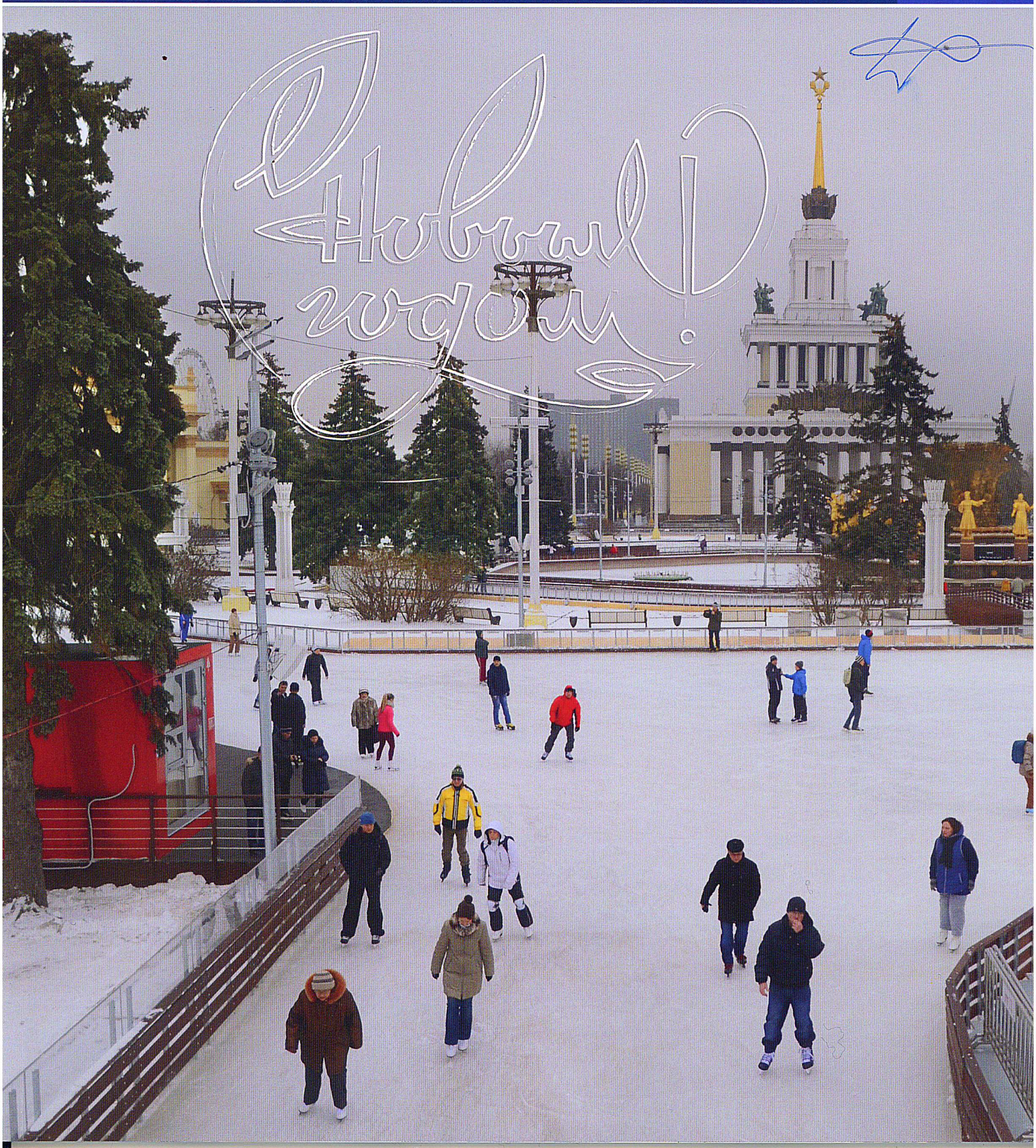
БЕЗОПАСНОСТЬ труда в промышленности

№ 12 2014

Ежемесячный научно-производственный журнал www.btpnadzor.ru

ISSN 0409-2961



УДК 621.643
© Коллектив авторов, 2014

Перспективы применения труб с защитным бетонным покрытием на опасных производственных объектах трубопроводного транспорта

И.И. Шапорин,
председатель совета директоров

С.В. Меликов,
канд. техн. наук, директор по стратегии и технологиям

ООО «БТ СВАП»

Ю.Ф. Карабанов,
канд. техн. наук, зав. отделом

А.С. Печёркин,
д-р техн. наук, проф., ген. директор

АНО «Агентство исследований промышленных рисков»

НП «Группа компаний «Промышленная безопасность»

Рассмотрены возможности и перспективы применения труб с защитным универсальным бетонным покрытием на опасных производственных объектах трубопроводного транспорта, а также направления исследований по оценке противоаварийной устойчивости таких труб к внешним воздействиям.

The Article reviews the possibilities and perspectives for the use of pipes with a protective concrete coating at hazardous production facilities of pipeline transport, as well as areas of research on the assessment of emergency resistance of such pipes to external effects.

Ключевые слова: авария, внешние воздействия, трубопровод, защитное бетонное покрытие, опасный производственный объект, оценка устойчивости, промышленная безопасность.

Трубопроводы — один из наиболее экономичных видов транспорта опасных веществ, а в случае транспортирования веществ в газообразном состоянии под давлением — единственный разумный. В то же время аварии при таком способе транспортирования, который характеризуется на практике «бесконечностью» источника выброса опасного вещества, могут нанести (и наносят — достаточно вспомнить уфимскую аварию 1980 г.) значительный ущерб. Отсюда понятно внимание, уделяемое различным аспектам анализа риска аварий и безопасности при проектировании, строительстве и эксплуатации магистральных трубопроводов (МТ) [1–7].

Наибольшую опасность в плане возможных аварий и их последствий представляют трубопроводы опасных веществ: нефти, природного газа, светлых нефтепродуктов, аммиака, этилена, широкой фракции легких углеводородов и пр. Они проходят в самых разных климатических, геологических условиях, вблизи населенных пунктов, через автомобильные и железные дороги, через естественные и искусственные водные объекты, по землям особо охраняемых природных территорий, через участки высокой и повышенной коррозионной опасности. Такие участки (повышенной опасности) требуют применения специальных дополнительных мер защиты, поскольку на них высока вероятность аварий, приводящих к масштабным негативным последствиям.

Защитные свойства бетонного покрытия труб, используемого в настоящее время в основном при прокладке трубопроводов (нефте-, газо-, продуктопроводов) под водой для их утяжеления, позволяют существенно расширить спектр его применения, например при прокладке трубопроводов на суше для снижения негативных последствий возможных внешних воздействий. Рассмотрим возможное применение защитного универсального бетонного покрытия для МТ, которые относят к опасным производственным объектам [8]. Основные аспекты описываемых технических защитных мер на МТ могут быть применены и для других групп трубопроводов: промысловых, технологических, распределительных.

Представление об авариях (причинах, частоте, масштабах) на МТ дают результаты обработки статистических данных, содержащихся в различных отечественных (например, годовые отчеты Ростехнадзора и данные, публикуемые в Информационном бюллетене Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору) и зарубежных [9–12] отчетах и обзорах. Обобщенные показатели аварийности на объектах МТ в России и за рубежом представлены в таблице. Видно, что по удельному показателю аварийности российские и зарубежные МТ вполне сопоставимы. Принципиальных различий здесь не наблюдается, хотя российские МТ более энергонагружены, и следовательно обладают более высоким потенциалом аварийности.

Страна (период наблюдения)	Число аварий	Экспозиция наблюдения аварийности, тыс. км·число лет	Удельная интенсивность аварий на 1000 км трассы, год$^{-1}$	
			за период наблюдения	за последние 5 лет
Магистральные газопроводы				
Западная Европа [9] (1970–2010)	1249	3550	0,35	0,16
Великобритания [10] (1962–2011)	187	812	0,30	0,11
США [12] (1993–2012)	1211	9400	0,13	0,11
Россия (1999–2012)	313	2298	0,14	0,09
Магистральные нефте-, нефтепродуктопроводы, трубопроводы сжиженных углеводородных газов				
Западная Европа [11] (1971–2011)	485	1000	0,52	0,24
США [12] (1993–2012)	2711	5100	0,53	0,43
Россия (1999–2012)	189	1165	0,18	0,07

Примечание. Сведения по России — данные Ростехнадзора.

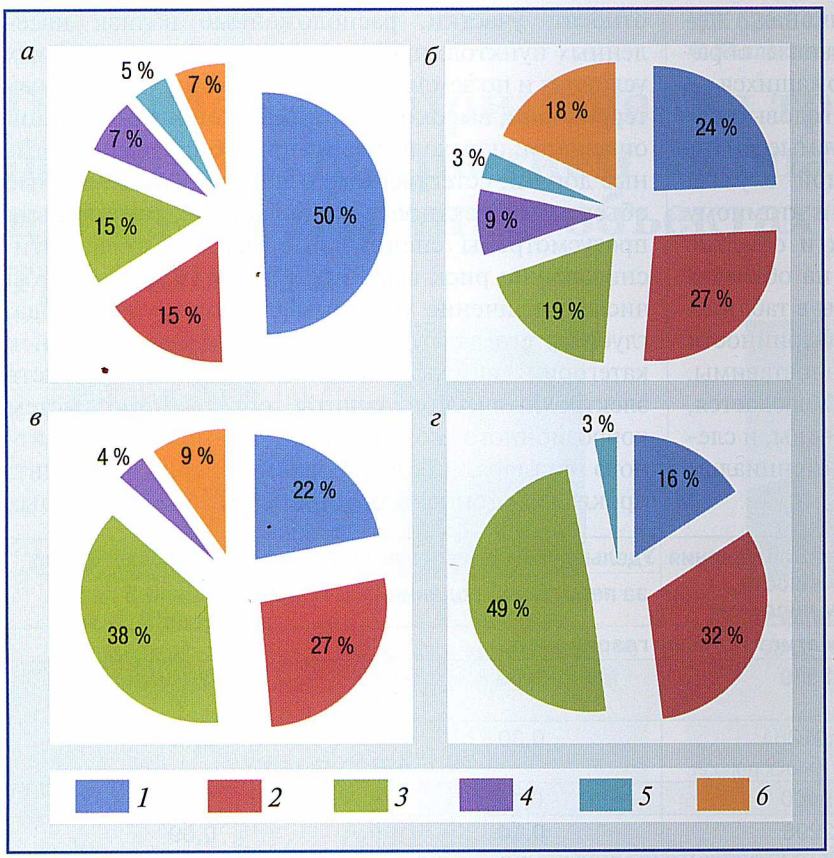
В последние годы удельный показатель аварийности на МТ России, США и стран Европы стабилизировался на значениях 0,1 аварий в год на 1000 км трассы для магистральных газопроводов и 0,1–0,4 аварий в год на 1000 км трассы для нефте- и продуктопроводов.

На рис. 1, 2 представлено распределение аварий на магистральных газо- и нефтепроводах по причинам их возникновения.

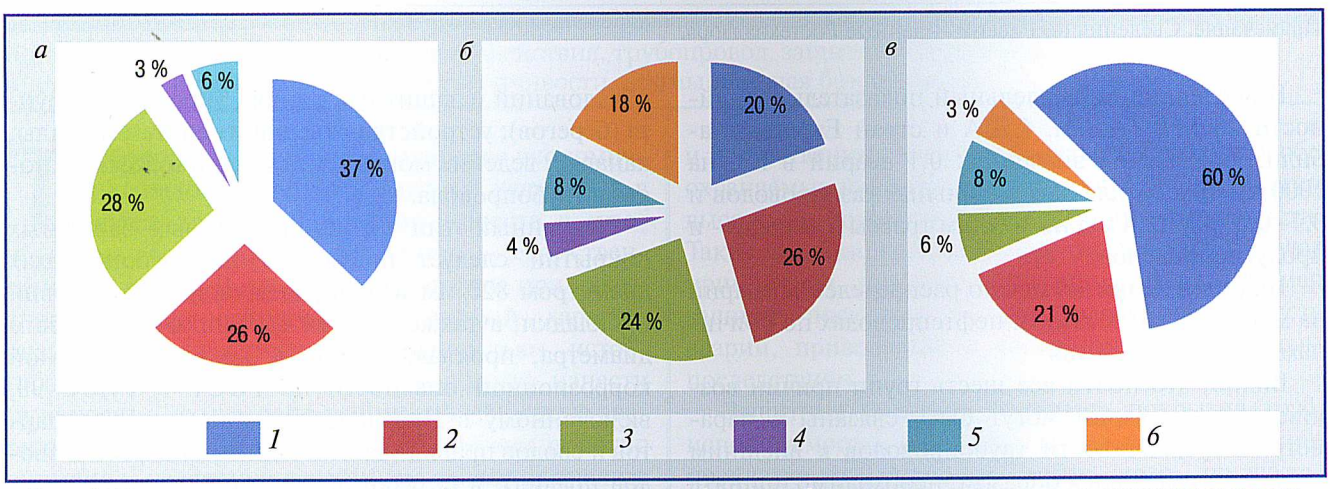
Видно, что почти все шесть групп причин возникновения аварий могут быть связаны с параметрами устойчивости трубопроводов к внешним воздействиям. Таким образом, необходимо принять определенные меры для повышения защищенности трубопроводов, в число которых может входить применение труб с защитным бетонным покрытием.

Способы защиты МТ от внешних негативных воздействий регламентированы преимущественно нормативными правовыми актами [13, 14] и нормативно-техническими документами, направленными на обеспечение промышленной безопасности, предупреждение аварий на опасных производственных объектах МТ. В соответствии с этими документами к наиболее опасным участкам линейной части МТ относят: участки, расположенные вблизи населенных пунктов, проходящие в особых природных условиях и по землям особо охраняемых природных территорий, высокой и повышенной коррозионной опасности; переходы через автомобильные и железные дороги, естественные и искусственные водные объекты. Проектной документацией должны быть предусмотрены специальные меры безопасности, снижающие риск аварии на таких участках, в том числе увеличение толщины стенки трубопровода, глубины его залегания; повышение требований к категории защитного покрытия и режимам средств электрохимической защиты, обустройство систем коррозионного мониторинга; применение защитного футляра, обетонирования, защитных плит; прокладка в тоннеле; обустройство дополнительных обвалований и защитных стенок; укрепление грунта (берегов); устройство отводящих систем (каналы, канавы); ведение мониторинга технического состояния трубопровода.

Усиленный тип антикоррозионных защитных покрытий следует применять на трубопроводах диаметром 820 мм и более независимо от условий прокладки, а также на всех трубопроводах любого диаметра, прокладываемых в зонах повышенной коррозионной опасности по ГОСТ Р 51164—98, включенному в Перечень национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». В соответствии с требованиями ГОСТ Р 51164—98 на трубопроводах с любым видом покрытия, прокладываемых под автомобильными или железными дорогами, на подводных переходах, а также в скальных грунтах, помимо защитной обертки следует применять жесткую футеровку из негниющих материалов, обетонирование, опорные или фиксирую-



▲ **Рис. 1. Распределение числа аварий на магистральных газопроводах в зависимости от причин их возникновения по данным EGIG (*а*), PHMSA (*б*), UKOPA (*в*), Ростехнадзора (*г*):**
1 – внешнее воздействие; *2* – дефекты оборудования (материала); *3* – коррозия; *4* – природное воздействие; *5* – ошибочные действия персонала; *6* – другое



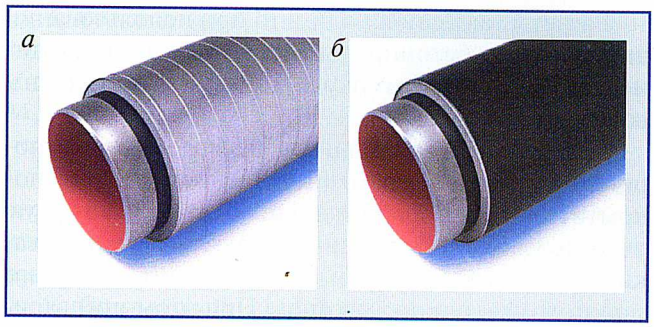
▲ **Рис. 2. Распределение числа аварий на магистральных нефте- и нефтепродуктопроводах в зависимости от причин их возникновения по данным CONCAWE (*а*), PHMSA (*б*), Ростехнадзора (*в*):**
1–6 – то же, что на рис. 1

щие элементы, обеспечивающие требуемую защиту покрытий от механических повреждений.

Анализ специальных мер безопасности, предусмотренных вышеперечисленными и другими нормативными документами и снижающих риск аварии на МТ, показывает, что почти все они могут быть дополнены или заменены мерами, в основе которых лежит использование труб с защитным универсальным бетонным (ЗУБ) покрытием. Такие трубы разработали и изготовляют с 2005 г. в ОАО «Московский трубозаготовительный комбинат» совместно с ООО «БТ СВАП» в рамках российской инновационной технологии комплексной защиты и балластировки труб [15]. Следует отметить, что качество труб, изготовленных в заводских условиях, в полной мере соответствует заложенным проектным решениям и исключает пресловутый человеческий фактор при выполнении работ в реальных трассовых условиях строительства и эксплуатации трубопроводов.

Широкий ассортимент труб с покрытием ЗУБ различных модификаций позволяет существенно расширить область их применения и гарантировать промышленную и экологическую безопасность трубопроводов в различных условиях эксплуатации, а также обеспечить высокую экономическую эффективность. Конструкции труб с покрытием ЗУБ могут отличаться в зависимости от требований к их устойчивости в различных условиях. Так, на рис. 3 показаны модификации, представляющие собой стальную трубу с антикоррозионным покрытием, слоем бетона в стальной и металлополимерной оболочке.

Одно из возможных направлений применения труб с покрытием ЗУБ — использование на объектах трубопроводного транспорта, проектирование которых ведут с использованием специальных технических условий (СТУ), т.е. в тех случаях, когда для разработки проектной документации отсут-



▲ **Рис. 3. Труба с покрытием ЗУБ в стальной (*а*) и металлополимерной (*б*) оболочках**

ствуют нормы проектирования, строительства и эксплуатации объекта или необходимо обосновать отступления от действующих норм, обеспечивая при этом надежность и безопасность объекта трубопроводного транспорта. Необходимость в СТУ возникает в тех случаях, когда для разработки проектной документации на объект капитального строительства недостаточно требований по надежности и безопасности, установленных нормативными техническими документами, или такие требования не установлены. По существу СТУ — технические нормы, содержащие дополнительные к установленным или отсутствующие технические требования в области безопасности, отражающие особенности инженерных изысканий, проектирования, строительства, эксплуатации. Обзор разработанных и принятых к использованию СТУ на проектирование, строительство и эксплуатацию МТ [16] показал, что в большинстве случаев в качестве альтернативы разработанным компенсирующим мероприятиям можно предложить использование труб с покрытием ЗУБ.

Кроме того, новые подходы к регулированию промышленной безопасности [17] и последние существенные изменения в закон [8] показывают, что в том случае, когда при эксплуатации, капитальном ремонте, консервации или ликвидации опасного производственного объекта требуется отступление от требований промышленной безопасности, установленных федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности, либо таких требований недостаточно и (или) они не установлены, можно установить требования промышленной безопасности к его эксплуатации, капитальному ремонту, консервации и ликвидации в специальном документе — обосновании безопасности опасного производственного объекта [18]. Особенности разработки и применения обоснования безопасности [19] также позволяют предположить перспективу использования труб покрытием ЗУБ в тех случаях, когда это явно не предусмотрено федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности. Таким образом, трубы с покрытием ЗУБ могут найти более широкое применение для объектов нефтегазового комплекса Российской Федерации.

Целенаправленное и обоснованное применение труб с покрытием ЗУБ в целях повышения устойчивости и безопасности трубопроводов при различных негативных внешних воздействиях требует разработки методов оценки их устойчивости для сравнения с традиционно применяемыми.

В общем случае все возможные внешние негативные воздействия на трубопровод целесообразно разделить на две категории, которые характеризуются различной степенью учета при проектировании трубопровода, а также разной методологией исследования в плане сравнения устойчивости труб стандартных и труб с покрытием ЗУБ. К первой категории можно отнести воздействия, которые учитывают при проектировании трубопровода, они регламентированы нормативной документацией, в частности СП 20.13330.2011 [20]. Ко второй категории можно отнести несанкционированные воздействия — случайный или преднамеренный удар; воздействие взрывным устройством, осколком взрыва; нагрузки, обусловленные пожаром, столкновением транспортных средств с трубопроводом.

Такое разделение на категории достаточно условно. Однако, как показывает анализ, показатели надежности и устойчивости при различных воздействиях первой категории в большинстве случаев невозможно измерить с помощью какой-либо методики, основанной на проведении кратковременного эксперимента. В этом случае решающую роль в оценке показателей надежности играет расчет по той или иной математической модели. Имеется много работ, посвященных методологии таких расчетов, обобщенных в монографии [21], поэтому сравнение показателей надежности труб с покрытием ЗУБ и труб обычных при воздействиях, относящихся к первой категории, целесообразно проводить расчетными методами. Для определения устойчивости трубопровода при воздействиях второй категории решающую роль должен играть эксперимент, т.е. испытания труб с защитным бетонным покрытием и обычных труб в одинаковых условиях воздействия с использованием различных методов и критериев. Однако постановка и проведение таких натурных экспериментов, соответствующих всем возможным ситуациям, требуют разработки и применения такого многообразия методик и настолько трудоемки, что возможность их реализации в полном масштабе практически исключается. В такой ситуации наиболее целесообразно использовать методы математического моделирования с последующими численными расчетами в соответствующих компьютерных программах, например LS-DYNA [22], а эксперимент проводить лишь для проверки ключевых результатов расчетов. При этом необходимо выделить приоритетные направления исследований по степени важности и практической востребованности.

В качестве примера приведем некоторые результаты расчетов, выполненных в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН под руководством д-ра техн. наук, проф. Ю.Г. Матвиенко.

Рассчитывали сравнительную устойчивость стальной трубы диаметром 820 мм, толщиной 14 мм без бетонного покрытия и с бетонным покрытием толщиной 90 мм при воздействии цилиндрического пробойника из прочной стали диаметром закругленной части 25 мм и длиной цилиндрической части 50 мм, летящего со скоростью 500 м/с.

Распределение напряжений при остановке пробойника в момент столкновения с поверхностью обычной трубы показано на рис. 4, рис. 5 иллюстрирует изоповерхности напряжений при ударе пробойника по трубе с защитным бетонным покрытием. В первом случае расчетная максимальная глубина вмятины на трубе составила 36 мм. Во втором случае, благодаря тому, что пробойник теряет в бетоне большую часть своей кинетической энергии, подходя к поверхности самой трубы со скоростью 200 м/с, глубина вмятины составила 9 мм, что соизмеримо с толщиной стенки трубы и в 4 раза меньше вмятины, полученной при отсутствии бетонного покрытия. На рис. 5 видны очаги зарождения трещин в бетоне.

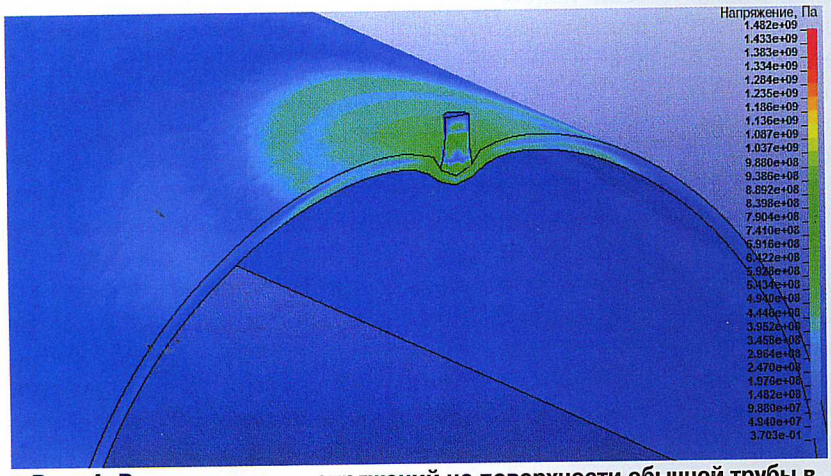
Расчеты также показали, что при использовании двухслойного бетонирования с суммарной толщиной покрытия 120 мм возможно получение вмятины всего в 2–2,5 мм.

Для экспериментального исследования относительной устойчивости (безопасности) труб с покрытием ЗУБ целесообразно использовать в первую очередь уже существующие методы испытаний, такие как испытания трубы на прочность при ударе молотом маятникового копра. При этом предварительно надо провести моделирование воздействия удара на трубу соответствующих диаметра, толщины стенки, марки стали, учитывая толщину и прочность бетонного покрытия с армированием. Полученные коэффициенты схождения расчетных результатов и экспериментальных данных позволят разработать уточненные методики расчетов для использования их уже непосредственно при проектировании.

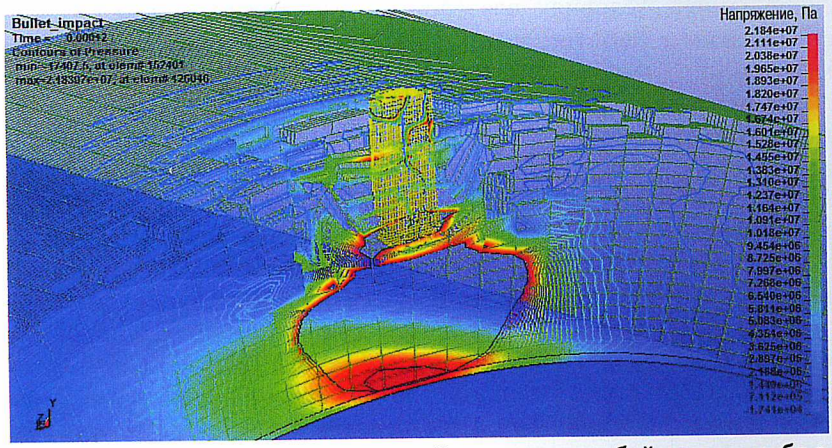
Представляет значительный интерес моделирование поведения трубы при воздействии природных катаклизмов (сейсмические воздействия, пучения грунта, воздействия селевых потоков и оползней), низких и высоких температур на устойчивость бетонного покрытия и анализ возможных сочетаний разных покрытий для увеличения стойкости трубопроводов к внешним воздействиям.

Учитывая значительный объем расчетных и экспериментальных работ, исследования, описанные выше, целесообразно проводить по схеме расширения: от одного типа конструкции к разным ее типам с учетом статистического обобщения результатов промежуточных исследований.

Конечной целью таких исследований должно стать определение практических областей, в которых применение труб с покрытием ЗУБ оправданно и целесообразно, с последующим закреплением требований к применению таких труб в соответствующих нормативно-технических документах.



▲ **Рис. 4. Распределение напряжений на поверхности обычной трубы в момент столкновения с пробойником**



▲ **Рис. 5. Изоповерхности напряжений при ударе пробойника по трубе с покрытием ЗУБ**

Список литературы

1. *Перспективы* нормативного обеспечения анализа риска магистральных нефтепроводов/ Ю.А. Дадонов, А.С. Джарджиманов, Ю.В. Лисин и др.// Трубопроводный транспорт нефти. — 1996. — № 8. — С. 8–10.

2. *Концепция* методического руководства по оценке степени риска магистральных нефтепроводов/ А.Ю. Верушин, Ю.В. Лисин, М.В. Лисанов и др.// Трубопроводный транспорт нефти. — 1997. — № 12. — С. 8–14.

3. *Декларирование* промышленной безопасности объектов магистрального трубопроводного транспорта газа и опасных жидкостей/ Ю.А. Дадонов, С.Н. Мокроусов, М.В. Лисанов и др.// Безопасность труда в промышленности. — 1998. — № 5. — С. 54–57.

4. *Оценка* риска аварий на линейной части магистральных нефтепроводов/ М.В. Лисанов, А.С. Печёркин, В.И. Сидоров и др.// Безопасность труда в промышленности. — 1998. — № 9. — С. 50–56.

5. *Оценка* риска аварий на магистральных нефтепроводах КТК-Р и БТС/ Ю.А. Дадонов, М.В. Лисанов, А.И. Гражданкин и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2002. — № 6. — С. 2–6.

6. *Анализ* риска магистральных нефтепроводов при обосновании проектных решений, компенсирующих отступления от действующих требований безопасности/ М.В. Лисанов, С.И. Сумской, А.В. Савина и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 3. — С. 58–66.

7. *Савина А.В., Сумской С.И., Лисанов М.В.* Анализ риска аварий на магистральных трубопроводах при обосновании минимальных безопасных расстояний// Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 3. — С. 58–63.

8. *О промышленной* безопасности опасных производственных объектов: федер. закон Рос. Федерации от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ: принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 20 июня 1997 г.// Собр. законодательства Рос. Федерации. — 1997. — № 30, ст. 3588.

9. *Gas* Pipeline Incidents: 8th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (EGIG) (Doc. № EGIG11.R.0402), Dec. 2011. URL: http://www.egig.eu/reports (дата обращения: 17.11.2014).

10. *Pipeline* Product Loss Incidents and Faults Report (1962–2011): Report of the United Kingdom Onshore Pipeline Operators' Association (UKOPA)/ Fault Database Management Group. — Ambergate UK, 2012. URL: http://www.ukopa.co.uk/wp-content/uploads/2012/12/UKOPA-12-0046.pdf (дата обращения: 17.11.2014).

11. *Performance* of European cross-country oil pipelines. Statistical summary of reported spillages in 2011 and since 1971 (Report № 3/13)/ Conservation of Clean Air and Water in Europe (CONCAWE). — Brussels, 2013. URL: https://www.concawe.eu/content/ (дата обращения: 17.11.2014).

12. *Pipeline* Incident 20 Years Trends/ Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA). URL: http://primis.phmsa.dot.gov/comm/reports/safety/PSI.html (дата обращения: 17.11.2014).

13. *Правила* безопасности в нефтяной и газовой промышленности: федер. нормы и правила в обл. пром. безопасности: утв. приказом Ростехнадзора от 13 марта 2013 г. № 101// Бюл. норматив. актов федер. органов исполнит. власти. — 2014. — № 24.

14. *Правила* безопасности для опасных производственных объектов магистральных трубопроводов: федер. нормы и правила в обл. пром. безопасности: утв. приказом Ростехнадзора от 6 нояб. 2013 г. № 502// Бюл. норматив. актов федер. органов исполнит. власти. — 2014. — № 1.

15. *Основные* преимущества технологии ЗУБ [Электронный ресурс]// Открытое акционерное общество «Московский трубозаготовительный завод»: [сайт]. URL: http://www.mostzk.ru/produkt/betonpokritie/bestof.aspx (дата обращения: 17.11.2014).

16. *Чуркин Г.Ю., Алекперова С.Т.* Актуальные вопросы разработки специальных технических условий для магистральных трубопроводов// Безопасность труда в промышленности. — 2014. — № 1. — С. 58–65.

17. *Новые* подходы к регулированию промышленной безопасности/ А.В. Ферапонтов, Д.А. Яковлев, Е.В. Кловач, В.К. Шалаев// Безопасность труда в промышленности. — 2014. — № 3. — С. 9–11.

18. *Об изменениях* законодательства/ А.В. Ферапонтов, Д.А. Яковлев, Е.В. Кловач, В.К. Шалаев// Безопасность труда в промышленности. — 2013. — № 4. — С. 3–4.

19. *Печёркин А.С.* Аспекты применения обоснования безопасности опасного производственного объекта// Безопасность труда в промышленности. — 2013. — № 11. — С. 5–11.

20. *СП 20.13330.2011.* Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07—85*: утв. приказом Минрегиона России от 27 дек. 2010 г. № 787: введ. 20 мая 2011 г.// ОАО «ЦПП», 2011.

21. *Безопасность* России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность трубопроводного транспорта/ Пред. ред. комис. д-р техн. наук, проф. И.И. Мазур. — М.: МГФ «Знание», 2002. — 752 с.

22. *LS-DYNA.* Keyword User's Manual. Livermore, California: LSTC, 2006. URL: http://lstc.com/pdf/ls-dyna_971_manual_k.pdf (дата обращения: 17.11.2014).

nadzor@safety.ru

Материал поступил в редакцию 20 ноября 2014 г.

ВЫБЕРИТЕ НАИБОЛЕЕ УДОБНЫЙ ДЛЯ ВАС ВАРИАНТ ПОДПИСКИ!

Подписные индексы журнала «Безопасность труда в промышленности» по каталогам агентств:

Подписка	Роспечать	Пресса России	Почта России
На 6 мес	70049	42097	79355
На год	85218	10470	—

В течение года можно оформить подписку непосредственно в редакции.
E-mail: ornd@safety.ru