

УДК 528.48:[519.876.5:621.64]
DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-3-36-43

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ КАМЕРЫ ПРИЕМА И ПУСКА СРЕДСТВ ОЧИСТКИ И ДИАГНОСТИКИ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

Валерий Степанович Хорошилов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор кафедры космической и физической геодезии, тел. (383)361-08-66, e-mail: khoroshilovvs@mail.ru

Александр Владимирович Комиссаров

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, зав. кафедрой фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383)361-08-66, e-mail: a.v.komissarov@sgugit.ru

Наталья Николаевна Кобелева

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (383)343-29-11, e-mail: n.n.kobeleva@mail.ru

В статье рассматриваются возможности применения математического моделирования для оценки состояния основного технологического оборудования камеры приема и пуска средств очистки и диагностики (КПП СОД) для предсказания возможных изменений положения элементов оборудования от соответствующих проектных значений. На основе выполненных запланированных циклов геодезических наблюдений по результатам измерений были произведены расчеты для построения прогнозных математических моделей для последующего изучения деформационных процессов основного технологического оборудования камеры приема и пуска средств очистки и диагностики. Показаны механизмы последовательной обработки результатов измерений на принадлежность выборки закону нормального распределения приближенным способом и дальнейшей подготовки данных путем формирования статистически однородных групп реализаций процесса с целью построения прогнозных математических моделей. По результатам прогнозирования выявлены деформационные марки, для которых процесс протекания деформации происходит с большей скоростью нарастания осадки по сравнению с остальными марками. Предложены рекомендации для проведения последующих геодезических наблюдений.

Ключевые слова: геодезические наблюдения, технологическое оборудование, математическое моделирование, прогнозная модель, деформационный процесс

Введение

Магистральные трубопроводы являются одним из основных способов транспортировки нефти на дальние расстояния, вследствие чего существенно возросли требования к их надежности в процессе эксплуатации. С этой целью разработка системы мероприятий по их безопасной работе, включающей периодическую диагностику основного оборудования, является одним из ее важных элементов. По своему назначению данное диагностирование разделяется на текущее и прогнозное. В процессе проведения текущего ди-

агностирования выявляют определение соответствия основных контролируемых параметров трубопровода их проектным значениям на момент проведения контроля. Для этих целей используются различные приборы и оборудование: профилемеры, магнитные и ультразвуковые дефектоскопы и т. п. Их основное назначение – это определение следующих особенностей изменения параметров трубопровода: радиусов изогнутости трубы, качества сварных швов и приварных элементов (тройники, врезки, датчики отбора давления и т. д.); поверхностных дефектов (потеря металла, дефект поверхности трубы, гофра,

риски и т. п.). Данные устройства запускаются внутрь трубопровода, и выполняется так называемый «прогон» приборов. Для размещения диагностических устройств внутри трубопровода используют камеры приема и пуска средств очистки и диагностики (КПП СОД) [1–7]. Данные камеры установлены на фундаментах, вокруг которых выполнено обвалование для предотвращения разливов нефти в случае возникновения аварийных ситуаций. А применяемое в дальнейшем прогнозное диагностирование является одним из важнейших этапов, позволяющих предсказать возможные отклонения состояния основного оборудования камеры приема и пуска средств очистки и диагностики от соответствующих проектных значений. В связи с этим к подобным объектам предъявляются достаточно жесткие требования с точки зрения их геометрии, вследствие чего выполняется периодический мониторинг высотного и планового положения фундамента и основных элементов камеры [7]. Для одной из таких камер с целью выявления возможных отклонений от проектных значений были выполнены четыре цикла геодезических наблюдений.



Рис. 1. Общий вид камеры пуска СОД

Методы исследования

Участок производства геодезических работ расположен на территории Каргосокского района Томской области и представляет собой камеру пуска и приема средств очистки и диагностики трубопровода (рис. 1). На осно-

вании технического задания на выполнение геодезических работ для данного типа объектов были установлены следующие максимальные смещения элементов технологического оборудования от проектных значений: в плане ± 10 мм; по высоте ± 25 мм [8–10].

Для данного района работ характерны пучинистые грунты при замачивании. Циклы геодезических измерений были произведены в следующие временные интервалы:

- 1-й цикл – июнь 2017 г.;
- 2-й цикл – 14 июнь 2018 г.;
- 3-й цикл – ноябрь 2018 г.;
- 4-й цикл – февраль 2019 г.

В процессе выполнения геодезических работ было создано планово-высотное обоснование путем проложения замкнутого тахеометрического хода с опорой на три грунтовых репера с номерами 009-И-0/2, 009-И-0/1, 009-И-0/4, включающего три промежуточные точки: S1, S2, S3 (рис. 2). Точность линейных измерений составила – $1/25000$; угловых – $5''$.

В ходе выполнения измерений определялось плановое положение контролируемых точек с использованием электронного тахеометра Nikon Nivo 2M и их высотных значений с помощью цифрового нивелира Trimble DiNi 0.3 с инварной рейкой.

По всем пунктам планово-высотного обоснования, а также по двум дополнительным высотным точкам КПП СОД (19, 20) был проложен замкнутый ход геометрического нивелирования III класса согласно схеме, представленной на рис. 2. С целью обеспечения равномерности геодезических измерений во всех циклах наблюдений применялась одна и та же схема наблюдений.

Как было отмечено выше, качественный геодезический контроль возможных изменений состояния основного оборудования камеры приема и пуска средств очистки и диагностики от соответствующих проектных значений осуществляется на этапе прогнозного диагностирования. В этом случае математическое моделирование протекающих деформационных процессов позволяет осуществить прогнозную экстраполяцию поведения во времени контролируемых точек, закрепленных на технологическом оборудовании, а количественные оценки параметров построенных математических моделей поддаются содержатель-

ной интерпретации. С этой целью для выбранной совокупности результатов геодезических наблюдений по всем проведенным циклам измерений для всех контролируемых деформационных марок, заложенных в геометрически заданных точках конструкций объекта, находились прогнозы возможных перемещений, что и является в определенной степени условием надежности и безопасности последующей эксплуатации контролируемого объекта.

Математическая модель строилась для всех статистически однородных реализаций процесса путем определения и аппроксимации статистических параметров закона распределения перемещений по всем проведенным циклам наблюдений, входящим в период основания прогноза. Наиболее оптимальной с точки зрения последующего прогнозирования является корреляционная теория случайных функций, на основании которой возможно достаточно корректно представить нормально распределенные линейные процессы. Для использования данной теории

проверяется нормальность и линейность описываемого процесса; соблюдение данных условий позволяет построить прогнозную модель в виде двух первых моментных функций, а оценку параметров осуществить с использованием критерия средней квадратической погрешности.

В то же время, размещение наблюдаемых контролируемых точек должно охватывать характерные узлы и слабые места жесткой структуры системы «контролируемый объект – основание», а это подразумевает, что перед началом проведения необходимых циклов геодезических наблюдений вся доступная для последующих расчетов информация должна проверяться по всем имеющимся сведениям на предмет неоднородности залегания пород в основании, пространственной жесткости объекта, распределения нагрузок и воздействий и т. д. [11]. Всего была заложена 21 деформационная марка, по которым были выполнены геодезические наблюдения в течение нескольких циклов.

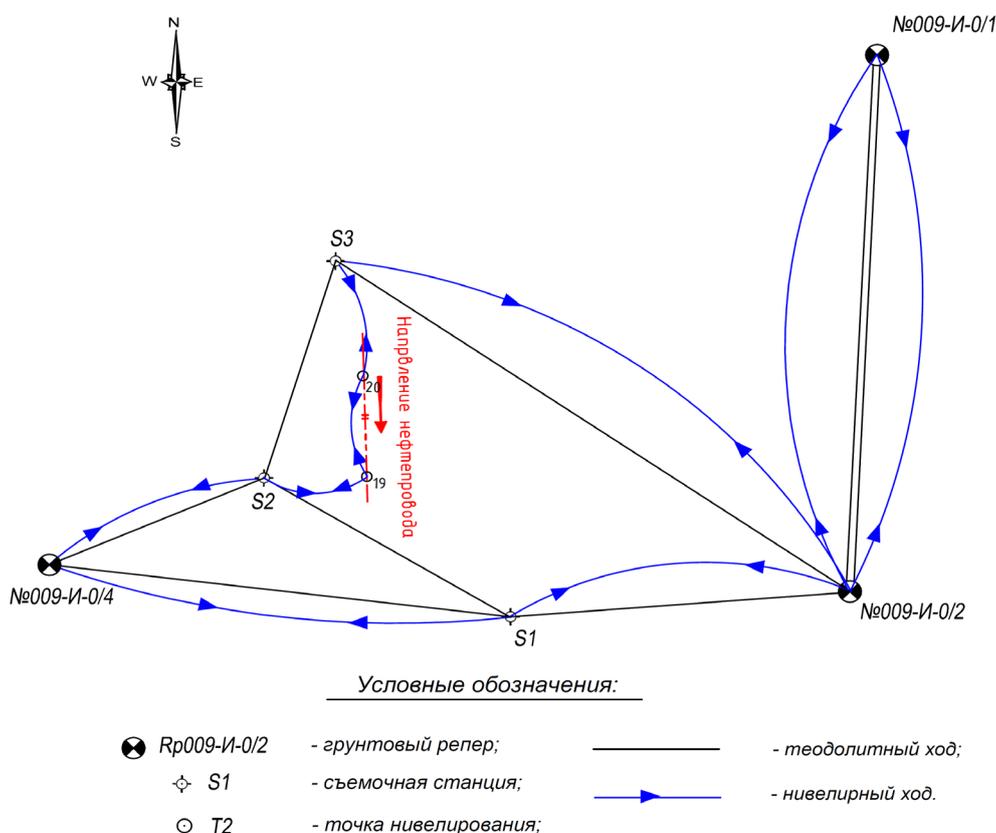


Рис. 2. Схема планово-высотного обоснования для оценки состояния основного технологического оборудования камеры приема и пуска средств очистки и диагностики КПП СОД

С целью формирования статистически однородного исходного материала были проведены расчеты путем группирования всех циклов наблюдений на основании вычисления

$$D_m(X_i, X_j) = \sqrt{(X_i - X_j)^T K^{-1} (X_i - X_j)}, \quad (1)$$

где X_i – смещения марок, полученные в i -м цикле; X_j – смещения марок, полученные в j -м цикле; K – ковариационная матрица векторов X_i и X_j .

Так как ковариационная матрица K является вырожденной, т. е. для нее не существует обратной матрицы, то статистика Махаланобиса была получена с помощью выражения

$$D_m(X_i, X_j) = \sqrt{(X_i - X_j)^T K^+ (X_i - X_j)}, \quad (2)$$

где K^+ – псевдообратная матрица к исходной матрице K .

С целью нахождения псевдообратной матрицы применялся рекурсивный алгоритм, представленный в [13]. В процессе расчетов были найдены расстояния Махаланобиса $D_m(x)$ между различными комбинациями циклов геодезических наблюдений. Далее определялась величина Хоттеллинга с использованием выражения

обобщенного расстояния Махаланобиса [12] между соответствующими комбинациями выборок из циклов геодезических наблюдений с использованием выражения (1)

$$T^2 = \frac{n}{n+1} D_m(x)^2. \quad (3)$$

Для последующих расчетов величину T^2 связывали с распределением F (распределение Фишера). С этой целью для уровня значимости $\alpha = 0,01$ было подсчитано его расчетное значение с применением следующей формулы и статистики $F_a = 4,98$ (с двумя и $n - 2$ степенями свободы)

$$T_a^2 = \frac{2(n-1)F_a}{n-2} = 10,484. \quad (4)$$

В табл. 1 представлены циклы, выбранные для обработки. Все вычисленные оценки для каждого из циклов измерений сравнивались с расчетным значением (4). В нашем случае все результаты наблюдений по всем циклам оказались пригодными для последующих расчетов. При этом отметим, что для расчетов дополнительно был введен промежуточный цикл 2^1 , полученный путем линейной интерполяции по времени между 1-м и 2-м циклами наблюдений.

Таблица 1

Комбинации циклов, выбранные для обработки

№ циклов	$D_m(x)$	T^2	$D_m(x)$	T^2	$D_m(x)$	T^2
	по высоте		по координате X		по координате Y	
1-2 ¹	0,1183	0,1133	0,0029	0,0028	0,0101	0,0096
1-2	0,1631	0,1564	0,0023	0,0022	0,0055	0,0052
1-3	0,2047	0,1955	0,0014	0,0013	0,0003	0,0003
1-4	0,4336	0,4133	0,0023	0,0022	0,0021	0,0020
2 ¹ -2	0,0453	0,0432	0,0006	0,0006	0,0046	0,0044
2 ¹ -3	0,0871	0,0837	0,0015	0,0014	0,0099	0,0094
2 ¹ -4	0,3152	0,3005	0,0005	0,0005	0,0122	0,0116
2-3	0,0426	0,0404	0,0009	0,0008	0,0052	0,0049
2-4	0,2701	0,2583	0,0001	0,0001	0,0076	0,0072
3-4	0,2281	0,2181	0,0009	0,0008	0,0023	0,0022

Таким образом, по результатам выполненных расчетов для построения прогнозных кинематических моделей были выбраны 1, 2¹, 2, 3 и 4-й циклы наблюдений.

Следует отметить, что группирование статистически однородных групп реализаций процесса можно осуществлять по вышеприведенному алгоритму только в тех случаях,

когда количество сечений меньше числа реализаций [11, 14, 15].

Для решения прогнозной задачи по оценке адекватности кинематической модели путем инверсной верификации и оценки точности прогнозирования был выбран период основания прогноза, охватывающий 1, 2¹, 2 и 3-й циклы наблюдений, при этом контрольное прогнозирование выполнялось на имеющийся 4-й цикл наблюдений, т. е. период упреждения составил 68 дней.

Проверка гипотезы о нормальности распределения исследуемой выборки осуществ-

лялась приближенным способом с использованием таких критериев, как асимметрия A и эксцесс E и их стандартов σ_A и σ_E путем соблюдения следующего неравенства [16]:

$$\left| \frac{A}{\sigma_A} \right| \leq 3; \quad \left| \frac{E}{\sigma_E} \right| \leq 3. \quad (5)$$

Построенная прогнозная математическая модель (высотное положение) получила вид (период основания прогноза: 1, 2¹, 2, 3-й циклы наблюдений):

$$\begin{cases} \hat{m}_x(t_2, t_1) = 123,2743 + 0,00861t_j; & \eta_{yx} = 0,880; \\ \frac{1}{\hat{\sigma}_x(t_j)} = 0,00074 \frac{1}{t_j} + 1,3479; & \eta_{\sigma y} = 0,787; \\ \hat{r}_x(t_2, t_1) = 0,999977e^{0,000094t_j}; & \eta_{ry} = 0,891. \end{cases} \quad (6)$$

Прогнозирование с помощью построенных моделей (6), выполненное с использованием выражения прогнозной модели (7) в виде двух первых условных моментных функций, дало следующие результаты, которые представлены в табл. 2:

$$\hat{m}_{x_i}(t_2 / t_1) = \hat{m}_x(t_2) + \hat{r}_x(t_2, t_1) \frac{\hat{\sigma}_x(t_2)}{\hat{\sigma}_x(t_1)} \dot{x}_i(t_1). \quad (7)$$

Таблица 2

Результаты прогнозирования по модели (7) методом инверсной верификации (высотное положение) на дату 18.02.2019

Номера марок	Прогноз	Результаты наблюдений	Ошибка, мм	Номера марок	Прогноз	Результаты наблюдений	Ошибка, мм
Rp 0/2	123,487 6	122,486	+1,6	11	122,933 7	122,927	+6,7
Rp 0/1	122,310 7	122,303	+7,7	12	122,923 7	122,927	-3,3
2	123,752 7	123,758	-5,3	13	122,929 7	122,927	+2,7
3	124,138 6	124,157	-18,3	14	122,929 7	122,927	+2,7
4	124,701 6	124,736	-34,4	15	122,761 7	122,770	-8,3
5	124,811 6	124,843	-31,4	16	122,764 7	122,772	-7,3
6	124,692 6	124,724	-31,4	17	122,765 7	122,774	-8,3
7	122,932 7	122,933	-0,3	18	122,764 7	122,772	-7,3
8	122,935 7	122,938	-2,3	19	123,779 5	123,815	-35,5
9	122,930 7	122,934	-3,3	20	123,783 7	123,817	-33,3
10	122,934 7	122,937	-2,3				

Расчетная средняя квадратическая ошибка прогнозирования вычислялась с использованием выражения (8) и составила величину 2,7 мм

$$\hat{\sigma}_x(t_2 / t_1) = \hat{\sigma}_x(t_2) \sqrt{1 - \hat{r}^2(t_2, t_1)}. \quad (8)$$

Заключение

1. Тщательный выбор входных воздействующих факторов, типа математической модели и необходимых циклов геодезических наблюдений обеспечили корректное построение математических моделей для их последующего применения при прогнозировании изменений состояния основного оборудования «камеры приема и пуска средств очистки и диагностики» от соответствующих проектных значений.

2. Выполненное прогнозирование позволило сделать следующие выводы:

– необходимо повысить точность нивелирования (перейти к нивелированию II класса вместо III класса) для повышения точности прогнозирования;

– присутствует неоднородность в проседании деформационных марок (это, возможно, связано с неоднородной структурой грунтов в основании сооружения);

– для большинства наблюдаемых марок процесс деформации протекает с незначительным затуханием.

3. Марки под номерами 3, 4, 5, 6, 19 и 20 просели в большей степени, чем остальные, в связи с чем:

– рекомендуется более тщательно выполнять последующие измерения по этим маркам;

– значительные расхождения результатов измерений 4-го цикла с прогнозными значениями для этих марок – это либо ошибки в измерениях, либо процесс деформации является неустойчивым (необходимы дополнительные измерения для последующих выводов);

– для данных марок необходимо построить дополнительную прогнозную модель, чтобы проанализировать процесс нарастания осадки, если она присутствует (после проведения дополнительных измерений).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев Г. Г., Коробков Г. Е., Коршак А. А. и др. Трубопроводный транспорт нефти / под ред. С. М. Вайнштока : учеб. для вузов: в 2 т. – М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. Т. 1. – 407 с.
2. Кудинов В. И. Основы нефтегазопромыслового дела. – М. – Ижевск : Институт компьютерных исследований; Удмуртский госуниверситет, 2004. – 720 с.
3. Ушивцева Л. Ф., Соловьева А. В., Ермолина А. В. Воздействие геологических процессов на функционирование объектов инфраструктуры // Геология, география и глобальная энергия. – 2016. – № 3 (62). – С. 49–60.
4. Аскарров Р. М., Китаев С. В., Исламов И. М. О технологии выявления участков трубопроводов с изгибными напряжениями при пересечении ими геодинамических зон // Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – № 5. – С. 18–25.
5. Бабин Л. А., Григоренко П. Н., Ярыгин Е. Н. Типовые расчеты при сооружении трубопроводов : учеб. пособие для вузов. – М. : Недра, 1995. – 246 с.
6. Дятлов В. А. Обслуживание и эксплуатация линейной части магистральных газопроводов. – М. : Недра, 1984. – 240 с.
7. Лазарев В. М. Разработка комплексной системы геодезического обеспечения геомониторинга геологической безопасности на оползнеопасных территориях // Изв. вузов. Геодезия и аэрофото-съемка. – 2012. – № 4. – С. 65–72.
8. ГОСТ 24846–2012. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений. – М. : Стандартинформ, 2014. – 22 с.
9. ГКИНП (ГНТА)-17-004–99. Инструкция о порядке контроля и приёмке геодезических, топографических и картографических работ. – М. : ЦНИИГАиК, 1999.
10. СП 22.13330.2016. СНиП 2.02.01–83. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция. – М. : Минрегион России, 2016. – 220 с.
11. Хорошилов В. С., Квашенко И. Ю. Особенности выбора деформационных марок для построения кинематической модели при изучении деформаций сооружений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофото-съемка. – 2013. – № 4/С. – С. 58–61.
12. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами / пер. с англ. В. Д. Скаржинского ; под ред. В. Г. Горского. – М. : Мир, 1973. – 957 с.
13. Барлиани А. Г. Теория математической обработки геодезических измерений : учеб. пособие. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – 174 с.

14. Гуляев Ю. П., Хорошилов В. С. Математическое моделирование. Анализ и прогнозирование деформаций сооружений по геодезическим данным на основе кинематической модели : учеб. пособие – Новосибирск : СГГА, 2012. – 93 с.

15. Khoroshilov V. S., Kobeleva N. N., Sycheva N. V. Mathematical modeling of the high-rise buildings deformation development process in Moscow (Vosstania square) // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 698. – P. 044004. doi: 10.1088/1757-899X/698/4/044004.

16. Румшицкий Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М. : Наука, 1971. – 192 с.

Получено 15.02.2021

© В. С. Хорошилов, А. В. Комиссаров, Н. Н. Кобелева, 2021

MATHEMATICAL MODELING OF DEFORMATION PROCESSES OF THE MAIN TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF THE CHAMBER RECEIVING AND STARTING THE CLEANING AND DIAGNOSTIC MEANS (PPC SOD) OF THE MAIN PIPELINE

Valery S. Khoroshilov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Department of Space and Physical Geodesy, phone: (383)343-29-11, e-mail: khoroshilovvs@mail.ru

Alexander V. Komissarov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Associate Professor, Head of the Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (383)361-01-59, e-mail: a.v.komissarov@sgugit.ru

Natalia N. Kobeleva

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Senior Lecturer, Department of Physical Geodesy and Remote Sensing, phone: (383)343-29-11, e-mail: n.n.kobeleva@mail.ru

The article discusses the possibility of using mathematical modeling to assess the state of the main technological equipment of the chamber for receiving and launching cleaning and diagnostic tools (PPC) to predict possible changes in the position of equipment elements from the corresponding design values. Based on the completed planned cycles of geodetic observations, based on the measurement results, calculations were made to build predictive mathematical models for the subsequent study of the deformation processes of the main technological equipment of the chamber for receiving and launching cleaning and diagnostic tools. The mechanisms of sequential processing of the measurement results for the sample belonging to the law of normal distribution by an approximate method and further data preparation by forming statistically homogeneous groups of process implementations in order to build predictive mathematical models are shown. According to the prediction results, deformation marks were identified, for which the process of deformation proceeds with a higher rate of upsetting in comparison with other marks. Recommendations for further geodetic observations are proposed.

Keywords: geodetic observations, main technological equipment, mathematical modeling, predictive model, deformation process

REFERENCES

1. Vasilev, G. G., Korobkov, G. E., Korshak, A. A., & et al. (2002). *Truboprovodnyy transport nefi: T. 1 [Oil pipeline transportation: Vol. I]*. S. M. Vaynshtok (Ed.). Moscow: OOO "Nedra-Biznestsentr" Publ., 407 p. [in Russian].

2. Kudinov, V. I. (2004). *Osnovy neftegazopromyslovogo dela [Fundamentals of oil and gas production]*. Moscow-Izhevsk: Institute for Computer Research; Udmurt State University Publ., 720 p. [in Russian].

3. Ushivtseva, L. F., Soloveva, A. V., & Ermolina, A. V. (2016). Impact of geological processes on the functioning of infrastructure facilities. *Geology, geography and global energy [Geology, Geography and Global Energy]*, 3(62), 49–60 [in Russian].
4. Askarov, R. M., Kitaev, S. V., & Islamov, I. M. (2019). On the technology of identifying pipeline sections with bending stresses when they intersect geodynamic zones. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering]*, 5, 18–25 [in Russian].
5. Babin, L. A., Grigorenko, P. N., & Yarygin, E. N. (1995). *Tipovye Raschety pri sooruzhenii truboprovodov [Typical calculations for the construction of pipelines]*. Moscow: Nedra Publ., 246 p. [in Russian].
6. Dyatlov, V.A. (1984). *Obsluzhivanie i ekspluatatsiya lineynoy chasti magistral'nykh gazoprovodov [Maintenance and operation of the linear part of the main gas pipelines]*. Moscow: Nedra Publ., 240 p. [in Russian].
7. Lazarev, V. M. (2012). Development of an integrated system of geodetic support for geomonitoring of geocological safety in landslide-prone areas. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 4, 65–72 [in Russian].
8. Standarts Russian Federation. (2014). GOST 24846-2012. Soils. Methods for measuring deformations of the foundations of buildings and structures. Moscow: Standartinform Publ., 22 p. [in Russian].
9. Geodetic, Cartographic Instructions, Norms and Regulations. (1999). GKINP (GNTA)-17-004-99. Instructions on the procedure for control and acceptance of geodetic, topographic and cartographic works. Moscow: TsNIIGAiK Publ. [in Russian].
10. Code of Practice. (2016). SP 22.13330.2016. SNiP 2.02.01-83. Foundations of buildings and structures. Updated edition. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia, 220 p. [in Russian].
11. Khoroshilov, V. S. & Kvashenko, I. Yu. (2013). Features of the choice of deformation marks for building a kinematic model when studying the deformations of structures. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 4/S, 58–61 [in Russian].
12. Khimmel'blau, D. (1973). *Analiz protsessov statisticheskimi metodami [Statistical analysis of processes]*. V. G. Gorskogiy (Ed.). V. D. Skarzhinskogiy (Trans.). Moscow: Mir Publ., 957 p. [in Russian].
13. Barliani, A. G. (2016). *Teoriya matematicheskoy obrabotki geodezicheskikh izmereniy: ucheb. posobie [Theory of mathematical processing of geodetic measurements]*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 174 p. [in Russian].
14. Gulyaev, Yu. P., & Khoroshilov, V. S. (2012). *Matematicheskoe modelirovanie. Analiz i prognozirovaniye deformatsii sooruzheniy po geodezicheskim dannym na osnove kinematicheskoy modeli [Math modeling. Analysis and forecasting of deformation of structures using geodetic data based on a kinematic model]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 93 p. [in Russian].
15. Khoroshilov, V. S., Kobeleva, N. N., & Sycheva, N. V. (2019). Mathematical modeling of the high-rise buildings deformation development process in Moscow (Vosstania square). *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 698, P. 044004. doi:10.1088/1757-899X/698/4/044004.
16. Rumshiskiy, L. Z. (1971). *Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta [Mathematical processing of the experimental results]*. Moscow: Nauka Publ., 192 p. [in Russian].

Received 15.02.2021

© V. S. Khoroshilov, A. V. Komissarov, N. N. Kobeleva, 2021