ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВИЗНЫ ОСИ ТРУБОПРОВОДА МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ И СГЛАЖИВАНИЯ ДАННЫХ ПЛАНОВЫХ И ВЫСОТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ, ОСНОВАННОГО НА ИХ МНОГОКРАТНОМ ОСРЕДНЕНИИ

DETERMINATION OF THE PIPELINE AXIS CURVATURE BY THE METHOD OF NUMERICAL DIFFERENTIATION AND SMOOTHING OF THE PLANNED AND HEIGHT MEASUREMENT DATA BASED ON THEIR REPEATED AVERAGING

Е. Л. Муравин
Evgeny L. Muravin

Обособленное
подразделение Подольск,
г. Подольск,
Российская Федерация

Separate Unit Podolsk,
Podolsk, Russian Federation

Т. Е. Стенина
Tatyana E. Stenina

Обособленное
подразделение Подольск,
г. Подольск,
Российская Федерация

Separate Unit Podolsk,
Podolsk, Russian Federation

Важнейшее практическое значение для обеспечения эксплуатационной надежности и промышленной безопасности магистральных трубопроводов (МТ), особенно работающих в особых природно-климатических зонах, в горных или геокриологических условиях, вызывающих изгибное деформирование МТ, имеет адекватная оценка их фактического напряженно-деформированного состояния (НДС) с целью выявления потенциально опасных участков (ПОУ) и оценки их технического состояния. В качестве контролируемого параметра, характеризующего уровень НДС трубопроводных участков МТ в процессе эксплуатации, удобно и достаточно рассматривать кривизну оси трубопровода. Поэтому проблема определения фактической истинной кривизны оси трубопровода и местоположений максимальных значений кривизны по трассе МТ входит в число первоочередных актуальных методических проблем.

Опыт применения «Инструкции по определению по данным геодезической съемки фактического напряженно-деформированного состояния участков газопроводов, расположенных на территориях с опасными геодинамическими процессами и оценки их работоспособности», нормативного документа, действующего в ПАО «Газпром», показывает, что оценки кривизны оси трубопровода, основанные на аппроксимации данных плановых и высотных измерений положения оси интерполяционными полиномами 4-го порядка, весьма чувствительны к данным измерений, выбранному для аппроксимации трубопроводному участку, его длине и т.д. Указанные обстоятельства обуславливают необходимость разработки адекватных методик определения кривизны оси трубопровода, в которых истинная форма оси заранее не задается.

Предложенный в статье метод численного дифференцирования и сглаживания данных плановых и высотных измерений положения оси трубопровода позволяет эффективно получать достоверные распределения кривизны оси трубопровода на участках большой протяженности при наличии существенных погрешностей в данных измерений и, соответственно, адекватно выявлять ПОУ и оценивать техническое состояние трубопровода по уровню НДС. Приведен пример реализации данного метода для мониторинга НДС участка магистрального газопровода, расположенного на оползнеопасном горном склоне. Результаты, получаемые данным методом, могут использоваться для верификации расчетных оценок распределения

Ключевые слова

магистральный трубопровод;
деформирование с изгибом;
потенциально опасный участок;
расчеты; кривизна оси;
плановые и высотные измерения;
численное дифференцирование;
погрешность измерения;
сглаживание данных измерения

кривизны оси трубопровода, получаемые другими методами, например методами, аппроксимирующими непосредственно данные плановых и высотных измерений положения оси разложениями по ортогональным системам функций.

The most important practical value for ensuring the operational reliability and industrial safety of trunk pipelines (TP), especially those operating in special climatic zones, in mountainous or geocryological conditions that cause TP bending, is adequate assessment of their actual stress-strain state (SSS) in order to identify potentially hazardous areas (PHA) and estimate their technical condition. It is convenient and sufficient to consider pipeline axis curvature as a controlled parameter characterizing the SSS level of TP pipe-sections during operation. Therefore, the problem of determining the actual true pipeline axis curvature and the locations of the maximum values of curvature along the TP route is one of the topical urgent methodological problems.

The experience of using the «Instructions for determining, according to geodetic survey data, the actual stress-strain state of sections of gas pipelines located in areas with dangerous geodynamic processes and assessing their operability», a regulatory document in force PJSC Gazprom shows that estimates of pipeline axis curvature, based on the approximation of the data of the plan and height measurements of the position of the axis by interpolation polynomials of the fourth order, are very sensitive to the data of measurements chosen for to approximate the pipeline section, its length, etc. These circumstances necessitate the development of adequate methods for determining the pipeline axis curvature, in which the true shape of the axis is not specified in advance.

The method of numerical differentiation and smoothing of the data of planned and height measurements of the pipeline axis position, proposed in the article, makes it possible to efficiently obtain reliable distributions of the pipeline axis curvature in areas of great length when available significant errors in these measurements and, accordingly, adequately identify the PHA and evaluate the technical condition of the pipeline by SSS level. An example of the implementation of this method for monitoring the SSS of a section of the main gas pipeline located on a landslide hazardous hillside is given. The results obtained by this method can be used to verify calculated estimates of the distribution of pipeline axis curvature, obtained by other methods, for example, methods that directly approximate the plan and elevation measurements of the position of the axis of the decomposition by orthogonal systems feature topics.

Введение

В процессе эксплуатации магистрального трубопровода (МТ) происходит его изгибное деформирование, в результате которого напряженно-деформированное состояние (НДС) некоторых участков выходит за рамки, определенные [1] и тем более [2]. Особенно это характерно для трубопроводов, работающих в особых природно-климатических зонах, в сложных горных или геокриологических условиях. Очевидно, что выход НДС за рамки, установленные [1], не обязательно означает переход трубопровода в предельное состояние. Как правило, переход в предельное состояние в процессе эксплуатации происходит постепенно: с ростом пластических деформаций его техническое состояние становится все более опасным, и, в конечном итоге, наступает истощение несущей способности (предпо-

Key words

the main pipeline;
deformation with bending;
potentially dangerous section;
curvature of the axis;
vertical and horizontal
measurements;
numerical differentiation;
an error of the measurement;
measuring data smoothing

сылка аварии или авария). Поэтому важнейшее практическое значение для обеспечения эксплуатационной надежности и промышленной безопасности МТ имеет создание методик (расчетных процедур) адекватной оценки фактического НДС, идентификации потенциально опасных участков (ПОУ) МТ и ранжирования выявленных ПОУ по степени их опасности с определением необходимости проведения технических мероприятий по снижению НДС.

В качестве контролируемого параметра, характеризующего уровень НДС трубопроводных участков МТ в процессе эксплуатации, удобно и достаточно рассматривать кривизну оси трубопровода или ее обратную величину — радиус кривизны. Поэтому проблема определения максимальных значений фактической истинной кривизны оси трубо-

провода и их местоположений по трассе входит в число первоочередных актуальных методических проблем, решение которых необходимо для выявления ПОУ и оценки технического состояния ПОУ при выполнении технического диагностирования МТ.

Кривизна $\kappa(z)$ оси трубопровода в сечении z определяется по формуле:

$$\kappa = \sqrt{\kappa_u^2 + \kappa_v^2}. \quad (1)$$

Здесь $\kappa_u(z)$ и $\kappa_v(z)$ — кривизна оси трубопровода в плане и в вертикальном направлении, вычисляемые по формулам:

$$\kappa_u(z) = \frac{u''(z)}{\sqrt{[1 + (u'(z))^2]^3}}, \quad \kappa_v(z) = \frac{v''(z)}{\sqrt{[1 + (v'(z))^2]^3}}, \quad (2)$$

где $u'(z)$ и $u''(z)$ — первая и вторая производные функции $u(z)$ прогиба трубопровода в плане;

$v'(z)$ и $v''(z)$ — первая и вторая производные функции $v(z)$ прогиба трубопровода в вертикальном направлении;

z — координата сечения трубопровода на оси Z , совпадающей с осью МТ в недеформированном состоянии.

При $u'(z) \ll 1$ кривизна $\kappa_u(z) = u''(z)$; при $v'(z) \ll 1$ кривизна $\kappa_v(z) = v''(z)$.

Текущее состояние решения проблемы

Опыт применения действующей в ПАО «Газпром» инструкции [3] оценки кривизны оси трубопровода, основанной на аппроксимации данных плановых и высотных измерений положения оси интерполяционными полиномами 4-го порядка, показывает высокую чувствительность получаемых результатов к данным измерений, к выбранному для аппроксимации трубопроводному участку, его длине и т.д. Это обусловлено априори заданной полиномиальной формой оси трубопровода на рассматриваемом участке и, соответственно, формами ее производных, в общем случае не соответствующими истинным формам, а также значительным влиянием погрешности измерений. Вопрос погрешности получаемых оценок кривизны в Инструкции вообще не обсуждается.

Указанные обстоятельства обуславливают необходимость разработки адекватных методик определения кривизны оси трубопровода, в которых истинная форма оси определяется, а заранее не задается.

Подробное описание одной из таких методик — методики расчета кривизны оси трубопровода, в основе которой лежит метод «прямого» численного дифференцирования

данных плановых и высотных измерений, приводится в работе [4].

Особенности этого метода заключаются в том, что предполагаемая истинная форма оси трубопровода заранее не задается; расчетные оценки кривизны учитывают погрешности данных плановых и высотных измерений; каждой полученной расчетной оценке кривизны соответствует вполне определенный диапазон возможных значений истинной кривизны. Результаты расчетов с применением этого метода имеют дискретный вид, отражающий шаг численного дифференцирования, в общем случае не совпадающий с шагом измерений. При соблюдении сформулированных в [4] требований к выполнению измерений положения оси трубопровода и выполнению расчетов этот метод позволяет эффективно выявить местоположение ПОУ и достоверно оценить их техническое состояние на участках МТ любой протяженности.

Показательным примером успешного применения этого подхода может служить работа, в которой объектом исследования являлся участок магистрального конденсатопровода (МК) «Уренгой — Сургут» диаметром 720 мм длиной более 100 км. Исходной информацией для решения задачи служили данные внутритрубной диагностики МК о высотном и плановом положении оси трубопровода. Приведем фрагмент полученных результатов идентификации ПОУ. На рисунке 1 показаны выявленные ПОУ III-й категории по прокладке: их местоположения по дистанции и значения расчетных минимальных радиусов кривизны на этих ПОУ. На рисунке хорошо видны участки МК, подвергающиеся активным криологическим воздействиям, и зона их наибольшей активности, расположенная на дистанции около 90 км. Там же указаны условные номера трех ПОУ с наименьшими значениями расчетных радиусов кривизны, находящихся по данному показателю НДС в критическом состоянии. Уточненная характеристика этих ПОУ приведена в таблице 1.

С учетом возможных расчетных значений истинного радиуса кривизны ПОУ № 20 и № 26 и, с высокой вероятностью, ПОУ № 33 находятся в критическом состоянии. Этот вывод подтвердили данные вскрытия трубопровода в шурфах: на ПОУ №№ 20, 26 в зонах реализации минимального радиуса кривизны был выполнен ремонт коррозионных дефек-

Рисунок 1. Выявленные на МК ПОУ III-й категории по прокладке

Таблица 1. Характеристика ПОУ №№ 20, 26, 33

Условный номер ПОУ	Местоположение ПОУ (дистанция, м)	Местоположение минимального радиуса кривизны, м	Расчетная оценка минимального радиуса кривизны, м	Возможное* значение истинного радиуса кривизны, м	Расчетная оценка максимальной интенсивности	
					напряжений, МПа	деформаций, %
20	89200–89250	89226,80	82	68–96	481	0,63
26	90200–90255	90224,73	104	83–122	474	0,52
33	98290–98360	98335,20	116	99–140	467	0,45

Примечание. * — с учетом погрешности высотных измерений $\pm \Delta = 0,005$ м.

тов — установлены металлические сварные герметичные муфты.

Выполненная аналитическая процедура идентификации ПОУ и ранжирования выявленных ПОУ по степени их опасности показала, что в текущий период эксплуатации на МК имеются 33 ПОУ, позволила выделить из

них шесть ПОУ, которые находятся в критическом состоянии, требующем выполнения внепланового ремонта — замены деформированных участков; один ПОУ, который находится в работоспособном техническом состоянии, требует замены деформированного участка в плановом порядке.

Метод численного дифференцирования и сглаживания данных измерений, основанный на их многократном осреднении

Результаты расчетных оценок кривизны оси трубопровода, полученные методом «прямого» численного дифференцирования [4], имеют дискретный вид, отражающий необходимый шаг численного дифференцирования, который с уменьшением кривизны и увеличением погрешности измерений возрастает; при этом погрешность оценки истинной кривизны значительно увеличивается, идентификация фактического НДС может стать затруднительной или даже не выполнимой.

Для решения проблемы адекватной оценки фактической кривизны оси трубопровода при большой погрешности плановых и высотных измерений положения оси возможен весьма эффективный, как будет показано ниже, подход, в основе которого лежит специальный метод численного дифференцирования и сглаживания данных измерений, основанный на их многократном осреднении, разработанный для обработки опытных данных аэродинамического и летного эксперимента, которым присущи существенные помехи [5]. Применительно к МТ метод позволяет получать достоверные оценки функции (формы оси трубопровода), первой производной функции (распределения углов поворота сечений трубопровода) и, как показала верификация, кривизны оси трубопровода на трубопроводном участке достаточно большой длины при наличии существенных погрешностей в данных измерений.

Опуская математическое обоснование метода, подробно изложенное в работе [5], отметим, что для его практической реализации необходимо найти функцию $\varphi(z)$ — оценку первой производной функции истинной формы трубопровода, доставляющую минимум функционалу

$$F(\phi) = \frac{2}{L} \int_0^L \int_0^{\tilde{z}} \left\{ \int_z^{\tilde{z}} \phi(\lambda) d\lambda - [V(\tilde{z}) - V(z)] \right\}^2 \frac{dz d\tilde{z}}{\tilde{z} - z}, \quad (3)$$

где L — длина рассматриваемого трубопроводного участка; $V(z)$ — упорядоченные по z данные измерений (например высотные измерения).

Функция $\varphi(z)$ ищется в виде отрезка ряда Фурье по системе функций $w_i(z)$:

$$\varphi(z) = \sum_{i=0}^I a_i w_i(z). \quad (4)$$

Тогда нетрудно показать, что определение коэффициентов a_i сводится к решению линейной алгебраической системы уравнений:

$$\sum_{j=0}^J \alpha_j \cdot \int_0^L \int_0^{\tilde{z}} \frac{\int_z^{\tilde{z}} w_j(\lambda) d\lambda \cdot \int_z^{\tilde{z}} w_i(\lambda) d\lambda}{\tilde{z} - z} dz d\tilde{z} = \int_0^L \int_0^{\tilde{z}} \frac{\int_z^{\tilde{z}} w_i(\lambda) d\lambda \cdot [V(\tilde{z}) - V(z)]}{\tilde{z} - z} dz d\tilde{z}. \quad (5)$$

В реализованной в данной работе программе для оценки первых производных $v'(z)$, $u'(z)$ функций формы оси трубопровода по вертикали и в плане в качестве системы функций $w_i(z)$ использована полная система функций $\sin \alpha_i z$ и $\cos \alpha_i z$, ортогональных на участке $[0, L]$, с добавлением линейной функции, зависящей от координаты; $\alpha_i = 2\pi i / L$.

Так,

$$v'(z) = \alpha_1 [k_0 \alpha_1 z + a_0 + \sum_{i=1}^I (a_i \cos \alpha_i z + b_i \sin \alpha_i z)]. \quad (6)$$

Тогда (5) можно записать в матричном виде:

$$Ax = C, \quad (7)$$

где искомым вектор $x^T = [k_0, a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, \dots, a_I, b_I]$. Элементы симметричной матрицы A и вектора C определяются из (5), например,

$$A_{11} = \int_0^L \int_0^{\tilde{z}} \frac{\left[\int_z^{\tilde{z}} \alpha_1^2 z dz \right]^2}{\tilde{z} - z} dz d\tilde{z};$$

$$A_{15} = \int_0^L \int_0^{\tilde{z}} \frac{\int_z^{\tilde{z}} \alpha_1^2 z dz \int_z^{\tilde{z}} \alpha_1 \cos \alpha_2 z dz}{\tilde{z} - z} dz d\tilde{z};$$

$$C_1 = \int_0^L \int_0^{\tilde{z}} \frac{\int_z^{\tilde{z}} \alpha_1^2 z dz [V(\tilde{z}) - V(z)]}{\tilde{z} - z} dz d\tilde{z};$$

$$C_5 = \int_0^L \int_0^{\tilde{z}} \frac{\int_z^{\tilde{z}} \alpha_1 \cos \alpha_2 z dz [V(\tilde{z}) - V(z)]}{\tilde{z} - z} dz d\tilde{z}.$$

Число I , определяющее количество членов ряда (4), ограничивается снизу с тем, чтобы аппроксимация первой производной и кривизны не были слишком грубыми, и сверху,

чтобы аппроксимирующий многочлен не отражал своим составом случайных составляющих в массиве данных измерений (в массиве V при расчете кривизны в вертикальной плоскости, в массиве U при расчете кривизны в плане), а также погрешностей, связанных с вычислением интегралов, входящих в систему уравнений (7). На практике число I определяется по структуре вектора C , который содержит сначала значимые (определяющие) члены, а затем члены, обусловленные погрешностью измерений. Пример определения числа I приведен ниже.

Зная гладкую производную $v'(z)$, проинтегрировав (6), получаем сглаженную расчетную функцию $v(z)$ формы оси на трубопроводном участке $[0, L]$:

$$v(z) = k_o \alpha_1^2 z^2 / 2 + a_o \alpha_1 z + \sum_{i=1}^I \frac{1}{i} (a_i \sin \alpha_i z - b_i \cos \alpha_i z) + Const, \quad (8)$$

где константа $Const$ определяется (из условия минимума интеграла рассогласования между измеренной функцией $V(z)$ и расчетной $v(z)$) по формуле:

$$Const = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L \left[V(z) - \alpha_1^2 k_o \frac{z^2}{2} - a_o \alpha_1 z - \sum_{i=1}^I \frac{1}{i} (a_i \sin \alpha_i z - b_i \cos \alpha_i z) \right] dz. \quad (9)$$

И, наоборот, продифференцировав (6), получаем расчетную приближенную оценку функции распределения второй производной функции $v(z)$:

$$v''(z) = \alpha_1 [k_o \alpha_1 - \sum_{i=1}^I \alpha_i (a_i \sin \alpha_i z - b_i \cos \alpha_i z)]. \quad (10)$$

Распределение кривизны оси на трубопроводном участке определяется по формулам (2) и (1).

Верификация данного метода показывает, что он дает адекватные оценки истинной кривизны на всем участке $[0, L]$, за исключением небольших краевых зон, где оценка кривизны может быть завышенной.

Пример реализации данного метода для определения кривизны оси трубопровода с оценкой технического состояния одного из оползнеопасных участков магистрального газопровода «Моздок — Казимагомед» (диаметр трубопровода 1220 мм, номинальная исполнительная толщина стенки трубопровода 12,5 мм, материал труб сталь марки 17Г1СУ, расчетное давление 5,4 МПа, возможный тем-

пературный перепад стенки трубопровода от минус 10 °С до 20 °С, участок трубопровода третьей категории по прокладке) приведен на рисунке 2. Расчеты выполнены по данным высотных и плановых геодезических измерений положений оси трубопровода, полученным в результате ежеквартального мониторинга.

Расчеты показали, что для получения адекватных результатов для кривизны учитываемый отрезок ряда (6) в рассматриваемом примере должен содержать 8–10 членов. Учет следующих членов приводит к искажению реального распределения кривизны, так как отражает своим составом погрешности в массиве данных измерений. Косвенным показателем определяющих членов ряда (6) и членов, связанных с погрешностью, является структура вектора C в системе уравнений (7). В рассматриваемом примере для данных высотных измерений этот вектор имеет вид (выделены определяющие компоненты):

$$C_v = (-4584; -1404; 712; 116; -14,5; -66,1; -23,0; -14,8; 10,7; -6,9; 2,7; 1,0; -1,2; -0,7; 1,1; 2,3; 2,5; -0,7; \dots).$$

Данные измерений и полученные результаты их аппроксимации приведены на рисунке 2, а, б, а соответствующие этим аппроксимациям распределения кривизны оси — на рисунке 2, в. Там же в виде треугольников приведены расчетные значения кривизны, полученные методом «прямого» численного дифференцирования [4].

Приведенные иллюстрации свидетельствуют о достаточно хорошем согласовании результатов оценки распределения кривизны на трубопроводном участке, рассчитанных двумя методами. Это подтверждает достоверность результатов, полученных методом численного дифференцирования и сглаживания данных измерений при наличии значительной погрешности измерений и их вариации на разных этапах мониторинга НДС. Отметим, что аппроксимация данных плановых и высотных измерений положения оси трубопровода интерполяционными полиномами 4-го порядка, согласно инструкции [3], приведет к ошибочным результатам.

В завершение отметим, что достоверность полученных результатов в оценке кривизны позволяет адекватно оценивать техническое состояние трубопровода по уровню НДС. В рассмотренном примере, на рисунке 2, в, горизонтальными прямыми указаны граничные значения кривизны для идентификации

технического состояния рассматриваемого трубопроводного участка, полученные в соответствии с методикой [6].

Из анализа рисунка 2 видно, что за год эксплуатации техническое состояние трубопроводного участка практически не изменилось;

участок является потенциально опасным (максимальные значения кривизны превышают граничное значение, установленное в [1]), но находится в работоспособном состоянии, требующем продолжения мониторинга НДС.

3 кв. 2017 г.

3 кв. 2018 г.

а) форма оси по вертикали в 3 кв. 2017 г. и в 3 кв. 2018 г.; б) форма оси в плане в 3 кв. 2017 г. и в 3 кв. 2018 г.; в) кривизна оси трубопровода в 3 кв. 2017 г. и в 3 кв. 2018 г.

Рисунок 2. Данные высотных и плановых измерений положения оси трубопровода и результаты расчетов, полученные методом численного дифференцирования и сглаживания данных измерений

Выводы

Точность определения максимальной кривизны (или минимального радиуса кривизны) трубопровода имеет определяющее значение для адекватной идентификации ПОУ МТ и оценки технического состояния выявленных ПОУ. При использовании в качестве исходной информации результатов плановых и высотных измерений положения оси трубопровода она существенным образом зависит от погрешности измерений и метода расчета кривизны.

Представленный в настоящей работе специализированный метод численного дифференцирования и сглаживания данных измерений, основанный на их многократном осреднении, позволяет эффективно получать достоверные распределения кривизны оси трубопровода на участках большой протяженности при наличии существенных погрешностей в данных измерений и, соответственно, адекватно выявлять ПОУ и оценивать техническое состояние трубопровода по уровню НДС. Результаты, полученные данным мето-

дом, могут использоваться для верификации расчетных оценок распределения кривизны оси трубопровода, получаемых другими методами, в том числе методами аппроксимации

данных плановых и высотных измерений положения оси разложениями по ортогональным системам функций.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. М.: Стандартин-форм, 2012. 88 с.
2. СП 86.13330.2014. Магистральные трубопроводы. М.: Стандартин-форм, 2014. 173 с.
3. Инструкция по определению по данным геодезической съемки фактического напряженно-деформированного состояния участков газопроводов, расположенных на территориях с опасными геодинамическими процессами и оценки их работоспособности. М.: ВНИИГАЗ, 2003. 37 с.
4. Муравин Е.Л., Стенина Т.Е. Определение минимального радиуса кривизны магистрального трубопровода на потенциально опасных участках по данным плановых и высотных измерений положения его оси // Трубопроводный транспорт: Теория и практика. 2017. № 3. С. 18–23.
5. Виноградов Ю.А., Медведев М.М. Метод численного дифференцирования экспериментальных зависимостей // Ученые записки ЦАГИ. 1979. Т. 10. № 6. С. 133–143.
6. Муравин Е.Л., Стенина Т.Е., Козырева А.Г. Идентификация и ранжирование потенциально опасных участков магистрального трубопровода по кривизне его оси // Трубопроводный транспорт: Теория и практика. 2018. № 2 (66). С. 38–43.

3. *Instruktsiya po opredeleniyu po dannym geodezicheskoi s"emki fakticheskogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya uchastkov gazoprovodov, raspolozhennykh na territoriyakh s opasnymi geodinamicheskimi protsessami i otsenki ikh rabotosposobnosti* [Instructions for Determining the Actual Stress-Strain State of Sections of Gas Pipelines Located in Areas with Dangerous Geodynamic Processes According to Geodetic Survey Data and Assessing their Performance]. Moscow, VNIIGAZ Publ., 2003. 37 p. [in Russian].

4. Muravin E.L., Stenina T.E. Opredelenie minimal'nogo radiusa krivizny magistral'nogo truboprovoda na potentsial'no opasnykh uchastkakh po dannym planovykh i vysotnykh izmereniy polozeniya ego osi [Calculation of the Minimum Radius of Curvature of a Pipeline on Potentially Dangerous Sections According to the Data of the Vertical and Horizontal Measurements of the Position of its Axis]. *Truboprovodnyi transport: Teoriya i praktika — Pipeline Transport: Theory and Practice*, 2017, No. 3, pp. 18–23. [in Russian].

5. Vinogradov Yu.A., Medvedev M.M. Metod chislennogo differentsirovaniya eksperimental'nykh zavisimostei [Method of Numerical Differentiation of Experimental Dependencies]. *Uchenye zapiski TsAGI — Uchenye Zapiski TSAGI*, 1979, Vol. 10, No. 6, pp. 133–143. [in Russian].

6. Muravin E.L., Stenina T.E., Kozyreva A.G. Identifikatsiya i ranzhirovanie potentsial'no opasnykh uchastkov magistral'nogo truboprovoda po krivizne ego osi [Identification and Ranking of Open Sections of the Main Pipeline along the Curvature of Its Axis]. *Truboprovodnyi transport: Teoriya i praktika — Pipeline Transport: Theory and Practice*, 2018, No. 2 (66), pp. 38–43. [in Russian].

REFERENCES

1. SP 36.13330.2012. Magistral'nye truboprovody [SP 36.13330.2012. Trunk Pipelines]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 88 p. [in Russian].
2. SP 86.13330.2014. Magistral'nye truboprovody [SP 86.13330.2014. Main (Trunk) Pipelines]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 173 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Муравин Евгений Львович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ООО «Квалитет», заместитель начальника Обособленного подразделения Подольск, г. Подольск, Российская Федерация

Evgeny L. Muravin, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Kvalitet LLC, Deputy Chief of Separate Unit Podolsk, Podolsk, Russian Federation

e-mail: muravinel@mail.ru

Стенина Татьяна Евгеньевна, кандидат технических наук, ООО «Квалитет», начальник Обособленного подразделения Подольск, г. Подольск, Российская Федерация

Tatyana E. Stenina, Candidate of Engineering Sciences, Kvalitet LLC, Chief of Separate Unit Podolsk, Podolsk, Russian Federation

e-mail: info_podolsk@mail.ru