

Существующая геополитическая обстановка в мире требует от ПАО «Транснефть» обеспечения возможности гибкого изменения маршрутов транспортировки нефти. Наиболее перспективным направлением, в связи с большими темпами развития, набранными странами Азиатско-Тихоокеанского региона, является совершенствование нефтепроводной системы в Восточной Сибири. Для реализации этого требования было принято решение о строительстве трубопроводной системы «Восточная Сибирь – Тихий океан», в последующем «Заполярье – НПС Пур-Пе» и «Куюмба-Тайшет».

Строительство нефтепроводных магистралей осуществлялось в крайне сложных природно-климатических и геологических условиях. Более четверти трасс проходят по территориям со скальными породами и песчаниками, 10 % по многолетнемерзлым грунтам, 35% по болотам, поймам рек. Нефтепроводы пересекают 364 реки, в том числе Амур, Алдан, Ангару, Лену, Усть-Илимское водохранилище, Таз, Пур, Тунгуску. Общая протяженность трасс с сейсмичностью более 6 баллов по шкале MSK-64 составляет 2 058 км, при этом для 58 км трасс сейсмичность составляет 9 баллов. Трассы трубопроводов пересекают 21 тектонический разлом (Рисунок 1).



Рисунок 1 – Объекты МН, расположенные в Арктической зоне, и зоне распространения многолетнемерзлых грунтов

В связи с эксплуатацией нефтепроводов в сложных природно-климатических и геологических условиях возникает важнейшая задача по обеспечению экологической безопасности путем снижения риска возможного негативного воздействия на окружающую среду в случае нарушения герметичности нефтепроводов. Криогенные грунтовые процессы, сложный рельеф, низкие температуры, неразвитая инфраструктура - все это потребовало реализации особых технических решений с обеспечением уровня надежности нефтепроводов нового поколения, в том числе контроль их технического состояния в режиме реального времени для предотвращения возможного негативного влияния на хрупкую природу Крайнего Севера.

Эту задачу позволила решить созданная Комплексная система мониторинга технического состояния магистральных нефтепроводов ПАО «Транснефть», расположенных в Арктической зоне и зоне распространения многолетнемерзлых грунтов (далее – Система). Система представляет собой уникальную совокупность функционально взаимосвязанных элементов:

- методов, технических и программных средств, предназначенных для наблюдения, контроля и фиксации состояния нефтепроводов и окружающей среды;
- геотехнических моделей взаимодействия магистрального нефтепровода с окружающей средой;
- методов формирования комплекса мер по управлению техническим состоянием нефтепроводов.

Внедрение Системы соответствует высшему и неперемемному приоритету ПАО «Транснефть» по охране окружающей среды и обеспечению высокого уровня экологической безопасности, путем контроля взаимного влияния природных и технических объектов.

Созданная Система позволила обеспечить не только учет текущего технического состояние объектов нефтепроводов, но и реализовать формирование прогноза изменения параметров внешней среды с учетом техногенного воздействия. Формирование данного прогноза потребовало решения ряда задач в рамках Системы:

- создание сбалансированного комплекса методов наблюдения за нефтепроводом, оптимизированного по стоимости, точности и периодичности с учетом возможных скоростей развития различных негативных изменений в окружающей среде;

- создание единого информационного пространства, включающего всю совокупность данных проектной, исполнительной, эксплуатационной документации; результатов экспериментальных исследований, испытаний, инструментальных измерений и обследований. Полученное единое информационное пространство является фактически цифровым двойником нефтепровода, позволяющим на основании моделирования технического состояния обеспечивать его безаварийную эксплуатацию;

- создание системы автоматизированного анализа параметров окружающей среды, обеспечивающей прогнозирование внешних воздействий на эксплуатируемый нефтепровод на основе обработки ретроспективных данных, получаемых автоматизированными и дистанционными методами обследований;

- создание современных инструментов визуализации и управления информацией в режиме реального времени, методов комплексной обработки результатов обследований и расчетов, позволяющих обеспечивать информационную поддержку принятия решений по формированию оптимальных компенсирующих мероприятий на основе результатов моделирования и прогнозирования состояния нефтепровода (рисунок 2).

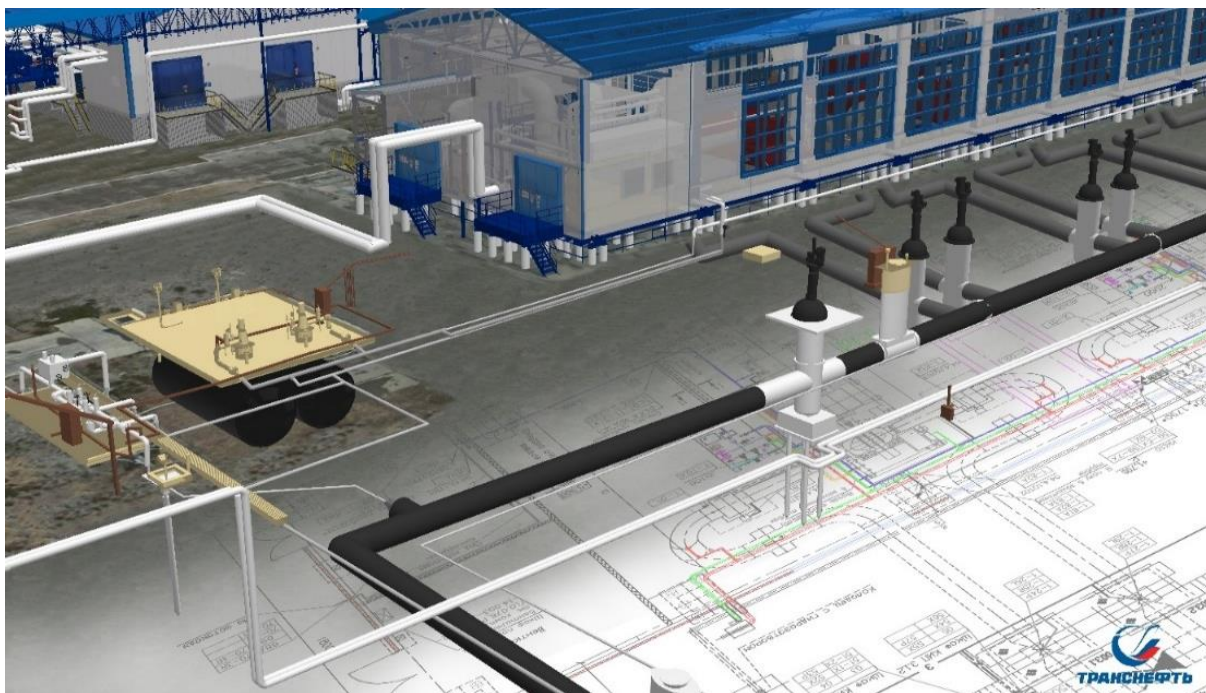


Рисунок 2 – Трехмерная визуализация объектов нефтеперекачивающей станции

Обследования выполняются с применением современных технологий и оборудования (периферийные устройства):

- дистанционное зондирование трассы нефтепроводов (космосъемка, аэрофотосъемка, лазерное сканирование): позволяет на всей протяженности нефтепроводов определять перемещения и деформации объектов нефтепровода, измерять перемещения дневной поверхности земли и определять проявления экзогенных геологических процессов;

- внутритрубные обследования с применением бортовых инерциальных навигационных систем: позволяют определить изменение плано-высотного положения нефтепровода на всем протяжении;

- современные методы геодезических измерений: обеспечивают высокоточное определение перемещений объектов нефтепровода на наиболее ответственных участках и обеспечивают контроль целостности;

- сеть термометрических наблюдений: обеспечивает определение температурного режима многолетнемерзлых грунтов и эффективность реализованных мероприятий по термостабилизации грунтов;

– оптимизированные геологические изыскания: применяются для уточнения фактических грунтовых условий отдельных, потенциально опасных участков трассы нефтепровода, подвергшихся техногенному воздействию;

– контроль работоспособности сезонно действующих термостабилизаторов грунтов (термосифонов): позволяет по данным тепловизионной съемки своевременно выявить устройства, хладопроизводительность которых отличается от проектной;

– контроль уровня грунтовых вод: применяется для своевременного выявления нарушения водного режима грунтов и предотвращения развития экзогенных геологических процессов.

Для взаимной привязки всей поступающей информации и наполнения единого информационного пространства по результатам исследования структуры данных, получаемых от периферийных устройств создана геоинформационная система объектов нефтепроводов (ГИС Мониторинг) (Рисунок 3).

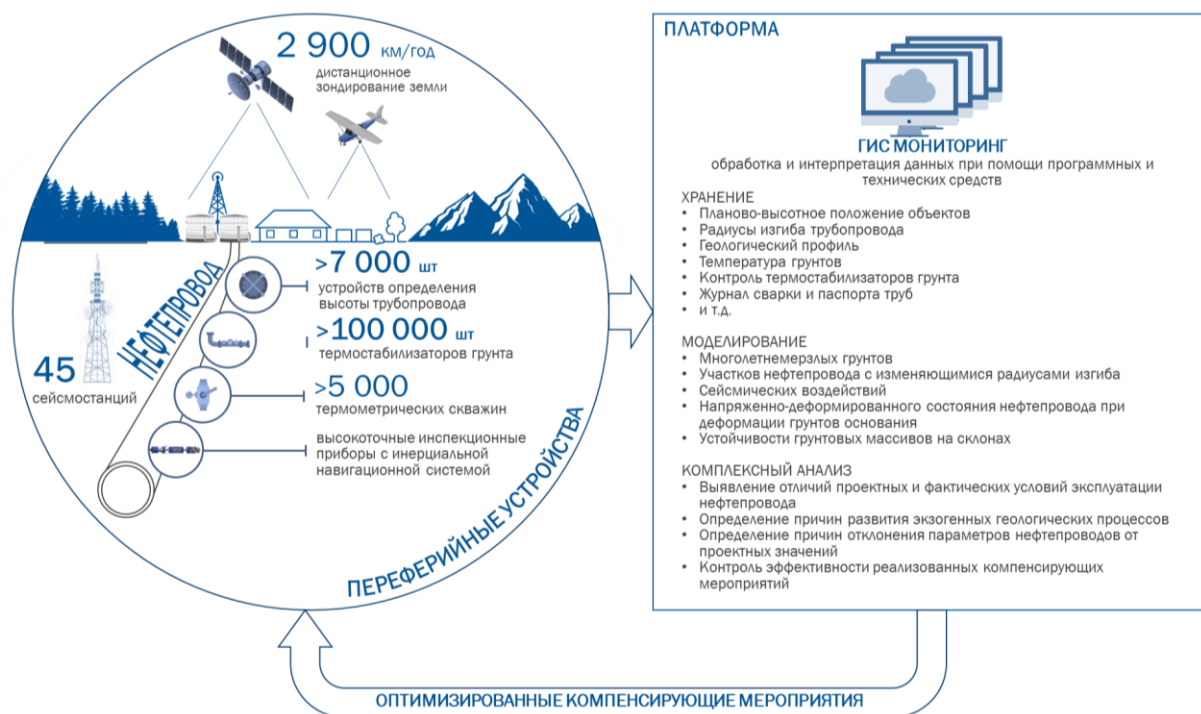


Рисунок 3 – Единый центр интеграции и хранения результатов обследований

Разработаны и интегрированы в геоинформационную систему аналитические и расчетные программные модули. Программные модули вобрали в себя результаты исследований закономерностей в изменении параметров окружающей среды и их влияния на нефтепровод, по результатам которых научно обоснована система математических моделей для оценки текущего и прогнозирования изменения технического состояния магистрального нефтепровода и параметров окружающей среды.

Программные модули позволили автоматизировать решение различных задач:

- подготовка исходных данных и моделирование взаимодействия нефтепровода и окружающей среды на весь период эксплуатации нефтепровода (оттаивание и деформация многолетнемерзлых грунтов; прогнозирование изменения радиусов изгиба оси нефтепровода; нагрузки на нефтепровод при сейсмических событиях; устойчивость грунтовых массивов на склонах; нагрузки на нефтепровод при деформации грунтов основания);

- автоматическая обработка больших массивов данных (обработка облаков точек лазерного отражения по результатам воздушного и наземного лазерного сканирования; анализ результатов внутритрубной диагностики; обработка тепловизионных снимков для контроля работы термостабилизаторов грунтов);

- автоматизация планирования и контроля выполнения работ в рамках программ мониторинга и реализации компенсирующих мероприятий.

Созданный в рамках Системы цифровой двойник магистральных нефтепроводов «ВСТО», «Заполярье – НПС Пур-Пе», «Куюмба-Тайшет», позволяет в режиме реального времени на основании сбора необходимого и достаточного объема информации прогнозировать изменение состояния нелинейной системы «нефтепровод - окружающая среда» и обеспечивать

поддержку принятия эффективных управленческих решений по приведению нефтепроводов в нормативное состояние (Рисунок 4).

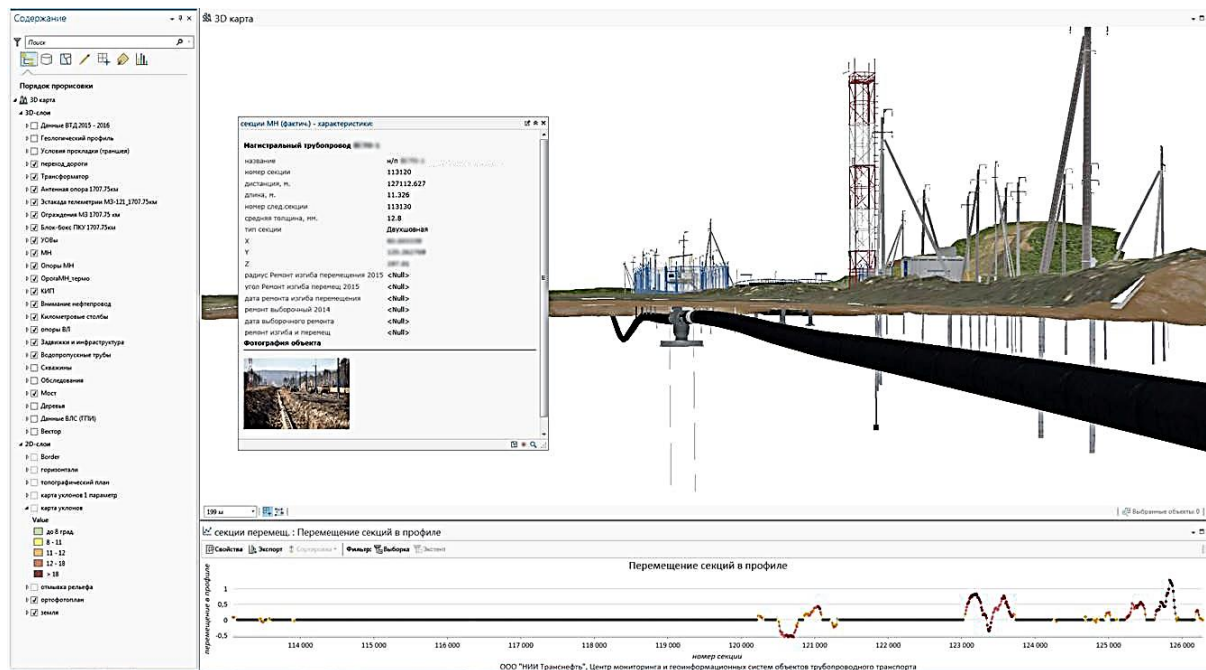


Рисунок 4 – Пример рабочего окна корпоративной геоинформационной системы

Для контроля участков нефтепровода, на которых возможны внешние воздействия, связанные с мгновенно протекающими процессами (оползни, сейсмическая активность, тектонические разломы) созданы в дополнение к основной платформе следующие автоматизированные системы контроля:

- сейсмических воздействий, обеспечивающая в реальном времени идентификацию сейсмического события, определение его параметров и расчет нагрузок на нефтепровод и объекты нефтеперекачивающих станций;
- оползнеопасных участков, которая в автоматическом режиме на основании измерений уровня грунтовых вод и подвижек грунта инклинометрами, установленными на склонах, выполняет оценку текущей устойчивости потенциально опасного склона;
- нефтепровода на участках с тектоническими разломами, обеспечивающая в реальном времени определение напряженно-деформированного состояния нефтепровода.

При создании Системы проведено 14 научно-исследовательских работ, 3 опытно-конструкторские работы, 12 технологических работ. По результатам научных исследований опубликовано 153 работ, из них 12 монографий и 141 статья, получено 6 патентов на изобретения, 1 патент на полезную модель, 11 свидетельств на регистрацию баз данных и 29 свидетельств на регистрацию программ для ЭВМ. Разработан и читается спецкурс «Мониторинг нефтепроводов на территории распространения вечной мерзлоты» для студентов-магистрантов геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Разработаны 24 отраслевых нормативных документа.

Результаты работ по отдельным методикам, применяемым в геотехническом мониторинге, стали их лауреатами в 2019 – 2022 годах пяти международных конкурсах, проводимых при поддержке Правительства Российской Федерации.

Достигнутый экономический и социальный эффект от внедрения.

Безопасную эксплуатацию нефтепроводов в сложных природно-климатических условиях возможно обеспечить двумя вариантами:

Вариант № 1: выделение из всех потенциально опасных участков нефтепровода тех участков, на которых фактически есть предпосылки к развитию недопустимых нагрузок на нефтепровод с проведением на них компенсирующих мероприятий. При этом на остальных потенциально опасных участках выполняется инструментальный контроль;

Вариант № 2: реализация специальных технических решений (теплоизоляция, термостабилизация, установка опор) на всех потенциально опасных участках нефтепровода.

Первый вариант и реализован путем внедрения Системы, поэтому для оценки экономического эффекта от внедрения Системы сравним стоимость реализации обоих вариантов.

Сумма затрат на реализацию варианта №1 - 238 356,74 млн.руб.

Сумма затрат на реализацию варианта №2 - 342 999,10 млн.руб.

Вычтя из стоимости реализации варианта № 2 стоимость реализации варианта №1 получаем значение экономического эффекта:

$$Z_{\text{потенц}} - Z_{\text{факт}} = 342\,999,10 - 238\,356,74 = 104\,642,36 \text{ млн.руб.}$$

При общей стоимости строительства линейной части трубопровода «ВСТО-1» в ценах 2021 года 2 243 324,36 млн. руб. экономический эффект составил 4,66 % от стоимости объекта или 38 млн. руб. на 1 км трассы.

Кроме прямого экономического эффекта, внедрение Системы позволило получить и ряд социальных эффектов, в том числе:

- реализовать технологическую независимость автоматизированных геодезических сетей;
- своевременно выявить и предотвратить 64 потенциально опасных инцидентов путем опережающего ремонта участков нефтепроводов с ненормативными радиусами изгиба оси нефтепровода;
- внедрить на нефтепроводном транспорте технологию наземного и воздушного лазерного сканирования;
- внедрить на нефтепроводном транспорте геоинформационные технологии.