



ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

ВОЛОХОВСКИЙ Василий Юрьевич
Руководитель группы прочности
ООО «ИНТРОН ПЛЮС», к.т.н.

ПЕТРОВ Юрий Максимович
Технический директор
ООО «МЕПОС»

Для решения проблемы оценки текущего технического состояния находящихся в эксплуатации металлополимерных трубопроводов (МПТ) и прогнозирования их остаточного ресурса специалисты ООО «МЕПОС» и ООО «ИНТРОН ПЛЮС» разработали специальную методику, основанную на использовании диагностической информации, которая может быть получена в полевых условиях при помощи средств неразрушающего контроля. Проведенные по данной методике исследования показали, что наибольшее влияние на изменение прочности каркаса МПТ оказывают обрывы окружных проволок, которые могут происходить по различным причинам, например, вследствие гидроудара или коррозии. Несмотря на то, что даже ощутимая коррозионная потеря сечения проволок (до 20-30%) не приводит к заметному ослаблению каркаса, обрывы проволок наиболее вероятны именно в области потери сечения, что может считаться критическим фактором для целостности трубы. Таким образом, дефектоскопию МПТ следует ориентировать на обнаружение локальных дефектов (обрывы) проволок каркаса и оценку коррозионной потери сечения.

Металлопластиковая или металлополимерная труба представляет собой комбинированную конструкцию, армированную жестким решетчатым каркасом,

сваренным из стальной проволоки и воспринимающим нагрузку на трубу в виде основного внутреннего давления (рис. 1). Стальной каркас со всех сторон защищен слоем полимера, который формирует внутреннюю и внешнюю поверхности МПТ. Полимерная оболочка (или матрица, по терминологии композиционных материалов) обеспечивает защиту стального каркаса от агрессивных сред, препятствуя развитию коррозии.

Основное достоинство конструктивной схемы МПТ заключается в сочетании высокой прочности, сравнимой с прочностью стальных труб, и высокой коррозионной стойкости за счет пластиковой защиты стального каркаса. К другим преимуществам МПТ можно отнести стойкость к химически агрессивным жидкостям и длительный срок службы при транспортировке агрессивных сред, отсутствие необходимости антикоррозионной обработки, катодной и ингибиторной защиты, а также возможность применения различных видов полимеров и большое количество областей применения МПТ (рис. 2, 3).

На сегодняшний день только на нефтепромыслах Российской Федерации построены тысячи километров металлополимерных трубопроводов, изготовленных по технологии ООО «МЕПОС». За время эксплуатации

Рис. 1. Металлополимерная труба

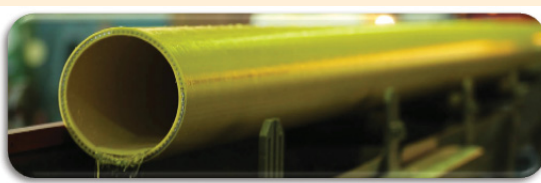


Рис. 2. Применение металлополимерных труб на объектах добычи и транспортировки нефти





СУХОРУКОВ
Василий
Васильевич
ООО «ИНТРОН
ПЛЮС», д.т.н.



ВОРОНЦОВ
Александр
Николаевич
ООО «ИНТРОН
ПЛЮС», к.т.н.



МЯКУШЕВ
Константин
Викторович
ООО «ИНТРОН
ПЛЮС», к.т.н.

трубы хорошо зарекомендовали себя при транспортировке сред с высокой коррозионной активностью.

Гибкая технология, которая используется компанией при производстве металлополимерных труб, позволяет изменять размер проволоки и ее сечения, конфигурацию стального каркаса (размер ячейки каркаса, плотность), а также использовать различного типа полимерные материалы для полимерной основы (матрицы): от полиэтилена и полипропилена до полиуретана и др. (рис. 4).

Технологически наиболее сложным узлом конструкции металлополимерного трубопровода остается сварное соединение труб. На рис. 5 показана типичная геометрия трубы и сварного соединения. Следует заметить, что стальной каркас не доходит до самого сечения, а заканчивается чуть правее двух отрезков трубы. За счет такого решения прочность сварного соединения в основном обеспечивается прочностью полимера, хотя каркас, примыкающий к зоне сварного соединения, также несет определенную нагрузку. Для того, чтобы сделать это соединение более надежным, законцовки делаются чуть большего диаметра. И, как показывают оценочные расчеты, при соблюдении технологии изготовления сварного соединения оно получается достаточно прочным (см. таблицу).

На рис. 6 представлена картина поведения полимера и металлического каркаса в точке сварки двух труб при повышении внутреннего давления до 9,5 МПа. В правой части показаны уровни напряжения, возникающие в спиральных проволоках, которые принимают на себя 95% нагрузки, возникающей в стенке трубы при повышении внутреннего давления. Оказа-

Рис. 3. Основные области применения металлополимерных труб

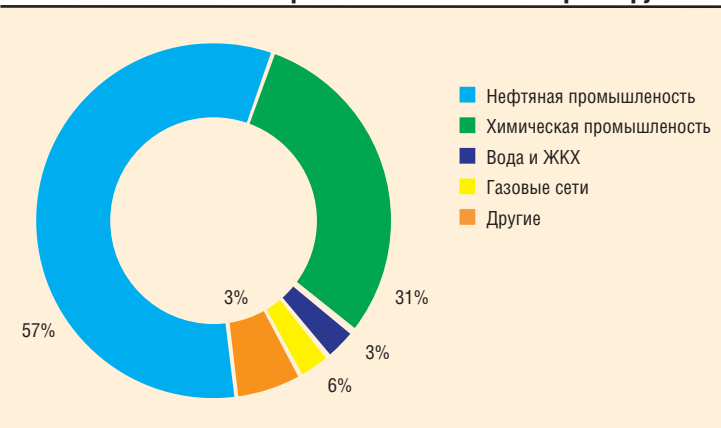


Рис. 4. Виды полимеров, применяемые при производстве металлополимерных труб

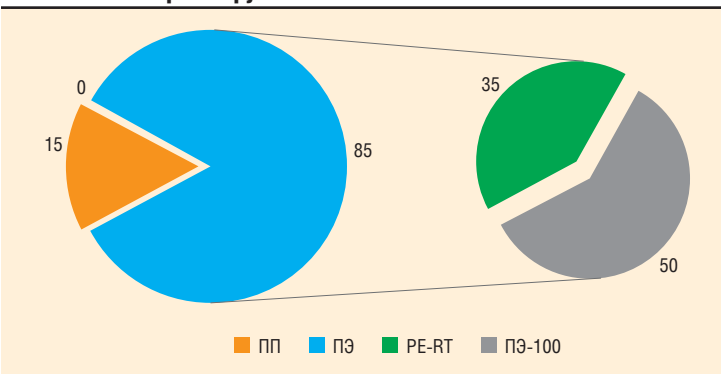


Рис. 5. Геометрия сварного соединения МПТ

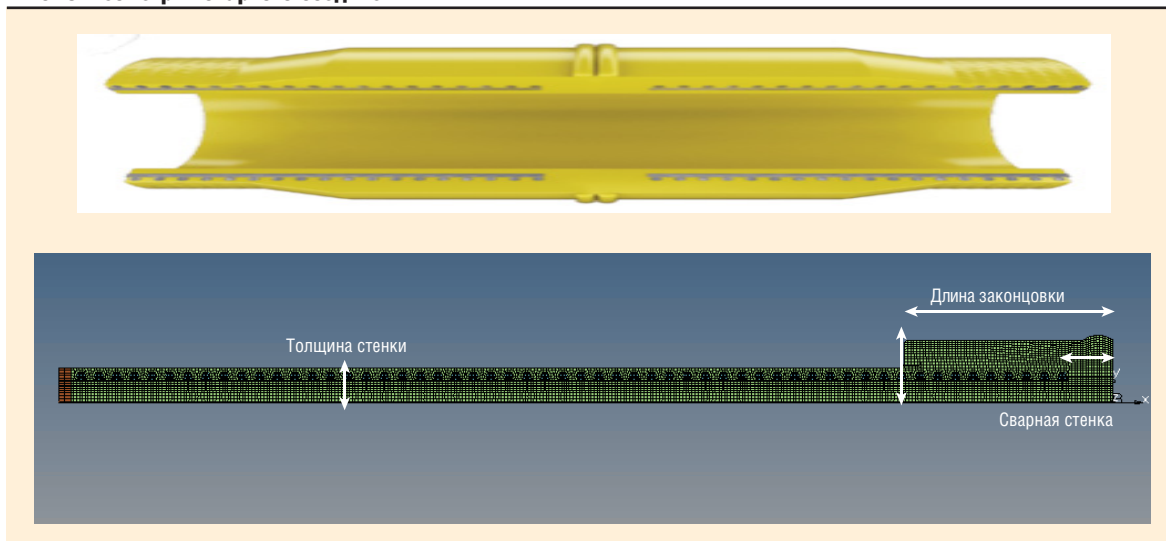


Рис. 6. Поведение полимера и металлического каркаса в точке сварки двух труб при повышении внутреннего давления до 9,5 МПа

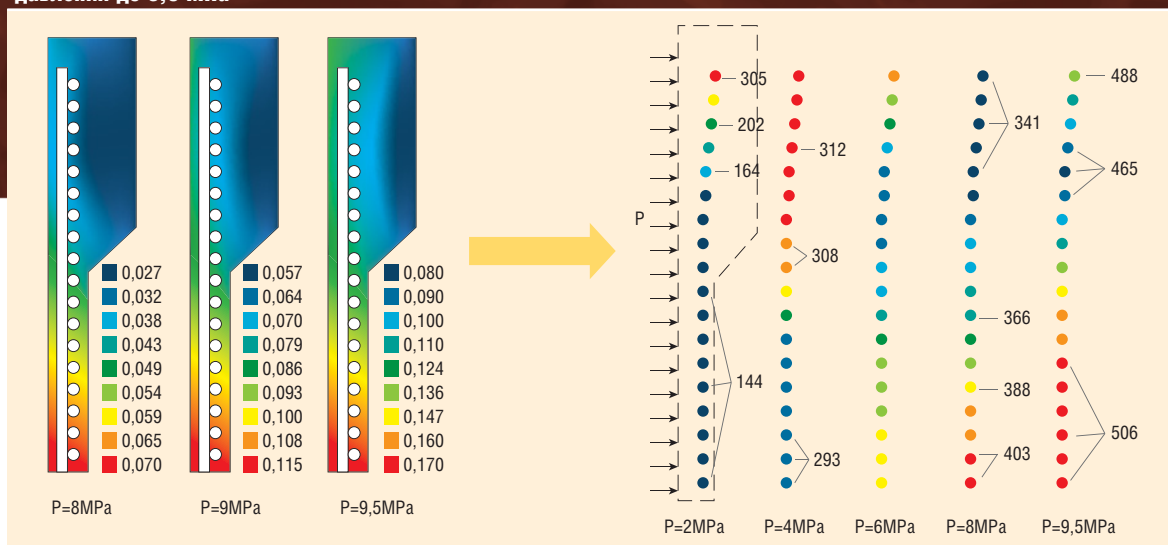


Таблица						
Технические характеристики сварного соединения МПТ						
Тип МПТ	Внутренний диаметр, мм	Диаметр проволоки, мм	Толщина стенки, мм	Толщина законцовки, мм	Длина законцовки, мм	Толщина сварочной стенки, мм
Расчетная	225	3	12,5	22,5	70	15,5
Фактическая				27,5	100	12,5

Рис. 7. Гидроиспытание МПТ-225 в ГУП «Черноморнефтегаз»



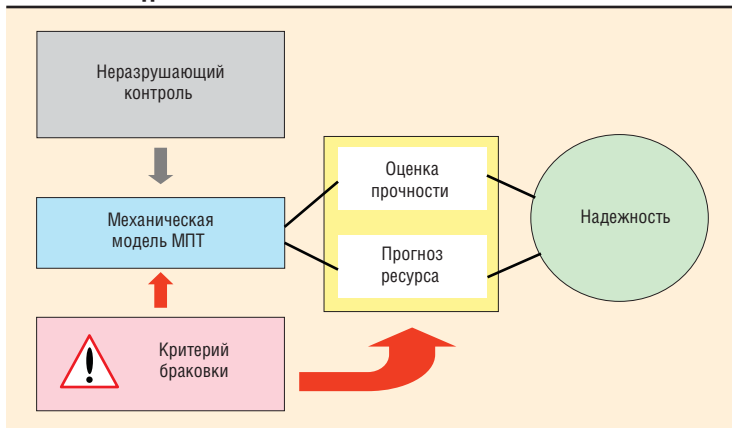
лось, что с увеличением давления зона наиболее нагруженных проволок каркаса постепенно смещается от края трубы внутрь конструкции. И при достаточно высоких значениях давления наиболее опасное сечение оказывается не на самом стыке, а на определенном расстоянии от него. Этот вывод удалось подтвердить в ходе гидравлических испытаний, проводившихся в ГУП «Черноморнефтегаз» методом нагружения до разрушения труб: трещина образовалась у края трубы в результате разрыва окружающих проволок при внутреннем давлении порядка 130 кгс/см² и рабочем давлении 40 кгс/см² (рис. 7).

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МПТ

В настоящее время сохраняется проблема оценки текущего технического состояния находящихся в эксплуатации МПТ и прогнозирования их остаточного ресурса. Предлагаемая компанией «ИНТРОН ПЛЮС» методика анализа технического состояния МПТ представлена на рис. 8. Согласно этой методике сначала проводится неразрушающий контроль трубопровода, после чего полученные диагностические параметры используются в качестве входных величин для построения механической модели металлополимерной трубы. Механическая модель позволяет преобразовать диагностическую информацию в механические показатели несущей способности, например, в коэффициент запаса прочности, который затем может быть использован для оценки прочности и прогноза ресурса МПТ.

Однако точный прогноз остаточного ресурса трубы возможен только при наличии представления о кри-

Рис. 8. Методика анализа технического состояния МПТ



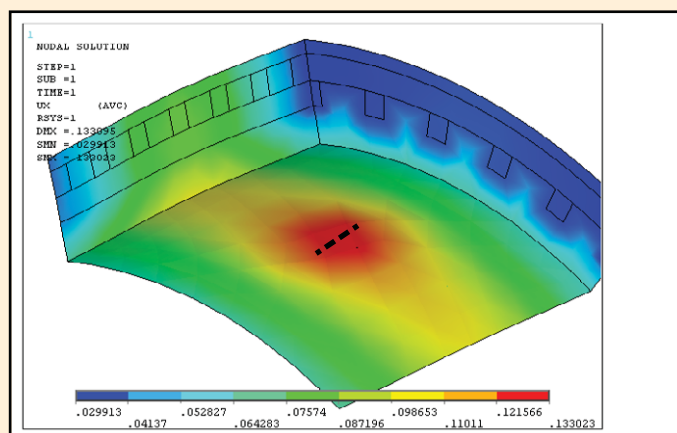
тическом или предкритическом состоянии конструкции. Поэтому здесь большую роль играет также критерий браковки, который может быть установлен либо с помощью модельных (теоретических) расчетов, либо в сочетании их с определенными экспериментальными данными. В последнем случае расчет будет более достоверным.

Для проверки применимости предлагаемой методики мы выполнили модельные расчеты влияния дефектов силового каркаса на прочность МПТ. В качестве образца для испытаний была взята труба диаметром 225 мм (с размером ячеек 6х8,5 мм) и достаточно плотным каркасом. Расчеты показали, что при номинальном внутреннем рабочем давлении 4 МПа образуются дефекты в виде обрыва кольцевых проволок каркаса. На рис. 9 мы видим, как деформируется труба в зоне этих дефектов: в результате радиального перемещения с внешней стороны образуется выпуклость, соответственно, с внутренней – вогнутость.

Далее мы рассматривали напряжения, которые возникают в проволоках каркаса трубы при дефектах различного типа. На рис. 10 показано условное место обрыва одной окружной проволоки. Максимальное напряжение воспринимается соседними окружными проволоками, которые становятся более нагруженными и, следовательно, потенциально более опасными. В данном случае максимальное эквивалентное напряжение в проволоках, вычисленное по критерию Мизеса, меньше предела прочности материала проволок примерно в два раза (177,3 против 300-400 МПа). Тем не менее, это показатель потенциальной опасности.

Также мы смоделировали состояние трубы, которое можно было бы квалифицировать как предкритическое, чтобы затем на основании выполненных рас-

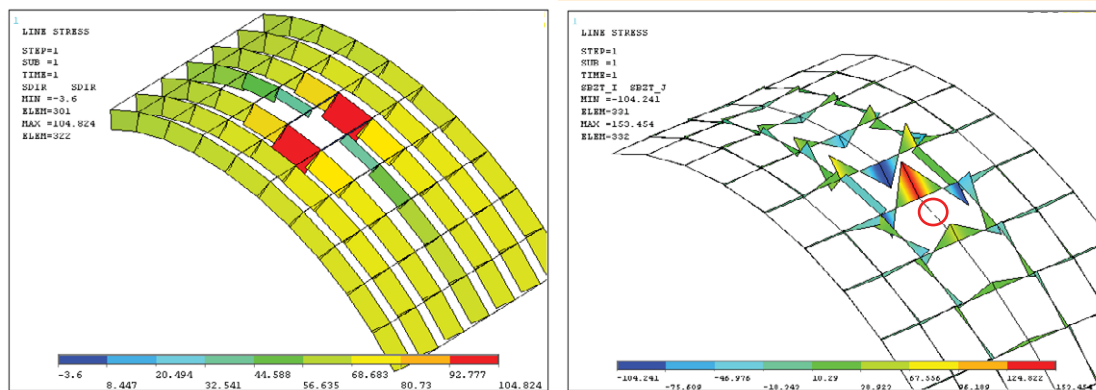
Рис. 9. Расчетные оценки влияния дефектов каркаса на прочность МПТ



Примечание: Труба МПТ-115 (6х8,5 мм), $p=4$ МПа. Дефекты – обрывы кольцевых проволок каркаса. Деформация трубы – радиальные перемещения (мм)

четов можно было выработать критерий браковки, необходимый для формирования прогноза остаточного ресурса МПТ. Расчеты проводились для трубы с условным обрывом трех окружных проволок. Характер напряжения в каркасе трубы оказался тот же, что и в предыдущем случае, однако максимальное эквивалентное напряжение достигло предела прочности материала проволок: 379 и 350-400 МПа соответственно (рис. 11). Таким образом, эти три обрыва, которые могли произойти по разным причинам, можно считать критическими. Впоследствии они могут привести к лавинообразным разрушениям и развитию магистральной трещины.

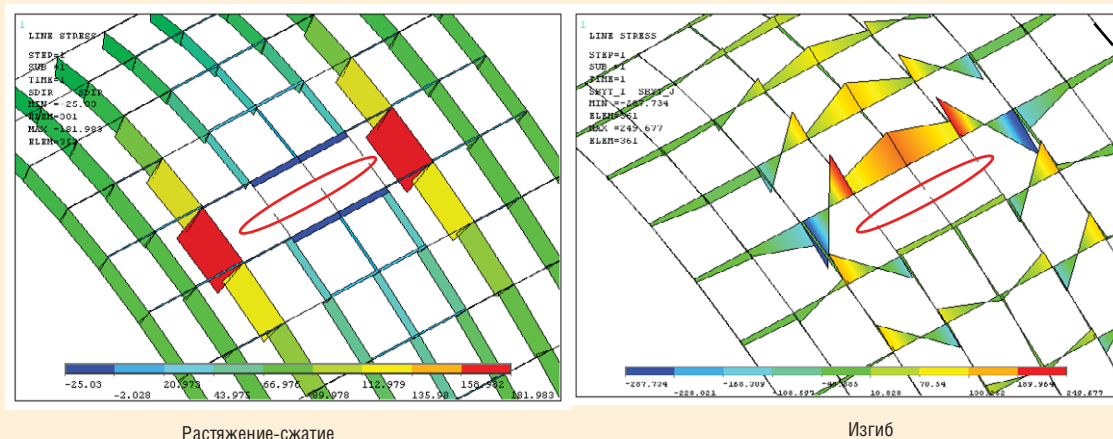
Рис. 10. Напряжения в каркасе трубы с обрывом окружной проволоки



Растяжение-сжатие

Изгиб

Рис. 11. Напряжения в каркасе трубы с обрывами трех окружных проволок



Следующим шагом стало определение диагностических показателей (факторов), которые позволили бы оценить состояние трубы и определить коэффициент запаса прочности. Один из таких диагностических факторов, который может быть зафиксирован средствами неразрушающего контроля, – это расхождение концов кольцевых проволок. В случае одного обрыва это расхождение составляет всего 0,013 мм, трех – 0,054 мм (рис. 12). Оба этих дефекта могут быть зарегистрированы электромагнитными методами.

Вторым диагностическим фактором была принята частичная потеря сечения проволок каркаса в результате возможной коррозии. Полимерная матрица надежно защищает каркас от агрессивных сред, но даже небольшой источник проникновения агрессивной среды внутрь каркаса может привести к развитию коррозии. На рис. 13 показана модель каркаса с потерей сечения проволок, равной 20%. Максимальное эквивалентное напряжение в данном случае составило 90,9 МПа, потеря прочности каркаса – 21,3%. Безмоментное состояние оболочки развивается в центральной зоне, а изгибное напряжение – по краям, из-за изгибных эффектов. Однако, даже

несмотря на относительно небольшие значения напряжений, обрыв проволоки наиболее вероятен в зоне, где уже началась коррозия. Поскольку обрыв считается катастрофическим фактором, при проведении диагностики и контроля состояния МПТ этот тип дефекта также необходимо учитывать.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВНУТРИТРУБНОГО КОНТРОЛЯ

Отдельно хотелось бы остановиться на оборудовании для внутритрубного контроля (ВТК) дефектов стальных промышленных трубопроводов, разработанном ООО «ИНТРОН ПЛЮС». Как правило, для ВТК используются два метода: ультразвуковой и магнитный. Для ультразвукового контроля может быть использован внутритрубный ультразвуковой инспекционный прибор (УЗВИП), а для магнитного – внутритрубный индикатор дефектов первоочередного ремонта промышленных трубопроводов EasyPig™ (ВИД 114, 159, 219) (рис. 14).

В настоящее время данное оборудование применяется для контроля дефектов в промышленных трубопроводах систем нефтесбора и ППД, продуктопроводах, промышленных и распределительных газо-

Рис. 12. Диагностический фактор I – расхождение концов кольцевых проволок

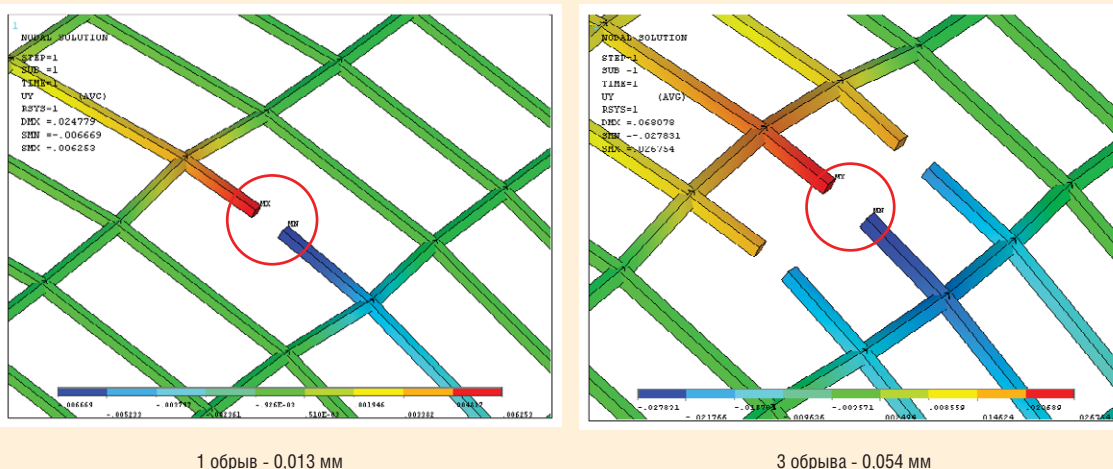
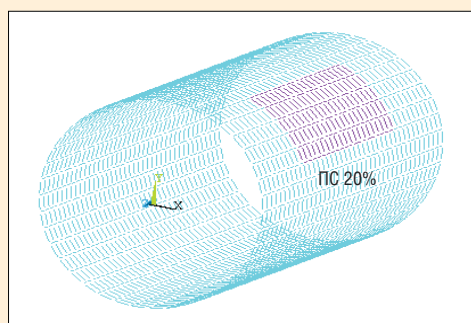
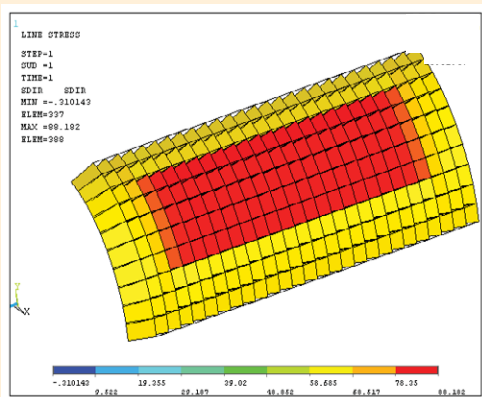


Рис. 13. Диагностический фактор II – потеря сечения проволок

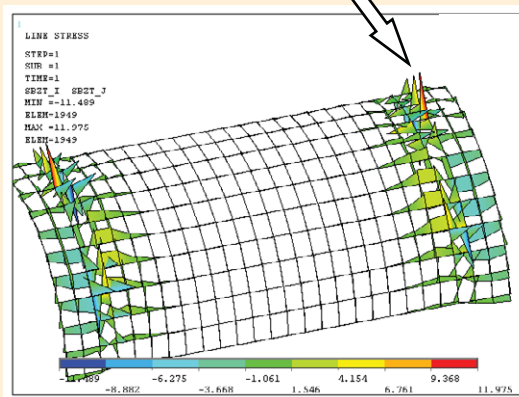


В окружной проволоке:

Эквивалентные напряжения - 90,8 МПа
Потеря прочности каркаса - 21,3%



Растяжение-сжатие



Изгиб

проводах. Внутритрубная диагностика с использованием EasyPig™ может осуществляться при проведении плановых периодических работ по очистке трубопровода.

Помимо этого, магнитная дефектоскопия может использоваться для входного контроля проволоки каркаса при изготовлении МПТ с целью выявления

как локальных (продольных и поперечных трещин, механических повреждений и т.п.), так и распределенных дефектов (потеря сечения из-за коррозионных или фрикционных повреждений).

Еще одна область применения – это контроль состояния каркаса МПТ при эксплуатации. С помощью магнитного метода выявляются распределенные де-

Рис. 14. Оборудование ООО «Интрон Плюс» для внутритрубного контроля стальных промышленных трубопроводов

Внутритрубный ультразвуковой инспекционный прибор УЗВИП (ультразвуковой контроль)

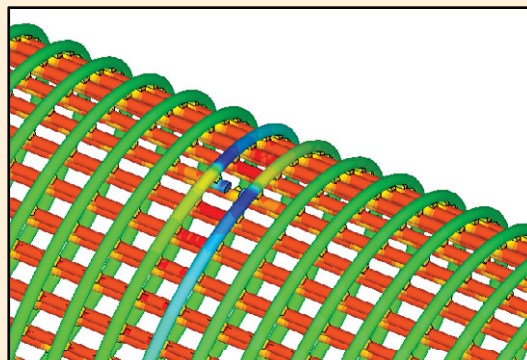


Внутритрубный индикатор EasyPig™ дефектов первоочередного ремонта промышленных трубопроводов (магнитный контроль)



Рис. 15. Расчетные примеры сигналов при контроле каркаса МПТ магнитным методом: дефект каркаса – обрыв одной продольной проволоки

а) Распределение магнитной индукции в проволоках каркаса



б) Сигнал (измерение осевой компоненты поля) при сканировании со стороны внутренней поверхности трубы

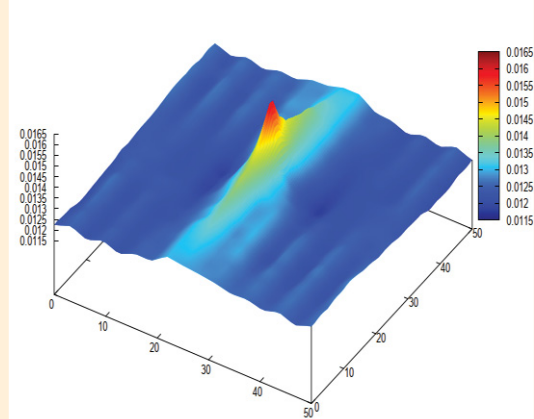
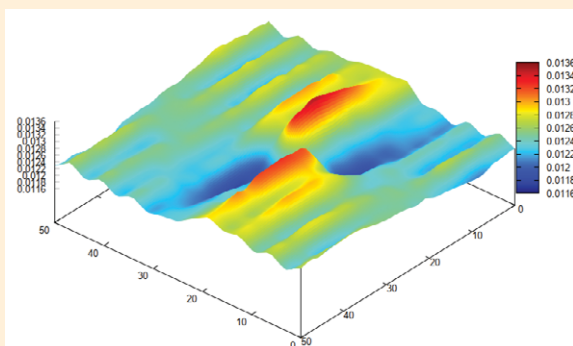


Рис. 16. Расчетные примеры сигналов при контроле каркаса МПТ магнитным методом: дефект каркаса – обрыв одной окружной проволоки

а) Измерение осевой компоненты поля. Сигнал при сканировании со стороны внутренней поверхности трубы. Неуверенный сигнал на фоне спиральных проволок



б) Дефект каркаса – обрыв одной окружной проволоки. Измерение азимутальной компоненты. Спиральная структура окружных проволок способствует возникновению азимутальной компоненты поля в зоне контроля

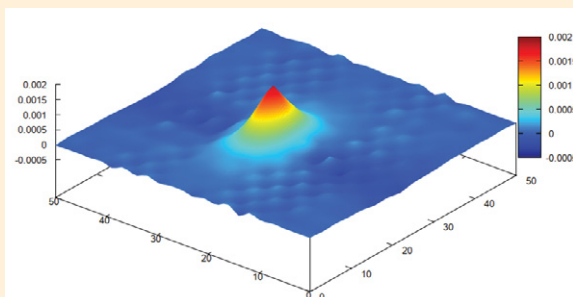
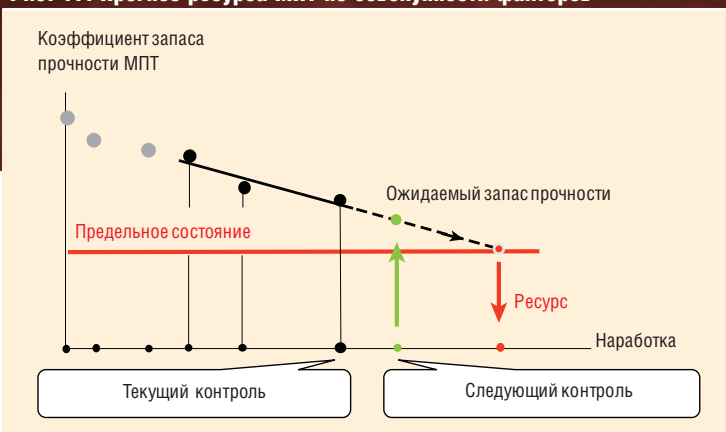


Рис. 17. Прогноз ресурса МПТ по совокупности факторов



ВЫДЕРЖКИ ИЗ ОБСУЖДЕНИЯ

Вопрос: Василий Юрьевич, почему Вы решили, что в процессе эксплуатации трубопровода из МПТ возникают обрывы проволок?

Василий Волоховский: Они могут возникать, например, вследствие гидравлического удара, который сопровождается началом или концом эксплуатации, а также при проведении различных мероприятий и т.д. Давление повышается в полтора-два раза, и постепенно, через определенное количество таких циклов, может произойти обрыв проволок.

Реплика: Нам доводилось видеть разрушения от гидравлического удара. В этом случае труба разрушается по длине на метр-полтора, но никакого локального обрыва одной или двух проволок при этом не происходит.

В.В.: Нет, но начинается все с одного обрыва. Потом рвутся две проволоки, три и далее разрушение принимает лавинообразный характер.

Вопрос: Не соглашусь с Вами. Локальное разрушение происходит сразу, потому что это колоссальная энергия, которая разваливает сначала каркас, а следом — полимерную матрицу. И, на мой взгляд, предлагаемая вами методика сомнительна, потому что основная причина разрушения МПТ — это потеря герметичности полиэтилена.

Это мой комментарий. А теперь хочу спросить: как вы планируете контролировать состояние каркаса по длине? «Вскрывать» весь трубопровод?

В.В.: Нет, с помощью внутритрубной диагностики. В трубу запускается специальное устройство, которое фиксирует дефекты по изменению магнитного потока.

Вопрос: С помощью каких экспериментов вы определяете длительную прочность материала?

В.В.: О длительной прочности можно говорить только применительно к пластмассовой и полимерной матрицам, потому что у стального каркаса как основного силового элемента трубы влияние длительной прочности невелико. Вопрос определения длительной прочности полимера пока остается открытым, несмотря на заявленную стабильность полимеров в течение 40-50 лет эксплуатации. Мы же пытаемся эту проблему решить и составить прогноз хотя бы на 10-20 лет. Потому что пока нет даже этого. Есть только линейный прогноз по двум точкам. А мы предлагаем методику, с помощью которой можно в количественном выражении оценить остаточный ресурс трубы. Наш прогноз основан на реальных данных, полученных с применением специализированного оборудования.

фекты, а также обрывы проволок (с большим расхождением между оборванными проволоками). Также возможна оценка потери сечения металла каркаса.

Минимальные расхождения концов, которые были получены при теоретическом моделировании, и непровары в узлах сетки (с потерей электрического контакта) могут быть зарегистрированы электромагнитными (вихретоковыми) методами по изменению вихревого электрического поля. Для фиксации дефекта достаточно даже минимального (сотые доли миллиметра) нарушения электрического контакта между концами провода.

На рис. 15 и 16 приведены расчетные примеры сигналов при контроле каркаса МПТ магнитным методом. В первом случае (рис. 15) рассматривается обрыв одной продольной проволоки. Мы можем видеть распределение магнитной индукции в проволоках каркаса и сигнал (измерение осевой компоненты поля) при сканировании со стороны внутренней поверхности трубы.

Во втором случае (рис. 16) мы смоделировали обрыв одной окружной проволоки. В верхней части показано измерение осевой компоненты поля. Сигнал был получен при сканировании со стороны внутренней поверхности трубы и на фоне спиральных проволок оказался слабым. А в азимутальном направлении сигнал, напротив, получился достаточно четким, поскольку спиральная структура окружных проволок способствует возникновению азимутальной компоненты поля в зоне контроля.

ПРОГНОЗ РЕСУРСА МПТ ПО СОВОКУПНОСТИ ФАКТОРОВ

Помимо диагностируемых указанных параметров (факторов), для прогноза ресурса металлополимерного трубопровода также необходим один обобщенный показатель технического состояния трубы. В его качестве мы предлагаем использовать коэффициент запаса прочности, который теоретически может быть определен на базе диагностических параметров, зарегистрированных тем или иным методом неразрушающего контроля (рис. 17).

Как известно, с течением времени коэффициент запаса прочности уменьшается. Поэтому очень важно оценить предельное состояние либо теоретически (по расчетам влияния дефектов на остаточную несущую способность), либо в сочетании с практическими методами (экспериментами на разрушение), которые позволяют скорректировать теоретические оценки.

Зная предельный критический уровень, можно дать приблизительную оценку остаточного ресурса трубопровода и определить запас его прочности на момент проведения следующего контроля. ♦