданном интервале наблюдений погрешность расчета поперечных смещений точек кривой $\sigma_{\Delta lnnp}$ изменяется в пределах 0,1–31,8 см. Максимальная погрешность 31,8 см зафиксирована в последней серии измерений при t = 450 ч; минимальная 0,1 см — во второй серии при t = 15 ч (см. рис. 5).

Рис. 5. ***Зависимость изменения погрешности расчета поперечных смещений точек кривой верхней образующей $\sigma_{\Delta lпр}$ от момента времени измерения t***



Таким образом, при заданных начальных условиях проверочной задачи (приближенных к натурным) при проведении оценки искомых погрешностей выявлено:

- Погрешность расчета удлинения участка трубопровода при сравнении его пространственного положения в произвольный момент времени относительно первоначального характеризуется как «миллиметровая» (не превышает 10 мм): постепенно увеличивается с увеличением количества серий измерений; постепенно увеличивается с увеличением протяженности наблюдаемого участка; не зависит от конфигурации участка.
- Погрешность расчета продольных перемещений точек участка трубопровода при сравнении его пространственного положения в произвольный момент времени относительно первоначального характеризуется как «сантиметровая» (не превышает 10 см): постепенно увеличивается с увеличением количества серий измерений координат точек; постоянна по длине в узком диапазоне и не зависит от протяженности участка наблюдений; не зависит от конфигурации участка.
- Погрешность расчета поперечных перемещений точек участка трубопровода при сравнении его пространственного положения в произвольный момент времени относительно первоначального характеризуется как «дециметровая» (не превышает 1 м): интенсивно увеличивается с увеличением количества серий измерений координат точек; постоянна по длине в широком диапазоне и не зависит от протяженности участка наблюдений; не зависит от конфигурации участка. При расчете поперечных перемещений «дециметровая» погрешность обусловлена необходимостью вычисления второй производной по параметру x_p (14) для кривой трубопровода, описываемой сплайном третьей степени, что не позволяется получить точность, удовлетворяющей требованиям «сантиметровой». Однако при этом остается возможность точного определения сечения участка трубопровода, которое подвержено поперечным перемещениям, что является дополнительным сигнализатором при контроле его пространственного положения.

Таким образом, для рассматриваемых производственных условий и систем мониторинга пространственного положения трубопроводов, применяемых в ПАО «Газпром» и построенных на основе геодезических сетей и измерительных приборов I–IV класса точности, выявлено, что точность расчета указанных величин достаточна. Авторами рекомендовано применение удлинения Δl, продольного $\Delta l_{пр}$ и поперечного $\Delta l_{ппр}$ перемещений в качестве параметров оценки изменения пространственного положения участков трубопровода.

Список литературы

1. Лазарев С. А., Пульников С. А., Сысоев Ю. С. Диагностирование протяженных пространственно-деформируемых участков магистральных газопроводов в системе управления техническим состоянием и целостностью ПАО «Газпром» // Территория Нефтегаз. – 2016. – № 4. – С. 106-115.

2. Р Газпром 2-2.3-691-2013. Методика формирования программ технического диагностирования и ремонта объектов линейной части магистральных газопроводов ЕСГ ОАО «Газпром».

3. Карнаухов М. Ю., Лазарев С. А., Пульников С. А., Сысоев Ю. С. Исследование процесса формирования эксплуатационного положения протяженных участков МГ Уренгой — Челябинск в сложных гидрогеологических условиях // Газовая промышленность. – 2015. – № S (724). – С. 53-58.

4. Пульников С. А., Сысоев Ю. С., Карнаухов М. Ю., Лазарев С. А. Проблемы внедрения систем геотехнического мониторинга на объектах газотранспортной системы ОАО «Газпром» // Геотехника. – 2014. – № 5. – С. 77-83.

5. Алескерова З. Ш., Пульников С. А., Сысоев Ю. С., Казакова Н. В. Оценка эффективности геотехнического мониторинга магистральных газопроводов по качеству продуцируемой информации // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2015. – № 3. – С. 81-86.

6. Марков Е. В., Пульников С. А., Сысоев Ю. С. Анализ типовых методик расчета глубины протаивания вечномерзлых грунтов под трубопроводами // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – С. 142.

Сведения об авторах

Лазарев Сергей Анатольевич, *начальник производственного отдела по эксплуатации магистральных газопроводов и газораспределительных станций, ООО «Газпром трансгаз Сургут», г. Сургут, тел.:+73462750233, e-mail: LazarevS@surgut.gazprom.ru*

Пульников Сергей Александрович*, к. т. н., доцент кафедры «Транспортные и технологические системы», Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, председатель Тюменского регионального отделения Российского общества по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению, г. Москва, тел. 8(3452)979880, e-mail: pulnikov@tsogu.ru*

Сысоев Юрий Сергеевич*, к. т. н., доцент кафедры «Транспортные и технологические системы», Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 89058204010, e-mail: sysoev4010@mail.ru*

Казакова Наталья Владимировна*, к. т. н., доцент кафедры «Транспортные и технологические системы», Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)205028, e-mail: docentmg@yandex.ru*

Information about the authors

Lazarev S. A., *department head of main gas pipelines and gas distribution stations operation, Ltd. «Gazprom transgas Surgut», Surgut, tel.+73462750233, e-mail: LazarevSA@surgut.gazprom.ru*

Pulnikov S. A*., Candidate of Science in Engineering, associate professor of the chair «Transport and Technological systems», Industrial University of Tyumen, Tyumen, Chairman of the Tyumen regional office of the Russian society on soil mechanics, geotechnics and foundation engineering, Moscow, tel. +8(3452)979880, e-mail: pulnikov@tsogu.ru*

Sysoyev Yu. S., *Candidate of Science in Engineering, associate professor of the chair «Transport and Technological systems», Industrial University of Tyumen, Tyumen, phone: 89058204010, e-mail: sysoev4010@mail.ru*

Kazakova N. V., *Candidate of Science in Engineering, associate professor of the chair «Transport and Technological systems», Industrial University of Tyumen, Tyumen, phone: 8(3452)205028, e-mail: docentmg@yandex.ru*