DOI: 10.17122/ntj-oil-2018-3-95-113

УДК 622.692.4

С.А. Сильвестров, А.К. Гумеров (ООО «Астрапроект», г. Казань,
Российская Федерация)

ИНКУБАЦИОННЫЙ ПЕРИОД РАЗВИТИЯ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

Stepan A. Silvesrtov, Aidar K. Gumerov (Astraproekt LLC, Kazan,
Russian Federation)

LATENT PERIOD OF STRESS CORROSION CRACKING DEVELOPMENT AT THE MAIN PIPELINES

Введение

Одной из нерешённых проблем в трубопроводном транспорте является недостаточная изученность явления коррозионного растрескивания под напряжением, которое часто наблюдается на магистральных газопроводах и практически не проявляется на магистральных нефтепроводах, несмотря на то, что эти трубопроводы строятся по одним строительным нормам, практически из одинаковых труб, эксплуатируются при близких условиях. Это, во-первых, не позволяет найти эффективные методы борьбы с растрескиванием на магистральных газопроводах, во-вторых, не даёт возможности ответить на важный вопрос, надо ли опасаться в дальнейшем такого же массового развития коррозионного растрескивания на магистральных нефтепроводах.

Цели и задачи

В статье поставлена задача на основе анализа различных проявлений растрескивания трубопроводов, изучения известных особенностей и закономерностей, найти механизмы развития этого явления, построить его физическую модель, и на её основе попытаться ответить на поставленный вопрос.

Background

One of the unsolved problems in pipeline transport is the insufficient study of the phenomenon of stress corrosion cracking, which is often observed at the main gas pipelines and practically does not appear at the main oil pipelines, despite the fact that these pipelines are built according to same construction standards, practically from the same pipes, are operated under close conditions. Firstly, it does not allow to find effective methods against cracking at main gas pipelines, and secondly, it does not give an opportunity to answer the important question whether further development of corrosion cracking at main oil pipelines should be feared in the future.

Aims and Objectives

The article poses a problem on the basis of analysis of various manifestations of pipe cracking, the study of known features and regularities, to find the mechanisms for the development of this phenomenon, to construct its physical model, and on its basis to try to answer the question posed.

Результаты

Разработана физическая модель коррозионного растрескивания под напряжением подземных трубопроводов, которая позволяет объяснить все наблюдаемые закономерности данного вида разрушения. Модель основана на определяющей роли водорода, указывает возможные источники водорода на подземных трубопроводах, закономерности взаимодействия водорода с металлом трубопровода, показывает причины повышения внутренних напряжений и растрескивания стенки.

Согласно данной модели коррозионное растрескивание под напряжением протекает последовательно в несколько стадий.

Первая стадия - инкубационный период развития, когда растрескивания ещё нет, но внутри металла труб происходят существенные изменения: рост внутренних напряжений вследствие накопления газовых молекул H_2 и CH_4 на границах зёрен кристаллической структуры. Одновременно происходят структурные изменения в кристаллах, обезуглероживание и рост зёрен.

Вторая стадия - зарождение микротрещин, их рост и объединение в макротрещины. Этому способствуют напряжения, вызванные рабочим давлением и внешними силами. Одна из составляющих внешних сил - реакция грунта, что имеет особенно большое значение на участках со сложным неровным рельефом.

Третья стадия - рост макротрещин до разрушения трубопровода.

До завершения первой стадии не могут происходить остальные стадии. В этом кроются ответы на поставленные вопросы, а также способы торможения растрескивания в целом.

Для протекания каждой из указанных стадий необходимы определенные условия. Для протекания первой стадии необходим источник атомарного водорода. Таким источником на подземных трубопроводах является грунтовая влага (вода) при наличии электрохимического потенциала. Этот источник действует только в местах нарушения изоляции. Другим необходимым условием на первой стадии является наличие растягивающих механических напряжений выше определённого критического уровня - предела стресс-коррозии.

Предложенная физическая модель получила экспериментальное подтверждение путём исследования закономерностей внедрения водорода в стенку трубопровода. На основе данной физической модели сде-

Results

A physical model of stress corrosion cracking of underground pipelines has been developed, which makes it possible to explain all observed regularities of this type of destruction. The model is based on the determining role of hydrogen, indicates possible sources of hydrogen on underground pipelines, the patterns of interaction of hydrogen with the pipeline metal, shows the causes of increased internal stresses and cracking of the wall.

According to this model, stress corrosion cracking occurs successively in several stages.

The first stage is the latent period of development, when there is no cracking yet, but inside the metal of the pipes there are significant changes: the growth of internal stresses due to the accumulation of gas molecules H_2 and CH_4 at grain boundaries of the crystal structure. At the same time, structural changes occur in the crystals, decarburization and growth of the grains.

The second stage - the birth of microcracks, their growth and integration into macrocracks. This is facilitated by stresses caused by working pressure and external forces. One of the components of external forces - the reaction of the soil, which is particularly important in areas with complex uneven terrain.

The third stage is the growth of macrocracks before the destruction of the pipeline.

Before the completion of the first stage, the remaining stages can not occur. In this lie the answers to the questions posed, as well as the methods of inhibition of cracking in general.

For each of these stages, certain conditions are necessary. For the flow of the first stage, a source of atomic hydrogen is needed. Such source on underground pipelines is ground moisture (water) in the presence of electrochemical potential. This source only operates in places of insulation failure. Another necessary condition at the first stage is the presence of tensile mechanical stresses above a certain critical level - the stress corrosion limit.

The proposed physical model has been experimentally confirmed by studying the patterns of introduction of hydrogen into the wall of the pipeline. On the basis of this physical model, it was concluded that on the main oil pipelines it is possible to develop stress corrosion

лан вывод, что на магистральных нефтепроводах возможно развитие коррозионного растрескивания под напряжением в локальных зонах, где создается концентрация напряжений, а изоляция в этих же зонах либо отсутствует, либо изношена.

cracking in local zones, where a concentration of stresses is created, and insulation in these zones either is absent or worn out.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, коррозионное растрескивание под напряжением, инкубационный период, физическая модель, изоляция, водород, наводороживание, напряженное состояние, электрохимическая защита

Key words: main pipeline, stress corrosion cracking, latent period, physical model, insulation, hydrogen, hydrogenation, stress state, electrochemical protection

Введение

Одной из важнейших задач в современном трубопроводном транспорте является поддержание высокой надёжности, снижение аварийности. Несмотря на то, что в этом направлении многое делается, аварийные ситуации случаются, некоторые - с повторяющимися причинами. Остаются и вопросы, требующие изучения.

Один из таких вопросов связан с природой коррозионного растрескивания магистральных газопроводов, тогда как для других трубопроводов (нефтепроводов, распределительных газопроводов) этот вид разрушения считается нехарактерным. Если природа коррозионного растрескивания до сих пор не до конца изучена, то встают вопросы: почему она не изучена и какие исследования нужно провести для этого? Если изучена, то встает другой вопрос - почему эти знания не используются на практике для предотвращения коррозионного растрескивания магистральных газопроводов?

Действительно, современные методы борьбы с коррозионным растрескиванием под напряжением (КРН) состоят в следую-

щем. Методами внутритрубной диагностики с применением специальных магнитных снарядов выявляются места, где трещины достигли глубины, сравнимой с порогом чувствительности этих снарядов. В настоящее время чувствительность внутритрубных снарядов такова, что удастся надёжно определять трещины глубиной 1 мм и более. Далее на основе утверждённых методик из общего массива выделяются те дефекты, которые могут привести к разрыву в течение заданного промежутка времени (например, пяти ближайших лет). Дефекты, которые определены как опасные, срочно ликвидируются заменой труб, остальные дефекты (неопасные) остаются в составе трубопровода. При этом считается, что они не приведут к разрушению до момента следующих обследований. Все оставшиеся в трубопроводе дефекты заносят в специальную базу данных для слежения за их дальнейшим развитием, сопоставляя с результатами последующей диагностики.

Если проанализировать такую методику обеспечения безопасности с учётом этапов развития КРН, то легко можно увидеть, что бесконтрольной остается самая важная ста-

для развития явления - инкубационный период развития КРН. Следовательно, данная технология является запаздывающей. Фактически она не предотвращает и не останавливает развитие КРН, а только пытается исключить последний этап - само разрушение трубопровода. Все остальные процессы: наводороживание, повышение внутренних напряжений, структурные изменения, зарождение микротрещин, объединение их в макротрещины - остаются. Следовательно, при таком подходе общее техническое состояние трубопровода ухудшается, несмотря на огромный объем ремонтных работ по замене участков с опасными трещинами. С каждым разом количество опасных трещин, требующих ремонта, будет расти, а сам процесс никогда не остановится. Следовательно, эту технологию нельзя называть совершенной. А других методов и технологий, более эффективных в борьбе с КРН, пока не предложено на нормативном уровне.

Так высвечиваются вопросы: что делать, в каком направлении искать решение?

Ответ, как нам кажется, совершенно очевидный - надо разобраться с первым этапом развития КРН - инкубационным периодом.

Если каким-либо способом замедлить процессы в первый период, то роль остальных периодов фактически сводится к нулю. Чтобы найти такие способы, необходимо критически переосмыслить ранее выполненные исследования, пересмотреть материалы исследований происходящих разрывов по причине КРН, выполнить недостающие исследования.

Существуют явления, которые редко происходят или которыми занимались мало исследователей, поэтому они долгое время остаются непонятными. КРН относится к другому типу явлений. Оно наблюдается с заведомой регулярностью вот уже более 40 лет.

К его изучению привлекаются ведущие отраслевые институты.

Количество выполненных исследований так велико, что трудно охватить весь массив. И к настоящему времени сложилась ситуация, когда любая новая идея принимается в штыки большим сообществом «специалистов», призванных решать именно эту проблему. Поэтому новых результатов нет, нет и эффективных методов борьбы с этим злом - КРН.

В итоге к настоящему времени сложилось много гипотез и теорий о природе КРН [1-24], которые друг от друга отличаются тем, что разными исследователями на главную роль выдвигаются разные факторы. Одни исследователи направляют усилия на создание новых марок сталей, устойчивых к растрескиванию, другие видят проблему в некачественном изоляционном покрытии, которое слишком быстро теряет адгезию, третьи видят решение в совершенствовании технологии строительства трубопроводов. Встречаются также предложения обработать почву по всей трассе специальными составами, изменяющими кислотность или другие показатели.

Все эти и другие аналогичные предложения, несомненно, имеют основу, поскольку вытекают из частных исследований, но ни одно из них не способно решить проблему КРН в комплексе, поскольку они «выхватывают» из полного набора только частные зависимости от одного или несколько отдельных факторов. Причина тому - недостаточная изученность самой физической природы явления. Для комплексного решения проблемы КРН необходима комплексная физическая (химическая, механическая) модель явления, которая отделяет основные факторы и закономерности от побочных (второстепенных).

Предлагаемая физическая модель должна объяснить все известные факты и ответить на ряд вопросов, которые задаются

практически всеми специалистами, в том числе:

- Почему КРН регулярно наблюдается на магистральных газопроводах и практически не наблюдается на всех остальных трубопроводах: нефтепроводах, нефтепродуктопроводах, газораспределительных трубопроводах, промысловых трубопроводах?
- Почему КРН не наблюдается на воздушных участках трубопроводов, в том числе на воздушных участках магистральных газопроводов?
- Какие качества изоляционного покрытия следует развивать для эффективного торможения КРН (переходное сопротивление, прочность, адгезия, химический состав)?
- Какая взаимосвязь электрохимической защиты (ЭХЗ) с КРН? Можно ли, подбирая параметры ЭХЗ, тормозить КРН?

В данной статье приводятся основные положения физической модели КРН трубопроводов, её обоснование и подтверждения.

Методы исследования

Методы исследования включают:

1. Анализ известных особенностей развития КРН на магистральных газопроводах;

2. Исследование металла труб, вырезанных с мест разрушений. Механические испытания металла и металлографические исследования, анализ структурных изменений;

3. Комплексный анализ всех результатов исследований, в том числе, полученных разными авторами. Построение физической модели КРН. Выделение основных и второстепенных факторов и закономерностей;

4. Апробация модели КРН на известных наблюдениях и опытных данных.

Особенности коррозионного растрескивания под напряжением

В результате развития КРН на поверхности трубопровода появляется сеть параллельных трещин, ориентированных преимущественно в осевом направлении. На участках упругого изгиба ориентация трещин может стать кольцевой. Трещины зарождаются на наружной поверхности и развиваются в глубь стенки трубы. При КРН металл не растворяется, но в некоторых случаях КРН развивается одновременно с общей и язвенной коррозией.

На рисунках 1-4 показаны характерные картины развития КРН на магистральных газопроводах.

Рисунок 1. Продольные коррозионные трещины в зоне сварного стыка

Рисунок 2. Колония трещин, выявленная методом магнитно-порошковой дефектоскопии

Рисунок 3. Колония трещин, выявленная методом люминесцентной магнитной дефектоскопии

Рисунок 4. Трещины, выявленные оптическим методом (микроскопом)

Важно отметить, что КРН происходит только на подземных участках трубопроводов; на воздушных участках случаев разрушения по причине КРН не выявлено. На участках, где обнаружены трещины типа КРН, всегда изоляционное покрытие неудовлетворительного качества: адгезия местами отсутствует, покрытие охрупчено и растрескано, под изоляцией накапливается грунтовая вода (рисунки 5 - 8).

Статистика обнаруженных дефектов КРН отражена на рисунках 9, 10. По графи-

кам видно, что наибольшее число дефектов КРН обнаруживается на головных участках трубопроводов протяженностью до 40 км от компрессорной станции (КС).

С удалением от КС интенсивность развития КРН падает. Также просматривается чёткая зависимость от толщины стенки труб: чем меньше толщина стенки, тем больше количество дефектов. Эти особенности приводят к мысли, что одним из основных факторов, ускоряющих процесс КРН, является напряженное состояние.

Рисунок 5. Гофры на изоляционном покрытии

Рисунок 6. Поверхность трубы после снятия изоляционной пленки (тёмные участки - праймер на поверхности металла; светлые полосы - зоны контакта металла с грунтовой водой)

Рисунок 7. Охрупчивание и растрескивание изоляционного покрытия

Рисунок 8. Потеря адгезии под изоляцией

Рисунок 9. Распределение дефектов КРН вдоль газопровода

Рисунок 10. Зависимость КРН от толщины стенки труб

Важен известный из практики факт: электрохимическая защита трубопроводов не останавливает развитие КРН. Наоборот, в определенных условиях ЭХЗ ускоряет растрескивание трубопроводов.

Металлографические исследования металла на образцах, вырезанных из зоны разрушения, показывают, что КРН сопровождается структурными изменениями металла: происходит обезуглероживание и рост зерна,

появляются зоны водородного расслоения (рисунок 11). Из совокупности вышеизложенных сведений можно сделать предположение, что одним из ключевых элементов в процессе коррозионного растрескивания является водород, который проникает в металл труб извне через наружную поверхность. Остальные факторы являются сопутствующими и действуют в направлении либо ускорения, либо торможения КРН.

Для проверки данной гипотезы провели следующие лабораторные исследования.

Исследования металла труб

Методика исследований основана на вакуумном отжиге отобранных образцов при температуре, обеспечивающей выход водорода из металла, но не достаточно высокой для выхода других молекул, таких как кислород, азот и другие [25]. Уменьшение веса образца в результате отжига будет соответствовать весу выделившегося из металла водорода.

Исследовали фрагменты металла газопроводов Средняя Азия - Центр (САЦ-5) и Уренгой - Петровск, где периодически происходили аварии по причине КРН.

Оба фрагмента содержали трещины и кромку разрыва. При этом была поставлена задача - определить содержание водорода со стороны внутренней и внешней поверхностей, а также вблизи и на расстоянии от кромки разрыва.

Эти данные позволят установить направление распространения водорода в металле при КРН.

Была изготовлена серия из 8 образцов следующим образом. От каждого фрагмента были отрезаны по четыре образца размером 30 × 30 мм. Два из них были отрезаны у кромки разрыва, два других - на некотором удалении от кромки. Затем каждый образец был отфрезерован на половину толщины стенки: часть образцов со стороны наружной поверхности, другую часть - с внутренней стороны.

Все образцы были очищены от ржавчины (шкуркой) и промыты в растворе спиртацетон в соотношении 50/50 %. Очистка выполнялась путём ультразвуковой мойки с вы-

держкой по 20 мин в два приёма. Затем все образцы высушивали и взвешивали на аналитических весах.

Отжиг проводили в вакуумной камере при остаточном давлении $P = 10^{-5}$ мм рт. ст. Температура отжига $T = 900$ °С, время выдержки 1 ч.

После отжига повторно взвесили образцы. Результаты взвешиваний до и после отжига приведены в таблице 2. В этой же таблице приведены значения концентрации водорода в образцах.

Результаты эксперимента показали, что концентрация водорода в металле различна как по толщине стенки, так и по площади. Со стороны наружной поверхности концентрация водорода в 2-4 раза больше, чем со стороны внутренней поверхности. Вблизи кромок разрыва водорода больше по сравнению с участками на удалении от кромок. Из данного эксперимента следует, что водород проникает в стенку трубы со стороны наружной поверхности, а не изнутри.

Отсюда возникают следующие вопросы:

- Откуда берётся водород на наружной поверхности трубопровода?
- Как водород проникает в металл?
- Какие процессы происходят в металле с участием водорода?
- И наконец, почему КРН проявляется только на магистральных газопроводах?
- Какова роль напряженного состояния стенки трубы?
- Как влияют другие факторы?
- Почему электрохимическая защита не защищает от коррозионного растрескивания?

Попытаемся ответить на эти вопросы.

Источники водорода и его роль в коррозионном растрескивании

Как известно, водород - один из наиболее распространённых химических элементов, особенно в нефтегазовой отрасли. Он содержится в составе всех углеводородов, включая нефть, газ, нефтепродукты. Водород входит в состав молекул воды, кислот, оснований, сероводорода. На сероводородсодер-

жащих месторождениях оборудование и трубопроводы претерпевают сероводородную коррозию, где водород, выделяющийся в результате химической реакции сероводорода с

металлом (железом), играет определяющую роль в растрескивании. Это явление также известно при эксплуатации аппаратов и сосудов в нефтеперерабатывающих предприятиях [26].

Рисунок 11. Структура металла труб в зоне растрескивания

Таблица 1. Образцы и их характеристики

№ образца (маркировка)	№ фрагмента (трубопровод)	Внешняя или внутренняя	Местоположение относительно кромки разрыва
11	№ 1 (САЦ-5)	внешняя	на удалении 10 см
12		внутренняя	на удалении 10 см
13		внешняя	у кромки разрыва
14		внутренняя	у кромки разрыва
21	№ 2 (Уренгой- Петровск)	внешняя	на удалении 10 см
22		внутренняя	на удалении 10 см
23		внешняя	у кромки разрыва
24		внутренняя	у кромки разрыва

Таблица 2. Результаты испытаний образцов

№ образца	Вес образцов		Концентрация водорода $100 \cdot \Delta P / P_1$, %
	до отжига P_1 , г	после отжига P_2 , г	
№ 11	49,52085	49,50555	0,030906
№ 12	36,94584	36,94309	0,007444
№ 13	35,77159	35,73656	0,098023
№ 14	42,30859	42,29536	0,031280
№ 21	39,16668	39,16339	0,008401
№ 22	57,75508	57,75352	0,002701
№ 23	79,10124	79,0875	0,017373
№ 24	56,05055	56,04556	0,008903

В грунтовой воде водород содержится в составе молекул воды, солей, кислот и оснований. Их растворы содержат катионы H^+ и анионы OH^- , которые существуют в окружении полярных молекул воды $(H^+) \cdot n(H_2O)$ и $(OH^-) \cdot m(H_2O)$. При контакте металла труб с грунтовой водой в местах с отслоившимся изоляционным покрытием катионы водорода восстанавливаются до состояния нейтрального атома водорода под действием отрицательного потенциала самой трубы. После этого акта нейтральный атом водорода освобождается от своего окружения из полярных молекул воды, после чего его подвижность и активность многократно увеличиваются.

Существуют и другие источники водорода, например, химические реакции по следующим формулам [27, 28]:

Здесь e^- - обозначение электрона в формуле химической реакции.

Следует отметить, что в результате вышеуказанных химических реакций образуется атомарный водород, который затем при обычных условиях объединяется в молекулы и выделяется в виде газа. Если атомарный водород образуется на поверхности металла, который имеет отрицательный заряд, то вероятен также другой процесс. Единственный валентный электрон атома водорода сразу входит в общее электронное облако кристаллической решётки металла. Без своего электрона атом водорода представляет собой протон - элементарную частицу. Протон обладает большой подвижностью и легко может проникнуть в металл, тем более, само электрическое поле от системы ЭХЗ способствует этому переходу. Атомы водорода (протоны), оказавшись внутри кристаллической решётки металла трубы, сохраняют подвижность и активность.

Они могут практически свободно перемещаться в пределах кристаллической решётки. Выскочить за пределы металла им не-

выгодно энергетически; для этого им необходимо преодолеть энергетический барьер, создаваемый действием электронного газа решётки и системы ЭХЗ.

В пределах металла атомы водорода (протоны) могут участвовать в следующих реакциях.

1). Они могут объединиться друг с другом в молекулы водорода H_2 . Молекулы водорода являются устойчивыми образованиями с низкой подвижностью. Они скапливаются в межзёрненных границах, приводят к появлению и росту внутренних напряжений в структуре, создают препятствие для движения дислокаций, тем самым приводят к снижению пластичности металла.

2). Атомы водорода внутри кристаллической решётки могут соединиться с углеродом, который входит в карбидную составляющую стали.

Это, в свою очередь, приводит к следующим изменениям:

- происходит постепенное обезуглероживание цементита в структуре по схеме $Fe_3C + 4H = 3Fe + CH_4$; при этом образуются молекулы метана, которые скапливаются на границах зёрен;
- растут внутренние напряжения и зарождаются микротрещины;
- в микротрещинах продолжают накапливаться водород и метан в виде сильно сжатых газов; микротрещины растут;
- микротрещины объединяются, образуются макротрещины в направлении, перпендикулярном максимальным растягивающим напряжениям;
- все новые образования (CH , CH_2 , CH_3 , CH_4) представляют препятствия разной степени для дислокаций; дислокации оказываются заблокированными, пластичность металла снижается, ударная вязкость и трещиностойкость металла падают.

Все указанные процессы в комплексе составляют инкубационный период развития КРН на магистральных трубопроводах.

Эти процессы можно разложить на следующие основные группы:

1) генерация атомарного водорода на поверхности металла труб на участках с изношенным изоляционным покрытием;

2) проникновение атомарного водорода в объём металла в условиях действия ЭХЗ и высоких растягивающих напряжений;

3) структурные изменения в металле с участием проникающего водорода; повышение внутренних напряжений до значений, достаточных для зарождения микротрещин.

Собственно эти три положения и являются основными элементами физической модели коррозионного растрескивания подземных трубопроводов. Исходя из этих положений попытаемся ответить на поставленные вопросы.

Почему КРН происходит только на магистральных газопроводах? В чём их особенность по сравнению с другими трубопроводами?

Ответ кроется в напряженном состоянии магистральных газопроводов. Благодаря большому диаметрам и высоким рабочим давлениям в них напряжения в 1,5-2 раза выше, чем в среднем на магистральных нефтепроводах, и в 5-10 раз выше, чем на промысловых трубопроводах и в трубопроводах системы газоснабжения. На магистральных газопроводах рабочие напряжения достигают или превышают некоторое критическое значение, выше которого процесс внедрения водорода в металл заметно ускоряется. Это предельное значение логично называть *пределом стресс-коррозии* (или *пределом КРН*), аналогично другим пределам, таким как предел текучести, предел прочности, предел усталости [29].

Каждый из таких пределов представляет собой тот уровень напряжений, по достижении которого ускоряется тот или иной процесс – пластическое деформирование, разрыв, рост трещины по усталостному механизму.

В данном случае предел стресс-коррозии характеризует то значение растяги-

вающего напряжения, при котором водород легко проникает в металл. Возможно, для этого даже нет необходимости водороду находиться в атомарном состоянии.

Данная гипотеза хорошо согласуется с тем, что трещины КРН обычно направлены параллельно оси трубы (рисунки 1-3).

Это объясняется тем, что кольцевые напряжения больше продольных напряжений почти в 2 раза. Поэтому микротрещины, а затем макротрещины развиваются в направлении, перпендикулярном наибольшему компоненту растягивающих напряжений. Это и наблюдают на практике.

Однако отметим, что трубопровод часто проходит через участки со сложным рельефом, где за счёт больших изгибных напряжений продольные компоненты тензора напряжений могут превысить кольцевые напряжения. На таких участках трещины КРН вполне могут зародиться и развиваться в кольцевом направлении (рисунок 12).

Возможно ли КРН на магистральных нефтепроводах?

На магистральных нефтепроводах кольцевые напряжения, по-видимому, не достигают предельного уровня, достаточного для развития КРН.

Однако на всех трубопроводах имеются различного рода концентраторы напряжений: сварные соединения, дефекты, ремонтные конструкции, другие конструктивные элементы. В таких зонах напряжения могут достигать и превышать предел стресс-коррозии. Следовательно, на магистральных нефтепроводах возможно развитие КРН в локальных зонах, где имеется концентрация напряжений.

Почему стресс-коррозия не зафиксирована на дефектах магистральных нефтепроводов?

В данном случае ответ прост: в таких случаях причина разрушения всегда относилась к дефектам, а локальное КРН не изучалась.

Рисунок 12. Макроструктура разрушенного кольцевого сварного шва магистрального газопровода на участке со сложным рельефом

*Насколько важны другие факторы
в развитии КРН?*

В научной литературе отмечается, что на развитие КРН влияют множество факторов: состав грунта, климатические условия, кислотность, влажность, удаленность от компрессорной станции, вибрации, рельеф местности, марка стали и другие. Это, вероятно, правда. Но все эти факторы сами по себе не могут запустить механизм КРН, а только усиливают или ослабляют влияние ключевых факторов: водорода и напряженного состояния. Все возможные факторы влияния целесообразно разделить на внешние и внутренние.

Внешние факторы определяют скорость выделения атомарного водорода на поверхности металла труб. К ним относятся состояние изоляционного покрытия (повреждения, отсутствие адгезии), состояние поверхности металла, разность потенциалов «труба - земля», состав и концентрация веществ в грунтовой воде, pH среды (кислотность), влажность, температура окружающей среды (почвы).

Внутренние факторы определяют скорость проникновения водорода в металл и интенсивность процессов, происходящих внутри металла. К ним относятся химический состав и структура металла, температура металла, напряженное состояние, причём игра-

ют свою роль как напряжения от рабочего давления и внешних воздействий, так и внутреннее, в том числе действующие на уровне кристаллов и дислокаций.

Некоторые факторы, например температура и вибрация, относятся как к внешним, так и внутренним факторам, поскольку оказывают влияние на все процессы, происходящие как вне металла, так и внутри него.

Выводы

1. Предложена физическая модель инкубационного периода развития КРН на магистральных трубопроводах, способная объяснить все наблюдаемые особенности и закономерности данного явления. Она позволяет обосновать возможность развития КРН на тех или иных трубопроводах.

2. Из предложенной физической модели следует, что на магистральных нефтепроводах вполне возможно развитие локального КРН в зонах, где одновременно появляются два условия: имеется концентрация напряжений в виде дефектов или сварных соединений; на этом же месте изоляционное покрытие отсутствует или изношено.

3. Инкубационный период развития КРН представляет собой один из механизмов ухудшения (охрупчивания и растрескивания) металла при длительной эксплуатации трубопроводов.

Список литературы

1. Абдуллин И.Г., Гареев А.Г., Мостовой А.В. Диагностика коррозионного растрескивания трубопроводов. Уфа: Гилем, 2003. 100 с.
2. Ажогин Ф.Ф. Коррозионное растрескивание высокопрочных сталей. М.: Металлургия, 1970. 100 с.
3. Антонов В.Г., Балдин А.В., Галиуллин З.Т. и др. Исследование условий и причин коррозионного растрескивания труб магистральных газопроводов. М.: ВНИИГазпром, 1991. 43 с.
4. Асадуллин М.З., Усманов Р.Р., Аскаров Р.М., Гареев А.Г., Файзуллин С.М. Коррозионное растрескивание труб магистральных газопроводов // Газовая промышленность. 2000. № 2. С. 38-39.
5. Болотов А.С., Розов В.Н., Коатес А.К., Васильев Г.Г., Клепин В.И. Коррозионное растрескивание на магистральных газопроводах // Газовая промышленность. 1994. № 6. С. 12-15.
6. Вороненко Б.И. Коррозионное растрескивание под напряжением низколегированных сталей (обзор). I. Критерии и методы исследования // Защита металлов. 1997. Т. 33. № 2. С. 132-143.
7. Дикий И.И., Протсив И.М. О коррозионном растрескивании высокопрочных сталей в нейтральных средах // Защита металлов. 1992. Т. 28. № 6. С. 894-901.
8. Зайнуллин Р.С. Механика катастроф. Обеспечение работоспособности оборудования в условиях механохимической повреждаемости. Уфа: МНТЦ «БЭСТС», 1997. 426 с.
9. Гареева О.А., Худяков М.А., Климов П.В. Моделирование коррозионного растрескивания магистральных газопроводов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2010. Вып. 1 (79). С. 87-92.
10. Игнатенко В.Э., Маршаков А.И., Марищев В.А., Михайловский Ю.Н., Петров Н.А. Влияние катодной поляризации на скорость коррозионного растрескивания трубных сталей // Защита металлов. 2000. Т. 36. № 2. С. 132-139.
11. Карпенко Г.В., Василенко И.И. Коррозионное растрескивание сталей. Киев: Техника, 1971. 110 с.
12. Климов П.В., Гумеров К.М., Кунафин Р.Н. Исследование и разработка методов торможения стресс-коррозии на примере магистральных газопроводов Средняя Азия - Центр. СПб.: ООО «Недра», 2011. 228 с.
13. Конакова М.А., Теплинский Ю.А. Коррозионное растрескивание под напряжением трубных сталей. СПб.: Инфо-да, 2004. 358 с.
14. Лубенский С.А. Электрохимическое поведение и стойкость к коррозионному растрескиванию под напряжением трубных сталей в грунтах с мест прокладки МГ // Защита металлов. 2000. № 1. С. 164-167.
15. Мазель А.Г. О стресс-коррозии газопроводов // Газовая промышленность. 1993. № 7. С. 36.
16. Отт К.Ф. Стресс-коррозия на газопроводах. Гипотезы, аргументы и факты // Обзор. инф. Сер. «Транспорт и подземное хранение газа». М.: ООО «ИРЦ Газпром», 1998. 73 с.

References

1. Abdullin I.G., Gareev A.G., Mostovoi A.V. *Diagnostika korrozionnogo rastreskivaniya truboprovodov* [Diagnostics of Corrosion Cracking of Pipelines]. Ufa, Gilem Publ., 2003. 100 p. [in Russian].
2. Azhogin F.F. *Korrozionnoe rastreskivanie vysokoprochnykh staley* [Corrosion Cracking of High-Strength Steels]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 100 p. [in Russian].
3. Antonov V.G., Baldin A.V., Galiullin Z.T. e.a. *Issledovanie uslovii i prichin korrozionnogo rastreskivaniya trub magistral'nykh gazoprovodov* [Investigation of Conditions and Causes of Corrosion Cracking of Main Gas Pipelines]. Moscow, VNIIEgazprom Publ., 1991. 43 p. [in Russian].
4. Asadullin M.Z., Usmanov R.R., Askarov R.M., Gareev A.G., Faizullin S.M. *Korrozionnoe rastreskivanie trub magistral'nykh gazoprovodov* [Corrosion Cracking of Main Gas Pipelines]. *Gazovaya promyshlennost' - Gas Industry*, 2000, No. 2, pp. 38-39. [in Russian].
5. Bolotov A.S., Rozov V.N., Koates A.K., Vasil'ev G.G., Klepin V.I. *Korrozionnoe rastreskivanie na magistral'nykh gazoprovodakh* [Corrosion Cracking on Gas Main Pipes]. *Gazovaya promyshlennost' - Gas Industry*, 1994, No. 6, pp. 12-15. [in Russian].
6. Voronenko B.I. *Korrozionnoe rastreskivanie pod napryazheniem nizkolegirovannykh staley (obzor). I. Kriterii i metody issledovaniya* [Corrosion Stress Cracking of Low-Alloy Steels (Review). I. Criteria and Methods of Research]. *Zashchita metallov - Protection of Metals*, 1997, Vol. 33, No. 2, pp. 132-143. [in Russian].
7. Dikii I.I., Protsiv I.M. *O korrozionnom rastreskivanii vysokoprochnykh staley v neutral'nykh sredakh* [On the Corrosion Cracking of High-Strength Steels in Neutral Media]. *Zashchita metallov - Protection of Metals*, 1992, Vol. 28, No. 6, pp. 894-901. [in Russian].
8. Zainullin R.S. *Mekhanika katastrof. Obespechenie rabotosposobnosti oborudovaniya v usloviyakh mekhanokhimicheskoi povrezhdaemosti* [Mechanics of Disasters. Ensuring the Equipment Operability in Conditions of Mechanochemical Damage]. Ufa, MNTTs «BESTS», 1997. 426 p. [in Russian].
9. Gareeva O.A., Khudyakov M.A., Klimov P.V. *Modelirovanie korrozionnogo rastreskivaniya magistral'nykh gazoprovodov* [Modeling of Main Gas Pipeline Corrosion Cracking]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2010, Issue 1 (79), pp. 87-92. [in Russian].
10. Ignatenko V.E., Marshakov A.I., Marichev V.A., Mikhailovskii Yu.N., Petrov N.A. *Vliyanie katodnoi polyarizatsii na skorost' korrozionnogo rastreskivaniya trubnykh staley* [Effect of Cathodic Polarization on the Rate of Stress-Corrosion Cracking of Pipe Steels]. *Zashchita metallov - Protection of Metals*, 2000, Vol. 36, No. 2, pp. 132-139. [in Russian].

17. Притула В.В. Механизмы и кинетика стресс-коррозии подземных газопроводов // Тем. обзор. Сер. «Защита от коррозии в газовой промышленности». М.: ООО «ИРЦ Газпром», 1997. 56 с.
18. Седых А.Д., Лякишев Н.П., Кантор М.М., Антонов В.Г. Коррозионное растрескивание под напряжением металла труб // Газовая промышленность. 1997. № 6. С. 43-46.
19. Сергеева Т.К., Илюхина М.В., Шibaева Т.В. Механохимическое взаимодействие трубных сталей с грунтовыми средами, вызывающими стресс-коррозию МГ // Деформация и разрушение материалов: сб. матер. 1-ой Междунар. конф. М., 2006. С. 569-571.
20. Соловей В.О., Яковлев А.Я., Воронин В.Н., Алеников С.Г. Стресс-коррозия на магистральных газопроводах. Киров: ОАО Кировская областная типография, 2009. 320 с.
21. Сурков Ю.П., Рыбалко В.Г., Павлов М.Ю., Сычева Т.С. Зарождение трещин при коррозионном растрескивании газопроводов // Физика металлов. 1994. С. 147-151.
22. Филиппов Г.А., Морозов Ю.Д., Чевская А.Н. Факторы, влияющие на склонность трубных сталей к КРН // Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов: сб. тр. науч.-практ. семинара. Н.Новгород, 2006. С. 164-176.
23. Харионовский В.В. Стресс-коррозия магистральных газопроводов: методы, объемы, эффективность диагностирования // Газовая промышленность. 2005. № 7. С. 14-18.
24. Швенк В. Исследование причин растрескивания газопроводов высокого давления // Тр. Междунар. симпозиума по проблеме стресс-коррозии. М.: ВНИИСТ, 1993. С. 3-35.
25. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. М.: Металлургия, 1985. 216 с.
26. Коррозионная стойкость оборудования химических производств. Нефтеперерабатывающая промышленность: Справ. изд. / Под ред. Ю.И. Арчакова, А.М. Сухотина. Л.: Химия, 1990. 400 с.
27. Фролова Л.В. Коррозия и наводороживание углеродистых сталей в карбонатно-бикарбонатных средах // Коррозия: материалы, защита. 2004. № 3. С. 22-25.
28. Гумеров К.М. Механизмы изменения механических свойств металла труб и оборудования в водородосодержащих средах // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. № 3 (23). С. 84-89.
29. Лисин Ю.В., Неганов А.Д., Гумеров К.М. Исследования изменений свойств металла трубопроводов в процессе эксплуатации: обобщение результатов и перспективные разработки Уфимской научной школы // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. № 2 (29). С. 22-30.
11. Karpenko G.V., Vasilenko I.I. *Korrozionnoe rastreskivanie staley* [Corrosion Cracking of Steels]. Kiev, Tekhnika Publ., 1971. 110 p. [in Russian].
12. Klimov P.V., Gumerov K.M., Kunafin R.N. *Issledovanie i razrabotka metodov tormozheniya stress-korrozii na primere magistral'nykh gazoprovodov Srednyaya Aziya - Tsentral'nyy* [Research and Development of Methods of Braking Stress-Corrosion on the Example of Main Gas Pipelines Central Asia-Center]. Saint-Petersburg, Nedra Publ., 2011. 228 p. [in Russian].
13. Konakova M.A., Teplinskii Yu.A. *Korrozionnoe rastreskivanie pod napryazheniem trubnykh staley* [Corrosion Stress Cracking of Pipe Steels]. Saint-Petersburg, Info-da Publ., 2004. 358 p. [in Russian].
14. Lubenskii S.A. *Elektrokhimicheskoe povedenie i stoikost' k korrozionnomu rastreskivaniyu pod napryazheniem trubnykh staley v gruntakh s mest prokladki MG* [Electrochemical Behavior and Resistance to Stress-Corrosion Cracking of Pipe Steels in Soils from MG Sites]. *Zashchita metallov - Protection of Metals*, 2000, No. 1, pp. 164-167. [in Russian].
15. Mazel' A.G. O stress-korrozii gazoprovodov [About Stress Corrosion of Gas Pipelines]. *Gazovaya promyshlennost' - Gas Industry*, 1993, No. 7, pp. 36. [in Russian].
16. Ott K.F. *Stress-korroziya na gazoprovodakh. Gipotezy, argumenty i fakty* [Stress Corrosion on Gas Pipelines. Hypotheses, Arguments and Facts]. *Obzorn. inf. Ser. «Transport i podzemnoe khranenie gaza»* [Rev. Inf. Ser. «Transport and Underground Storage of Gas»]. Moscow, ООО «IRTs Gazprom», 1998. 73 p. [in Russian].
17. Pritula V.V. *Mekhanizmy i kinetika stress-korrozii podzemnykh gazoprovodov* [Mechanisms and Kinetics of Stress Corrosion of Underground Gas Pipelines]. Tem. obzor. Ser. «Zashchita ot korrozii v gazovoi promyshlennosti» [Overview. Ser. «Protection Against Corrosion in the Gas Industry»]. Moscow, ООО «IRTs Gazprom», 1997. 56 p. [in Russian].
18. Sedykh A.D., Lyakishev N.P., Kantor M.M., Antonov V.G. *Korrozionnoe rastreskivanie pod napryazheniem metalla trub* [Corrosion Stress Cracking of Metal Pipes]. *Gazovaya promyshlennost' - Gas Industry*, 1997, No. 6, pp. 43-46.
19. Sergeeva T.K., Ilyukhina M.V., Shibaeva T.V. *Mekhanokhimicheskoe vzaimodeistvie trubnykh staley s gruntovymi sredami, vyzyvayushchimi stress-korroziyu MG* [Mekhanokhemical Interaction of Pipe Steels with Ground Media, Causing Stress-Corrosion of MG]. *Sbornik materialov 1-oi Mezhdunarodnoi konferentsii «Deformatsiya i razrushenie materialov»* [Collection of Materials of the 1st International Conference «Deformation and Destruction of Materials»]. Moscow, 2006. pp. 569-571. [in Russian].
20. Solovei V.O., Yakovlev A.Ya., Voronin V.N., Alennikov S.G. *Stress-korroziya na magistral'nykh gazoprovodakh* [Stress Corrosion on Main Gas Pipelines]. Kirov, ОАО Kirovskaya oblastnaya tipografiya, 2009. 320 p. [in Russian].
21. Surkov Yu.P., Rybalko V.G., Pavlov M.Yu., Sycheva T.S. *Zarozhdenie treshchin pri korrozionnom rastreskivani gazoprovodov* [Initiation

of Corrosion Cracking in Gas Pipelines]. *Fizika metallov - Physics of Metals*, 1994, pp. 147-151. [in Russian].

22. Filippov G.A., Morozov Yu.D., Chevskaya A.N. Faktory, vliyayushchie na sklonnost' trubnykh stalei k KRN [Factors Affecting the Propensity of Tubular Steels to the CRN]. *Sbornik trudov nauchno-prakticheskogo seminara «Problemy stareniya stalei magistral'nykh truboprovodov»* [Collection of Scientific Practical Seminar «Aging Problems of Steel Trunk Pipelines»]. N.Novgorod, 2006. pp. 164-176. [in Russian].

23. Kharionovskii V.V. Stress-korroziya magistral'nykh gazoprovodov: metody, ob"emy, effektivnost' diagnostirovaniya [Stress Corrosion of Main Gas Pipelines: Methods, Volumes, Diagnostic Efficiency]. *Gazovaya promyshlennost' - Gas Industry*, 2005, No. 7, pp. 14-18. [in Russian].

24. Shvenk V. Issledovanie prichin rastreskivaniya gazoprovodov vysokogo davleniya [Investigation of the Causes of High-Pressure Gas Pipelines Cracking]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma po probleme stress-korrozii* [Proceedings of the International Symposium on Stress Corrosion]. Moscow, VNIIST, 1993, pp. 3-35. [in Russian].

25. Kolachev B.A. *Vodorodnaya khrupkost' metallov* [Hydrogen Brittleness of Metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 216 p. [in Russian].

Авторы

• Сильвестров Степан Аверкиевич
ООО «Астрапроект»
Директор
Российская Федерация, 420133, г. Казань,
пр. Ямашева, 102а, офис 3
тел./факс: (843) 556-76-52, 556-76-49
e-mail: aAstra@mail.ru

• Гумеров Айдар Кабирович, канд. техн. наук
ООО «Астрапроект»
Старший научный сотрудник
Российская Федерация, 420133, г. Казань,
пр. Ямашева, 102а, офис 3
e-mail: aAstra@mail.ru

The Authors

• Silvestrov Stepan A.
Astraproekt LLC
Director
102a, office 3, Yamashev ave., Kazan, 420133,
Russian Federation
tel/fax: (843) 556-76-52, 556-76-49
e-mail: aAstra@mail.ru

• Gumerov Aidar K., Candidate of Engineering
Sciences
Astraproekt LLC
Senior Researcher
102a, office 3, Yamashev ave., Kazan, 420133,
Russian Federation
e-mail: aAstra@mail.ru