

УДК 621.643.053-192

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ НА ИНВЕСТИЦИОННОЙ СТАДИИ НАДЁЖНОСТИ
ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

*канд. техн. наук, доц. В.К. ЛИПСКИЙ, А.Г. КУЛЬБЕЙ
(Полоцкий государственный университет),
д-р техн. наук, проф. Г.Г. ВАСИЛЬЕВ*

(Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина)

Рассмотрен вопрос обеспечения на инвестиционной стадии надёжности подводных переходов трубопроводов. Предложена модель надёжности их функционирования.

Введение. Длительный срок эксплуатации и высокие требования к экологической безопасности объектов трубопроводного транспорта ставят в ряд важнейших задач вопросы обеспечения уже на прединвестиционной и инвестиционной стадиях жизненного цикла трубопроводов их надёжной и безотказной работы, предупреждения и снижения количества аварийных ситуаций, разработки эффективных методов ликвидации последствий аварий [2].

Оценка последствий произошедших аварий - наиболее продвинутая стадия в исследованиях данной проблемы, которые обобщены в Методике определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных трубопроводах [8].

В то же время задачи прогнозирования экологических и социальных последствий возможных аварий и связанные с ней вопросы обслуживания трубопроводов разработаны недостаточно глубоко - методология прогностических средств находится лишь в начальной стадии своего становления. Одним из вариантов решения данной задачи является фрагментация трассы трубопровода на линейные объекты по геоландшафтным признакам с целью ранжирования участков магистрального трубопровода как по их техническому состоянию, так и по возможным экологическим и социальным последствиям аварий [5, 6]. От корректности решения этой задачи зависит уровень рационального планирования капитального ремонта линейной части магистральных трубопроводов, декларирования промышленной и экологической безопасности его объектов, разработка планов ликвидации аварий для аварийных служб и т.д.

При фрагментации трассы трубопровода на линейные объекты особое внимание должно быть уделено участкам подводных переходов магистральных трубопроводов (ППМТ), на которых, в силу особенностей их конструкции и условий работы, существуют предпосылки возникновения наиболее тяжёлых последствий при возможных авариях [3,4].

Характеристики подводных переходов магистральных трубопроводов. При строительстве линейно протяжённых объектов (трассы газопроводов, нефтепроводов, водопроводов, продуктопроводов, а также линии связи) часто приходится пересекать естественные препятствия в виде водных объектов: малых и крупных рек, ручьёв и т.п. Сведения о количестве пересечений магистральными трубопроводами Беларуси водных объектов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Пересечения трасс трубопроводов с естественными препятствиями в Республике Беларусь

| Подводные переходы магистральных трубопроводов | Количество крупных переходов | Количество ниток подводных переходов | В том числе через реки | Пересечено ручьёв |
|--|------------------------------|--------------------------------------|---|-------------------|
| Нефтепроводов | 18 | 35 | Западная Двина, Дисна, Днепр, Сож, Припять, Горынь, Ствига, У борть, оз. Глинницкое | 261 |
| Нефтепродуктопроводов | 8 | 16 | Припять, Днепр, Сож, Бесядь, Дисна | 72 |
| Газопроводов | 57 | 83 | Припять, Днепр, Сож, Березина, Свислочь, Неман, Щара | 314 |
| ВСЕГО | 83 | 134 | | 647 |

Известно [5], что последствия аварий на магистральных трубопроводах проявляются в различных сферах: экономической, социальной и экологической. При авариях на газопроводах их последствия наиболее сильно проявляются в экономической и социальной сферах; на нефтепроводах и нефтепродуктопроводах - экологической. Аварии на подводных переходах, вне зависимости от вида магистрального трубопровода, всегда создают более тяжёлые экономические последствия из-за сложности ликвидации аварий. Аварии на нефтепроводах и нефтепродуктопроводах приводят к попаданию нефти и нефтепродуктов в водные объекты. При этом зона загрязнения распространяется на расстояние несколько километров от места попадания нефтепродуктов в водную среду. С момента утечки нефти до начала работ по локализации и ликвидации нефтяного загрязнения распространение ее по водоему обычно уже завершается, т.е. зона загрязнения приобретает почти максимальные размеры и определенную форму. Распро-

странение пролитой нефти в условиях водоема происходит в основном под воздействием течения, ветра, колебаний уровня воды и имеет свои особенности [1].

Условия обеспечения надёжности подводных переходов магистральных трубопроводов. При рассмотрении задачи по оценке безопасности подводных переходов магистральных трубопроводов предлагается использовать модель надёжности функционирования подводных переходов магистральных трубопроводов [4], которая включает в себя следующие параметры:

- проектные и конструктивные решения подводного перехода;
- условия эксплуатации и состояние окружающей среды;
- возможные варианты развития аварийной ситуации и варианты последствий аварий.

Функционирование модели неосуществимо без учета изменений состояния окружающей среды за всё время существования ППМТ, а также без учета их начального состояния. Поэтому необходимо решить два основных вопроса:

- организация мониторинга состояния подводных переходов магистральных трубопроводов;
- сохранение (при сооружении) уровня качества ППМТ, заложенного в проекте.

При мониторинге подводных переходов магистральных трубопроводов большое внимание необходимо уделять проведению наблюдений и контролю за загрязнением окружающей природной среды вредными веществами, особенно на этапе сооружения, что играет решающую роль при планировании и проведении природоохранных мероприятий.

В структурном отношении мониторинг экологического состояния должен включать в себя следующие основные направления:

- наблюдение за состоянием природной среды, факторами, воздействующими на окружающую среду;
- оценка фактического состояния природной среды;
- прогноз и оценка возможных изменений в состоянии окружающей среды;
- контроль за источниками воздействия на природную среду объектов магистрального трубопровода;
- проверка соблюдения нормативов предельно допустимых выбросов (ПДВ) и предельно допустимых сбросов (ПДС);
- контроль загрязнения атмосферного воздуха и проверка обеспечения предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ;
- сбор, обработка и хранение информации;
- подготовка документации о величине выбросов и сбросов по формам статистической отчетности;
- передача информации в информационно-аналитические центры;
- анализ текущей информации, составление долгосрочного экологического прогноза;
- подготовка предложений по планированию и ведению природоохранной деятельности.

Качественное выполнение гидрологических наблюдений должно быть обеспечено функционированием в течение всего периода эксплуатации подводного перехода планово-высотной геодезической сети. На основании материалов гидрологических наблюдений и русловых съемок дна на участке подводного перехода должны определяться данные высотных и плановых деформаций дна и берегов за период эксплуатации перехода и проводиться оценка надёжности и эффективности креплений береговых склонов.

Для поддержания высокого уровня надёжности подводного перехода необходимо отдельно осуществлять контроль по критериям [10], позволяющим определить предельное состояние подводного перехода (табл. 2).

Таблица 2

Критерии предельных состояний подводных переходов магистральных трубопроводов

| Неисправное состояние | Предельное состояние |
|--|--|
| Размыв берегов. | Обнаженные и провисающие участки свыше 70 % критической длины. |
| Понижение отметок дна в зоне перехода свыше 0,5 м. | Наличие вибрации трубопровода под воздействием течения. |
| Наличие незначительных механических повреждений. | Наружная коррозия, превышающая 12 % от проектной. |
| Обнаженные и провисающие участки. | Наличие трещин и мест утечки газа. |
| Повреждения изоляции. | Отсутствие части балластных грузов и значительные нарушения в их расположении. |
| Наружная коррозия, не превышающая 12 % от проектной. | Значительные повреждения крепления берегов с оголением трубопровода |
| Нарушение устойчивости балластных грузов. | |
| Неисправность или отсутствие береговых информационных знаков и реперов | |

В несущих элементах подводных переходов могут реализовываться различные предельные состояния как в отдельности, так и в совокупности своих комбинаций.

Подходы к обеспечению надёжности. Предлагаемая модель надёжности функционирования ППМТ представлена на рис. 1, где указаны связи структурных компонентов, влияющих на надёжность функционирования подводных переходов магистральных трубопроводов.

Состав и содержание структурно-функциональных элементов управления надёжностью подводных переходов магистральных трубопроводов приведены на рис. 2.

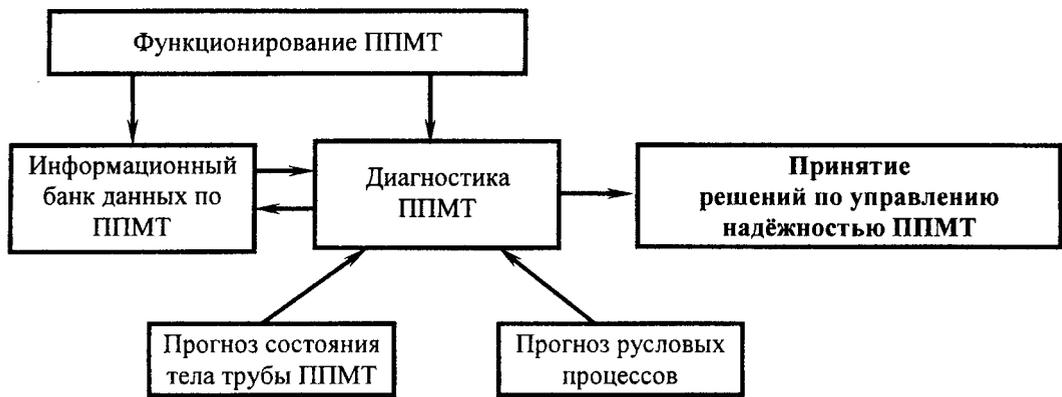


Рис. 1. Модель надежности функционирования подводных переходов магистральных трубопроводов

Функционирование подводных переходов магистральных трубопроводов

- Данные по рабочему давлению в трубопроводе
- Данные о напряженном состоянии тела трубы ППМТ
- Данные о глубине заложения ППМТ
- Данные о толщине стенки трубопровода

Информационный банк данных

- Проектные данные
- Характеристика начального уровня надёжности, заложенного при строительстве
- Данные о гидротехническом вмешательстве*
- Данные по гидрологии, топографии, русловым процессам*
- Данные по авариям и ремонтам ППМТ
- Эталонная и фактическая надёжность ППМТ
- Дополнительные данные*

Диагностика

- Прогноз состояния тела трубы
 - Обнаружение и оценка опасности дефектов
 - Прогнозирование возникновения предельных состояний
 - Вероятностная оценка работоспособности ППМТ
 - Центрификация диагностических обследований ППМТ
 - Определение наиболее эффективных технологий и технологических средств диагностики
- Прогноз русловых процессов
 - Переформирование состава донных отложений
 - Движение наносов
 - Деформации русла (плановые и глубинные)

Принятие решений

- Выбор рациональных режимов эксплуатации ППМТ
- Планирование технического обслуживания
- Анализ отказов и дефектности ППМТ
- Моделирование сценариев развития аварийных ситуаций
- Вывод ППМТ в ремонт
 - Разработка схем производства работ
- Определение приоритетов ремонта ППМТ
 - Построение календарных и финансовых планов выборочного ремонта
- Вывод из эксплуатации
 - Консервация
 - Ликвидация

Рис. 2. Структурно-функциональные элементы управления надёжностью подводных переходов

* Факторы, приведенные на рис. 2 и в табл. 3, – это факторы, влияющие на функционирование подводных переходов магистральных трубопроводов.

Более детальное описание структурно-функциональных элементов управления надёжностью подводных переходов приведено в табл. 3.

Таблица 3

Расшифровка структурно-функциональных элементов

| Функционирование подводных переходов магистральных трубопроводов | |
|---|---|
| Данные по рабочему давлению в трубопроводе | Рабочее давление является, с одной стороны, технологическим параметром, от которого зависит объем перекачки по данному трубопроводу, а с другой стороны - определяет напряженное состояние тела трубы |
| Данные о напряженном состоянии тела трубы подводных переходов магистральных трубопроводов | Напряженное состояние зависит от внешних и внутренних усилий, действующих на тело трубы (вместе с пределом прочности материала трубопровода показывает возможность его функционирования) |
| Данные о глубине заложения подводных переходов магистральных трубопроводов | Согласно действующей нормативной документации, трубопровод должен быть заглублен на глубину 1,1 м ниже линии возможного размыва |
| Данные о толщине стенки трубопровода | Толщина стенки трубопровода является определяющим фактором возможности эксплуатации трубопровода по нормативным документам, а также определяющим фактором напряженного состояния трубопровода |
| Информационный банк данных | |
| Данные по гидрологии, топографии, русловым процессам* | Требуются для получения общей картины влияния внешних факторов (например, течения и характеристики грунта) на общее положение трубопровода, а также для выявления наибольших опасностей, которым подвергается трубопровод |
| Данные о гидротехническом вмешательстве* | Во время строительства подводного перехода происходит нарушение подводного и прибрежного ландшафта, разрыхление слежавшегося грунта, находящегося непосредственно в траншее и около неё. Обычно гидротехническое вмешательство несет отрицательный эффект с точки зрения надежности дальнейшей эксплуатации подводного перехода, так как нарушенный грунт легче подвергается размыву потоком реки |
| Проектные данные* | Предусматривается включение данных о проектной толщине стенки трубы, проектных давлениях трубопровода (рабочем и давлении испытания), профиль перехода с указанием изотак скорости течения, проектная глубина заложения, данные о характеристиках используемой стали, марке труб и заводе-изготовителе, данные о изоляции и установках электрохимической защиты, грунтах в районе прохождения трассы и т.д., знаках закрепления трубопровода |
| Данные по авариям и ремонтам подводных переходов | Включаются данные по всем авариям и инцидентам, произошедших на подводных переходах вообще, т.е. данные о характере ремонтных мероприятий, производимых на подводном переходе (берегоукрепление, подсыпка, ремонт изоляции и установок катодной защиты, данные о ремонтах тела трубы). Эти сведения позволят анализировать весь перечень опасностей, которым подвержен подводный переход |
| Эталонная и фактическая надежность подводных переходов | Сравнение эталонной надежности (надежности, заложенной в проекте подводного перехода) с его фактической надежностью (которая должна определяться периодически, желательно - ежегодно). Производя сравнение ежегодных характеристик (параметров) с эталонными, можно заключить вывод о текущем состоянии подводного перехода и, кроме того, получить прогноз об изменении состояния подводного перехода с целью определения сроков следующего вывода подводных переходов в ремонт (в балансе предприятия, эксплуатирующего подводный переход - это заложение расходов в смету на следующий год) |
| Дополнительные данные* | Фиксируется наличие у подводных переходов специфических особенностей. Сюда же должны быть включены данные об антропогенной активности на водоеме (для реки - выше и ниже по течению), т.е. наличие населенных пунктов, предприятий, мостов, портов при судоходности реки. На сегодняшний день остается открытым вопрос о протяженности зоны влияния вверх и вниз по течению реки, о которой должна собираться информация. Антропогенные факторы выше по течению могут быть причиной аварии на подводных переходах, а населенные пункты, предприятия и т.д. ниже по течению могут оказаться реципиентами в результате аварии на подводном переходе |

Продолжение табл. 3

| Диагностика (прогноз состояния тела трубы) | |
|---|--|
| Обнаружение и оценка опасности дефектов | Своевременное обнаружение дефекта позволит избежать или предупредить (при помощи своевременного ремонта) процессы разрастания (увеличения) дефекта и не приведет к возникновению аварийной ситуации |
| Прогнозирование возникновения предельных состояний | Расчет нагрузок и воздействий на тело трубы позволит (с учетом установленного характера и скорости их изменения) определить время наступления второго и третьего предельных состояний (потеря устойчивости и возникновение трещин) согласно теории прочности твердых тел. Расчет по первому предельному состоянию (разрушению оболочки) не производится, так как оно наступает позже второго и третьего предельных состояний и его наступления считается недопустимым. Потеря устойчивости трубопровода связана с размывом бронирующего слоя грунта, а возникновение макротрещин связано с коррозионным растрескиванием трубы под напряжением. Это же прогнозирование позволит определить остаточный ресурс секции подводного перехода |
| Вероятностная оценка работоспособности подводных переходов | Составление прогноза о возникновении предельных состояний и оценки остаточного ресурса, базирующегося на аналитическо-вероятностном подходе |
| Центрификация диагностических обследований подводных переходов | Данные о диагностических исследованиях должны храниться не только у предприятия, эксплуатирующего данный трубопровод, но и научных центрах (например, функционирующем при Проматомнадзоре Республики Беларусь), что позволит получить общую картину состояния подводных переходов магистральных трубопроводов для различных диаметров, транспортируемого продукта, климатических условий эксплуатации. В дальнейшем, проводя исследования по таким обобщенным данным, можно более точно производить прогнозирование возникновения предельных состояний для конкретного подводного перехода магистральных трубопроводов |
| Определение наиболее эффективных технологий и технологических средств диагностики | Ранжирование технологий и технологических средств по критерию эффективности наиболее объективно сможет провести научный центр, где будет скапливаться информация о достоверности диагностических выводов предприятий и организаций, предлагающих свои услуги (технологии, технические средства) в области диагностики состояния подводных переходов магистральных трубопроводов |
| Диагностика (прогноз русловых процессов) | |
| Переформирование состава донных отложений | В процессе строительства происходит изъятие грунта из траншей подводных переходов, а после укладки нитки трубопровода, траншея (наиболее часто) заполняется привозным грунтом. Привозной и находящийся рядом естественный грунты имеют различную склонность к размыву, из-за чего происходит переформирование состава донных отложений в створе подводных переходов |
| Движение наносов | Движение наносов является естественным процессом, который характерен для всех рек. Характер движения наносов для различных подводных переходов неодинаков: на некоторых участках происходит размыв наносов с последующим оголением трубопровода, на некоторых - наоборот, происходит намыв донных отложений. Характер движения наносов зависит от ряда факторов (например - распределения скорости течения по сечению реки, разности значений крупности отложений в створе перехода и на участках выше и ниже по течению, характеристик паводков, типа меандрирования реки и многих других) |
| Деформации русла (плановые и глубинные) | Подводные переходы эксплуатируются на протяжении нескольких десятков лет, а за это время русло реки претерпевает значительные как плановые, так и глубинные деформации. Их величина зависит от конкретной гидрологической ситуации, также от типа меандрирования реки, распределения скорости течения по сечению реки, крупности донных отложений, прибрежных грунтов и ряда других факторов |

Продолжение табл. 3

| Принятие решений | |
|--|--|
| Выбор рациональных режимов эксплуатации подводных переходов | Соблюдением режима эксплуатации можно добиться снижения цикличности нагрузок, которые возникают при падении/увеличении рабочего давления |
| Планирование технического обслуживания | Изменение периодичности и полноты технического обслуживания |
| Анализ отказов и дефектности подводных переходов | Анализ отказов и дефектности подводных переходов позволит выявить наиболее опасные внешние факторы, снижающие надёжность подводных переходов |
| Моделирование сценариев развития аварийных ситуаций | При помощи моделирования сценариев развития аварийных ситуаций и их анализа можно выявить наиболее опасные места и разработать меры по снижению ущербов аварии |
| Вывод подводных переходов в ремонт | Принятие решения о выводе подводных переходов в ремонт |
| Разработка схем производства работ | Принятие схем, наиболее удобных к внедрению на данном подводном переходе |
| Определение приоритетов ремонта подводных переходов | На основании полученных данных по состоянию ряда подводных переходов, возможно их ранжирование по степени аварийной опасности и выбор первоочёрдности их ремонта |
| Построение календарных и финансовых планов выборочного ремонта | Построение календарных и финансовых планов выборочного ремонта |
| Вывод из эксплуатации | Проработка последних стадий жизненного цикла подводного перехода |
| Консервация | Консервация подводного перехода |
| Ликвидация | Ликвидация подводного перехода |

К факторам, возникающим на *прединвестиционной стадии* и определяющим проектный уровень надёжности, относятся проектные решения о рабочем давлении подводных переходов, проектной глубине заложения, характеристиках используемой стали, марках труб и изготовителе труб, изоляции и способах электрохимической защиты.

К факторам, возникающим на *инвестиционной стадии и определяющим уровень надёжности*, относится фактор гидротехнического вмешательства в зоне сооружения подводного перехода. Обычно оно несет отрицательный эффект с точки зрения надёжности дальнейшей эксплуатации подводного перехода, так как нарушенный при сооружении грунт легче подвергается размыву потоком реки, что приводит к неисправному состоянию подводных переходов (согласно критериям предельных состояний ППМТ, указанных в табл. 2). Другим важным фактором является недопущение ошибок при сооружении подводных переходов и сохранение уровня надёжности, заложенного на прединвестиционной стадии.

Таким образом, до момента введения трубопровода в эксплуатацию, обязательным является обеспечение уровня проектной надёжности и избежание фактора гидротехнического вмешательства.

Фактор гидротехнического вмешательства неизбежен при использовании традиционных способов сооружения ППМТ.

Традиционные траншейные способы строительства предусматривают разработку открытой траншеи. В результате происходит нарушение верхнего почвенного слоя; прекращение передвижения людей, транспорта и животных в зоне ведения работ; смену темпа строительства и техники при пересечении коммуникаций и использование спецоборудования и спецтехнологий при сооружении переходов через водные объекты. Кроме того, имеют ряд других недостатков по сравнению с более передовым методом горизонтально-направленного бурения [2, 7, 9]:

- сложность обхода препятствий по предполагаемой трассе, в том числе ранее проложенных коммуникаций;
- необходимость восстановления нарушенного верхнего слоя, участков дорог, предметов городской инфраструктуры;
- большой объем земляных работ, в том числе дорогостоящих подводных земляных работ;
- длительные сроки строительства.

Применение метода направленного бурения, который в настоящее время начинает вытеснять траншейный способ сооружения подводных переходов, позволяет существенно сократить сроки строительства и объем земляных работ, создает предпосылки для круглогодичного строительства и не оказывает отрицательного воздействия на состояние водоема, наземной и подземной инфраструктуры [7, 11]. Метод позволяет не принимать во внимание фактор подземных вод, что создает уникальную возможность прокладки коммуникаций в грунтах с высоким их уровнем, через природные образования, под реками, озерами, а также в местах, где отсутствует возможность внешних экскаваций. В то же время нужно

отметить, что существующая в Республике Беларусь нормативная база существенно отстаёт от новейших технологий, что сдерживает развитие прогрессивных технологий, одной из которых является метод горизонтально направленного бурения.

Закключение. В инвестиционный период закладывается не только первоначальный уровень надёжности подводного перехода, но и создаются предпосылки возникновения аварийных ситуаций в период его эксплуатации. На основании устранения выделенных в модели надёжности функционирования ППМТ факторов, негативно влияющих на работу подводного перехода, можно производить повышение надёжности его функционирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Владимиров А.М. Охрана окружающей среды. - Л.: Гидрометиздат, 1991.
2. Управление проектами трубопроводного строительства / Ю.А. Горяинов, Г.Г. Васильев, А.М. Реватов и др.; Под общ. ред. Ю. А. Горяинова. - М.: Лори, 2001. - 315 с.
3. Кульбей А.Г. Надёжность подводных переходов магистральных трубопроводов // Безопасность и надёжность трубопроводного транспорта: Сб. науч. тр. - Новополоцк: ПГУ, 2003.
4. Кульбей А.Г. Проблемы обеспечения надёжности при эксплуатации подводных переходов магистральных трубопроводов // Проблемы и методы обеспечения надёжности и безопасности объектов трубопроводного транспорта углеводородного сырья: Сб. тез. докл. науч.-практ. конф. - Уфа: ТРАНСТЭК, 2004.
5. Липский В.К. Система защиты водных объектов от загрязнения при авариях на магистральных нефтепроводах Беларуси // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Прикладные науки. - 2002. - Т. 1, № 2. - С. 3-16.
6. Кутуков С.Е. Информационно-аналитические системы магистральных трубопроводов. - М.: СИП РИА, 2000.-324 с.
7. Прокладка подземных коммуникаций через препятствия методом горизонтального направленного бурения / В.К. Липский, А.Г. Кульбей, Г.Г. Голуб, Н.Н. Савицкий // II междунар. эколог. симпоз. в городе Полоцке: Тез. докл. Т. I. - Полоцк: ПГУ, 2005.
8. Методика определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных трубопроводах: Утв. Минтопэнерго Российской Федерации 1 ноября 1995года. - Уфа: ИПТЭР, 1995.
9. Сооружение подводных трубопроводов / Б.В. Самойлов, Б.И. Ким, В.И. Зоненко, В.И. Кленин: Учеб. пособие для вузов. - М.: Недра, 1995.
10. Системная надёжность трубопроводного транспорта углеводородов / В.Д. Черняев, К.В. Черняев, В.Л. Березин и др.; Под ред. В.Д. Черняева. - М.: Недра, 1997.
11. Сооружение подводных переходов газонефтепроводов методом наклонно-направленного бурения / О.Н. Благов, Г.Г. Васильев, Ю.А. Горяинов и др. -М.: Лори, 2003.