

Новые материалы и технологии

УДК 622.692.4

Создание системы координатно-временного обеспечения магистральных нефтепроводов

Ю.В. Лисин

Рассмотрено построение геодезической сети в виде автоматизированной информационной системы координатно-временного обеспечения трубопроводного транспорта с использованием глобальных навигационных спутниковых систем. Данный прогрессивный метод получения результатов обследования плано-высотного положения трубопроводов обеспечивает оценку запаса прочности и остаточного ресурса трубопровода в режиме мониторинга его состояния. Наибольший экономический эффект от внедрения геодезической сети ожидается при включении ее в состав проекта строящегося трубопровода.

Ключевые слова: нефтепровод, магистральный, плано-высотное положение, геодезическая сеть, автоматизированная информационная система, референсная станция, система отсчета.

Creation of a System for Coordinate and Time Support of Main Oil Pipelines

Y.V. Lisin

The article covers the construction of the geodetic network in the form of an automated information system for coordinate and time support of pipelines with the use of the global navigation satellite systems. This progressive method of obtaining the survey results for the planned-altitudinal position of pipelines provides to estimate the strength margin and residual life of the pipeline in the monitoring mode of its condition. The most significant economic effect from the introduction of the geodetic network is expected when it is involved in the project of the pipeline under construction.



ЛИСИН

Юрий Викторович

кандидат технических наук,
Первый вице-президент
ОАО «АК «Транснефть»

LISIN

Yury Viktorovich

Candidate of Engineering
Sciences,
The First Vice-President
JSC «Transneft»

Keywords: oil pipeline, main, planned-altitudinal position, geodetic network, automated information system, reference station, frame of reference.

Повышение надежности и экологической безопасности трубопроводных систем высокого давления, транспортирующих опасные жидкости и газы на объектах нефтегазового комплекса, — первоочередная задача трубопроводного транспорта. Решение этой сложной комплексной задачи не представляется возможным без внедрения современных методов мониторинга и диагностики трубопроводной системы, предусматривающих всестороннюю оценку ее технического состояния и соответствия текущих параметров проектным значениям.

Подземные магистральные трубопроводы — протяженные объекты, трассы которых прокладываются в разнообразных топографических, геологических, гидрогеологических и климатических условиях, в результате совокупного действия которых труба деформируется вместе с грунтом. Поэтому одним из важных контролируемых параметров является планово-высотное положение (ПВП) линейной части трубопровода. Для фиксации и последующего контроля над изменением ПВП используются высокоточные геодезические методы, обеспечивающие оценку вплоть до сантиметровых и миллиметровых смещений оси трубопровода. Обеспечить единство измерений, их высокую точность и оперативность, а также снизить трудозатраты на каждую измерительную операцию невозможно без создания качественной опорной геодезической сети, использующей наземные и спутниковые методы геодезических измерений и оборудованной современными средствами автоматизации и связи.

Моделирование взаимодействия трубопровода с грунтом. Для описания взаимодействия трубопровода и грунта используют модели сложного нелинейного напряженно-деформированного состояния (НДС) [1]. Модели позволяют оценить фактический запас прочности и остаточный ресурс нефтепровода, а также выявлять и контролировать критические участки сооружения, нуждающиеся в инженерной защите или реконструкции. Напряженно-деформированное состояние трубопровода моделирует-

ся с учетом основных закономерностей взаимодействия системы «атмосфера — грунт — трубопровод — транспортируемый продукт», нелинейного поведения грунта, влияния нагрузок и воздействий на трубу, возможности изменения и перераспределения нагрузок в зависимости от деформации трубопровода и грунта, особенностей конструкции сооружения и ряда других факторов. Одним из наиболее важных параметров, исследуемых при оценке НДС трубопровода, является его ПВП.

Планово-высотное положение трубопровода задается пространственными координатами его оси в контрольных точках. Количество точек, определяющих ПВП, должно быть не меньше числа, предусмотренного нормативными документами, регламентирующими разбивочные работы при выносе трассы трубопровода в натуру [2]. В соответствии с правилами выполнения разбивочных работ контрольные точки определяются не реже чем через каждые 100 м, на отдельных участках — через 10 м и дополнительно в местах изменения направления оси трубопровода, включая точки перегиба на профиле. Отдельного внимания заслуживают участки конструктивных особенностей трубопровода, включая зоны искусственного упругого изгиба и гнутых отводов, для которых геометрия задается не только координатами точек вставки, но и радиусами кривизны.

Потребность в значительном количестве измерений ПВП, обусловленная протяженностью трубопроводов и сложностью грунтовых условий мест их прокладки, определяет необходимость выполнения комплекса предварительных геодезических мероприятий, конечной целью которых является построение геодезической сети [3, 4].

Системы отсчета координат при моделировании напряженно-деформированного состояния трубопровода. Координатно-временным обеспечением трубопроводной системы называется комплекс геодезических мероприятий, направленный на обеспечение информацией о параметрах системы отсчета координат и времени, позволяющий службам эксплуатации определять ПВП с требуемой точностью, оперативностью и надежностью.

Система отсчета координат включает набор геодезических параметров (дат) [5], описывающих отсчетную поверхность и положение элементов системы координат относительно этой поверхности. Физическую реализацию системы отсчета координат обеспечивает размещаемая на местности сеть геодезических пунктов, построенная в виде совокупности взаимосвязанных референцных станций. Одни и те же геодезические пункты могут быть носителями координат различных систем отсчета, что позволяет получать параметры для перехода из одной системы в другую методами проектирования и трансформирования координат.

Практика ведения геодезических работ на линейной части трубопровода свидетельствует о целесообразности применения нескольких связанных между собой систем отсчета координат (внутритрубных; пикетажных; мировых, государственных и местных систем отсчета координат).

Внутритрубная система отсчета координат (отнесенная к внутренней поверхности трубы) позволяет назвать две величины (расстояние от начальной точки вдоль оси трубопровода и угол, отсчитываемый от направления силы тяжести в плоскости перпендикулярной оси), требуемые, например, для указания места размещения дефекта.

Пикетажная система отсчета координат (отнесенная к линии, расположенной на поверхности земли, закрепленной пикетами) позволяет обозначить точку на поверхности земли в пределах охранной зоны трубопровода, указав номер пикета, расстояние вдоль створа пикетов до точки и ее удаление от створа по линии, перпендикулярной створу.

Мировые, государственные и местные системы отсчета координат (отнесенные к поверхности эллипсоидов, являющихся математическими моделями планеты Земля, в целом или отдельной ее части) позволяют указать точку на поверхности земли относительно ближайших пунктов соответственной геодезической сети.

Перечисленные выше системы отсчета координат благодаря набору вычисленных заранее параметров (ключей) могут быть пересчи-

таны, преобразованы и трансформированы по желанию пользователя без потери точности.

В модели, описывающей взаимодействие трубопровода и грунта, внутритрубная система отсчета координат смещается относительно остальных — условно неподвижных. Для связи названных систем отсчета координат требуются специальные марки, закрепленные на поверхности трубопровода и доступные для измерения их координат, как с поверхности земли, так и в процессе внутритрубного диагностирования. Количество закрепляемых на трубопроводе марок в значительной степени зависит от требований к точности измерения значений ПВП и возможностей прибора внутритрубной диагностики.

Таким образом, для описания взаимодействия грунта и трубопровода с помощью математической модели сложного нелинейного напряженно-деформированного состояния необходимо создать сеть геодезических пунктов и марок. Каждый прочностной расчет должен начинаться с измерения пространственного положения марок относительно наземных пунктов геодезической сети.

Геодезическая сеть, обеспечивающая оценку запаса прочности и остаточного ресурса трубопровода в режиме мониторинга его состояния. Геодезическая сеть на магистральном трубопроводе закрепляет единую систему координат (или нескольких связанных между собой систем координат). Точность построения сети должна обеспечивать оценку запаса прочности и остаточного ресурса трубопровода в режиме мониторинга его состояния.

Геодезическая сеть строится вдоль трубопровода в виде связанных с центром обработки данных референцных станций (наземных геодезических пунктов), размещенных в ее узлах, и множества специальных контрольных марок, закрепленных на трубопроводе. В качестве референцных станций используются специализированные геодезические приемники навигационного сигнала глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

Измерение ПВП трубопровода предполагает совместное использование наземных и спутниковых методов, а также передачу данных по

цифровым каналам связи от референчных станций в центр обработки данных и из центра — к подвижным средствам измерения. От используемого в текущий момент времени для измерения ПВП геодезического приемника, оборудованного современной цифровой связью, в центр обработки данных передается информация, необходимая для вычисления точных значений координат.

Чтобы снизить трудозатраты на выполнение геодезических измерений, повысить точность и оперативность измерительных операций необходима автоматизация ряда информационных процессов, в том числе измерений, вычислений, передачи и хранения данных. Все перечисленные функции могут быть реализованы в рамках автоматизированной информационной системы. Автоматизация измерительных операций обеспечивается применением соответствующих геодезических датчиков, например, многочастотных приемников сигналов всех функционирующих ГНСС с внутренней батареей и встроенным модемом, позволяющих выполнять работы в широком температурном диапазоне от -40 до $+65$ °C в любое время суток.

Автоматизированная геодезическая сеть функционирует при условии доступности хотя бы одной составляющей космического сегмента, представленного спутниковыми системами ГНСС, среди которых — российская ГЛОНАСС и американская GPS (Global Positioning System). К вводу в эксплуатацию готовятся европейская система Galileo и китайская Compass (BeiDou). Совершенствование навигационных систем и увеличение их количества обеспечивает возрастание точности и надежности геодезических измерений.

Структурная схема автоматизированной системы для определения ПВП трубопровода с высокой точностью и оперативностью представлена на рис. 1.

Обеспечиваемая полная автоматизация обработки принятой навигационной информации в специальном центре с целью определения ПВП трубопровода позволяет особым образом ввести единую систему координат, как

некую совокупность множества связанных параметрическими преобразованиями систем.

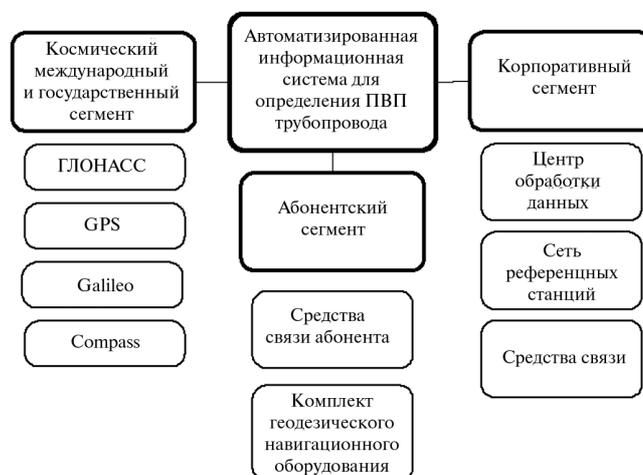


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы для определения ПВП трубопровода

Важным элементом автоматизации системы для определения ПВП трубопровода является цифровая радиосвязь, обеспечивающая функционирование ее элементов с использованием средств и методов вычислительной сети.

Схема объединения элементов геодезической сети в распределенную информационную систему средствами связи приведена на рис. 2. Реализация приведенной на рис. 2 схемы связи обеспечивает:

- высокую скорость измерений за счет возможностей наиболее продуктивного режима измерений в реальном времени;
- повышение точности и надежности определения координат путем использования современного способа обработки навигационного сигнала, названного виртуализацией сети;
- повышение надежности защиты информации, составляющей государственную тайну;
- защиту данных, так как предоставляется возможность производить измерения в местных системах координат.

Таким образом, все перечисленные выше свойства геодезической сети в совокупности с использованием ГНСС и средств связи позволяют реализовать геодезическую сеть в виде автоматизированной информационной системы координатно-временного обеспечения тру-



Рис. 2. Схема распределенной информационной системы для оценки ПВП трубопроводов

бпроводного транспорта. Такое построение геодезической сети позволит службам эксплуатации трубопроводной системы определять ПВП трубопровода с требуемой точностью и оперативностью.

Высокое качество геодезической сети характеризуется:

- стабильностью пространственного положения ее пунктов;
- обеспечением возможности контролировать стабильность пространственного положения пунктов при каждом измерении ПВП трубопровода;
- высокой точностью определения взаимного положения смежных пунктов сети;
- достаточной плотностью пунктов и краткостью промежутка времени, необходимого для измерения координат с высокой точностью;
- простотой и доступностью измерительных операций для персонала эксплуатирующей организации.

Основные технические показатели автоматизированной геодезической сети. В качестве основных выделены показатели автоматизированной геодезической сети, характеризующие точность, плотность пунктов геодезической сети и время, необходимое для проведения измерений с приемлемой точностью при благоприятных условиях. Основные технические показатели автоматизированной геодезической сети представлены в таблице.

Основные экономические и другие показатели автоматизированной геодезической сети. При оценке экономических показателей использовался вариант построения геодезической сети в виде автоматизированной информационной системы координатно-временного обеспечения трубопроводного транспорта с использованием ГНСС. Условия внедрения проекта:

- магистральный трубопровод, проложенный в труднодоступной местности, в сложных климатических и геологических условиях;
- плотность существующей государственной геодезической сети такова, что один пункт ГГС приходится на 60 погонных километров трассы трубопровода;
- вдоль трассы трубопровода повсеместно осуществляется беспроводная цифровая радиосвязь.

Технические характеристики автоматизированной геодезической сети

Наименование показателя	Значение показателя
<i>Точность определения координат¹, мм</i>	
M_1	25
M_2	20
M_3	30
M_4	30
t	40
<i>Плотность пунктов геодезической сети², км</i>	
D_1	30
D_2	5
D_3	0,5
D_4	0,5 на отдельных участках
<i>Время получения координат³, ч</i>	
T_1	3
T_2	0,25
T_3	0,04

Примечание.

¹ Точность определения координат (M_1, M_2, M_3, M_4, t), характеризующаяся величинами средних квадратических погрешностей, соответственно: фазовых центров антенн постоянно действующих референционных станций относительно ближайших пунктов государственной геодезической сети (ГГС); временно действующих референционных станций (реперов) относительно ближайших постоянно действующих референционных станций; пикетов, маркерных пунктов, деформационных марок (элементов трубопровода) относительно ближайших действующих референционных станций.

² Плотность пунктов опорной геодезической сети, заданная расстояниями (D_1, D_2, D_3, D_4) соответственно

между постоянно и временно действующими референсными станциями; между пикетами и маркерными пунктами.

³Время (T_1 , T_2 , T_3), необходимое для получения координат деформационной марки или элемента трубопроводной системы по различным режимам измерений, соответственно: «статика»; «быстрая статика» или «с возвращением»; «короткие остановки».

Для экономической оценки внедрения геодезической сети в виде автоматизированной информационной системы использован такой показатель, как период окупаемости капиталовложений. Расчеты показывают, что названный период существенным образом зависит от интенсивности геодезических работ на линейной части трубопровода. На рисунке 3 показано, что уже при 200 замерах ПВП трубопровода на 100 км трассы в течение года, срок окупаемости капиталовложений не превышает 3 лет.

Среди прочих экономических показателей следует отметить трехкратное снижение стоимости одного измерения ПВП по сравнению с методами, основанными на использовании оптических геодезических приборов, при установленной нормативами плотности опорной геодезической сети (один пункт на 5 погонных километров трассы).

Применяемая для измерений геодезическая аппаратура по сравнению с оптическими геодезическими приборами в меньшей степени зависит от освещенности, метеорологических осадков, силы ветра и температуры воздуха.

Полевые измерения ПВП могут проводиться без риска нарушения правил работы с информацией, составляющей государственную тайну, в местных системах координат, и в то же время без дополнительных затрат могут сводиться в каталогах и выборках в любой геоцентрической системе отсчета, используемой для моделирования взаимодействия грунта и трубопровода на протяженных участках, включая территории на стыке зон влияния местных систем координат.

Автоматизация процесса измерения ПВП позволяет упростить процедуру до такой степени, что она станет доступна обученному персоналу службы эксплуатации трубопровода.

Зависимость периода окупаемости капиталовложений от количества измерений ПВП трубопровода в год на участке длиной 100 км

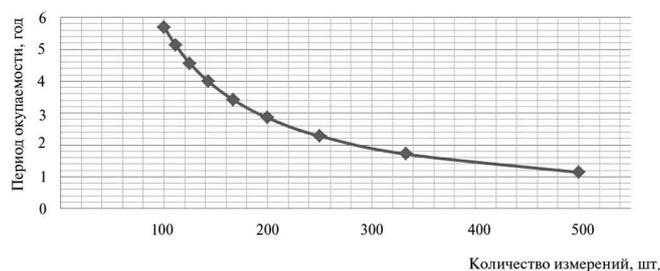


Рис. 3. Характер изменения показателя период окупаемости капиталовложений

Совместный анализ этапов жизненного цикла магистральных трубопроводов и свойств геодезической сети, созданной в виде автоматизированной информационной системы, показывает, что наибольшего экономического эффекта от ее внедрения можно добиться при включении ее в состав проекта строящегося трубопровода.

Выводы

Предложено построение геодезической сети в виде автоматизированной информационной системы координатно-временного обеспечения трубопроводного транспорта с использованием ГНСС, основанной на рациональном сочетании результатов наземных и спутниковых измерений и обеспечивающей тем самым высокую точность и скорость измерений ПВП трубопровода.

Геодезическая сеть трубопроводной системы должна создаваться на этапе проектирования и строительства трубопровода, обеспечивать точность измерений ПВП, регламентируемую нормативными документами, и оценку запаса прочности и остаточного ресурса трубопровода в режиме мониторинга его состояния.

Литература

1. Селезнев В.Е., Алишин В.В., Прялов С.Н. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов; под ред. В.Е. Селезнева. М.: МАКС Пресс, 2009. 436 с.
2. СНиП III-42—80 Магистральные трубопроводы / Госстрой СССР. Введены 01.01.1980. М.: ГУЛ ЦПП, 1998. 54 с.
3. Синев А.И., Никишин В.Б., Чигирев П.Г. Пространственное позиционирование магистральных трубопроводов средствами внутритрубной диагностики // Мат. конф. «ГИС и САПР — технологии при обустройстве и эксплуатации месторождений, решении транспортных задач, в нефтегазовой

геологии, экологии, мониторинге окружающей среды и предотвращения ЧС», 2009. <http://www.gisa.ru/51339.html>

4. Синицын С.С., Имшенецкий С.П. Геодезическое позиционирование объектов трубопроводной системы // Нефтяное хозяйство. 2003. № 10. С. 122–125.

5. Кафтан В.И. Системы координат и системы отсчета в геодезии, геоинформатике и навигации // Геопрофи. 2008. № 3. С. 60–63.

References

1. Seleznev V.E., Aleshin V.V., Prialov S.N. *Osnovy chislenno-go modelirovaniia magistral'nykh truboprovodov* [Numerical simulation of pipelines]. Ed. Seleznev V.E. Moscow, MAKS Press publ., 2009. 436 p.

2. SNiP III-42-80 Magistral'nye truboprovody. Gosstroy CCCR. Vvedeny 01.01.1980 [SNIP III-42-80 Pipelines. Gosstroy CCCR. Entered 01.01.1980]. Moscow. GUL CPP, 1998. 54 p.

3. Sinev A.I., Nikishin V.B., Chigirev P.G. Prostranstvennoe pozitsionirovanie magistral'n truboprovodov sredstvami

vnutritrubnoi diagnostiki [Spatial positioning of pipelines in-line inspection tools]. Materialy konferencii «GIS i SAPR — tehnologii pri obustrojstve i jekspluatacii mestorozhdenij, reshenii transportnyh zadach, v neftegazovoj geologii, jekologii, monitoringe okruzhajushhej sredy i predotvrashhenija ChS» [Proceedings of the conference «GIS and CAD — Technology for development and operation fields, solving transportation problems in petroleum geology, ecology, environmental monitoring and disaster prevention»]. 2009. <http://www.gisa.ru/51339.html>.

4. Sinicyn S.S., Imsheneckij S.P. Geodezicheskoe pozicionirovanie ob'ektov truboprovodnoj sistemy [Geodetic positioning of pipeline system]. *Nefjanoe hozjajstv*, 2003, no. 10, pp. 122–125.

5. Kaftan V.I. Sistemy koordinat i sistemy otscheta v geodezii, geoinformatike i navigacii [Coordinate system and the reference systems in geodesy, geoinformatics and navigation]. *Geoprofi*, 2008, no. 3, pp. 60–63.

Статья поступила в редакцию 06.12.2012

Информация об авторе

ЛИСИН Юрий Викторович (Москва) — кандидат технических наук, Первый вице-президент ОАО «АК «Транснефть» (Россия, 119180, г. Москва, ул. Большая Полянка, д. 57, e-mail: transneft@ak.transneft.ru).

Information about the author

LISIN Yury Viktorovich (Moscow) — Candidate of Engineering Sciences, The First Vice-President JSC «Transneft» (57, Bolshaya Polyanka St., Moscow, 119180, Russia, e-mail: transneft@ak.transneft.ru).