

Исмагилов И.Г., Асадуллин М.З., Гаррис Ю.О., Гаррис Н.А.,  
Аскарлов Р.М.

*ООО "Баштрансгаз", Уфимский государственный нефтяной технический  
университет*

## **ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ГАЗОПРОВОДА НА АКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССОВ КРН**

Газопроводные компании терпят большие убытки от аварийных последствий в результате коррозионного растрескивания (КРН) магистральных газопроводов большого диаметра [1,2].

Анализ ситуаций на участках газопроводов Поляна – Москово уренгойского коридора, проложенных по пересеченной оврагами и балками местности, показал, что повторяющиеся подвижки отводов, которые происходят вследствие изменения температуры перекачиваемого газа, приводят к нарушению целостности изоляционного покрытия и открывают доступ грунтовым водам к металлу трубы.

Кроме того, в результате импульсного температурного воздействия в грунте, прилегающем к трубопроводу, создается специфическое движение влаги: при повышении температуры происходит миграция влаги к периферии, а при понижении температуры влага вновь устремляется к трубе. Т. о., создаются благоприятные условия для протекания коррозионных процессов: переменная влажность возле трубы активизирует коррозионное растрескивание [3,4].

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Учитывая большой объем исследований в области раскрытия причин возникновения, механизма развития и проблемы разработки мероприятий, предупреждающих коррозионное растрескивание магистральных трубопроводов, а также разнообразие подходов к оценке этого явления, остановимся только на одном из аспектов. Рассмотрим влияние температурного фактора на КРН, как наименее изученного, но представляющего несомненный практический интерес.

Нередко исследователи обходят этот вопрос, считая доказанным то положение, что температура не влияет на КРН. Однако, есть основания рассмотреть этот вопрос с других позиций, а именно, с позиций импульсного температурного воздействия и нестационарного теплообмена.

Разрушения газопроводов по причине КРН, как правило, происходят на начальных участках трассы с потенциально опасными перемещениями трубопровода. Под действием больших температурных перепадов, при несоответствии фактического положения оси трубопровода проектному и недостаточном сцеплении трубы с грунтом, происходят подвижки отводов.

С одной стороны, периодические подвижки трубопроводов приводят к нарушению целостности изоляционного покрытия и открывают грунтовым водам доступ к металлу трубы. Так, в результате импульсного температурного воздействия создаются условия для возникновения коррозионных процессов.

С другой стороны, изменение температуры стенки трубы влечет за собой изменение влажности прилежащего, или контактирующего с трубопроводом грунта.

И наконец, импульсное изменение температуры стенки трубы, а следовательно и прилежащего грунта, вызывает не только движение и перераспределение влаги в зоне теплового влияния трубопровода, но и меняет качество грунтовых электролитов, а следовательно, влияет на скорость и характер протекания коррозионных процессов.

Несомненный интерес представляют собой зарегистрированные случаи аварийных разрывов при низких рН преимущественно на участках с *переменным увлажнением* [5]. В то же время отмечается отсутствие повышенного риска КРН на постоянно обводненных участках пролегания трубопроводов.

Подчеркнем, что эти факты свидетельствуют в пользу нашей гипотезы об импульсном движении влаги в области повышенного риска КРН ненасыщенных грунтов.

Коррозионное растрескивание металла подземного трубопровода под напряжением представляется весьма сложным физическим явлением, механизм протекания которого полностью не изучен, и пока не имеет исчерпывающего объяснения. По сути дела, КРН - это явление синэргетическое и является продуктом развития неравновесных процессов, происходящих в окружающей трубопровод среде.

Анализ практических ситуаций показывает, что в условиях физического эксперимента практически невозможно смоделировать натурные условия сложнейших процессов КРН.

Именно проведенный промышленный эксперимент дает ту достоверную информацию о газопроводе, которую весьма затруднительно получить другим путем.

Таким образом, обращение к промышленному эксперименту, проведенному на газопроводе Поляна – Москово, имело своей **целью**: выявить качественный характер и количественные соотношения изменения влажности грунта вокруг трубопровода с тем, чтобы найти способы снижения активности коррозионных процессов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

На газопроводе Поляна – Москово оборудованы специальные замерные пункты: №1 на 1845км и №2 на 1850км трассы. На каждом из них размечены замерные сетки и установлены датчики температуры (термометры сопротивления), по 25 шт. Наблюдения за состоянием трубопровода и экспериментальные исследования были начаты 15.03.00 г.

Результаты обработки наблюдений выявили импульсный характер изменения как температуры, так и влажности слоя грунта, прилежащего к газопроводу [2,3].

С целью дальнейшего изучения процесса импульсного теплообмена и получения конкретных результатов и рекомендаций, которые можно было бы реализовать в производственных условиях, в ноябре 2001 года был проведен специальный промышленный эксперимент.

Изменение температуры грунта на контуре  
трубы (п. № 1) при отключении АВО  
с 12.11.01 по 15.11.01 г.

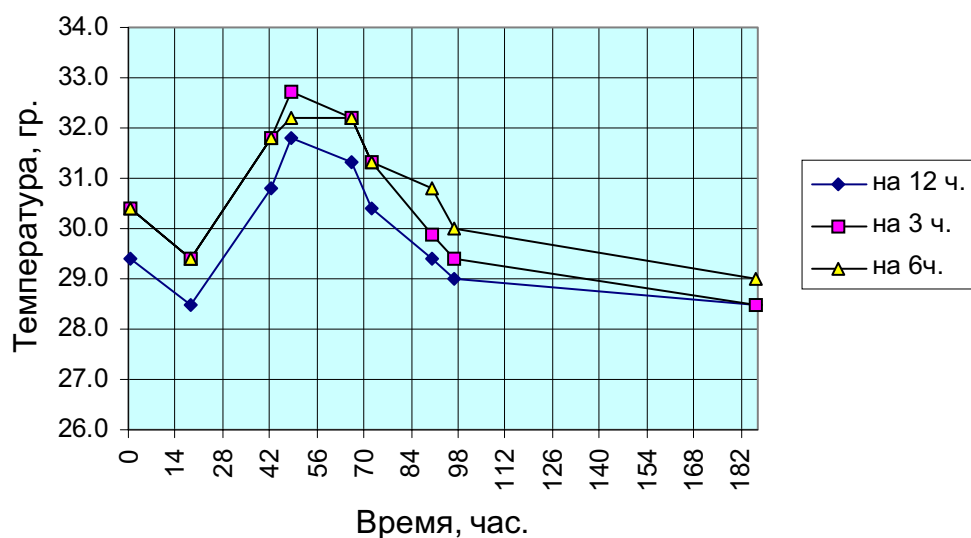


Рис. 1

Изменение влажности под действием  
температурного импульса 30/35/30

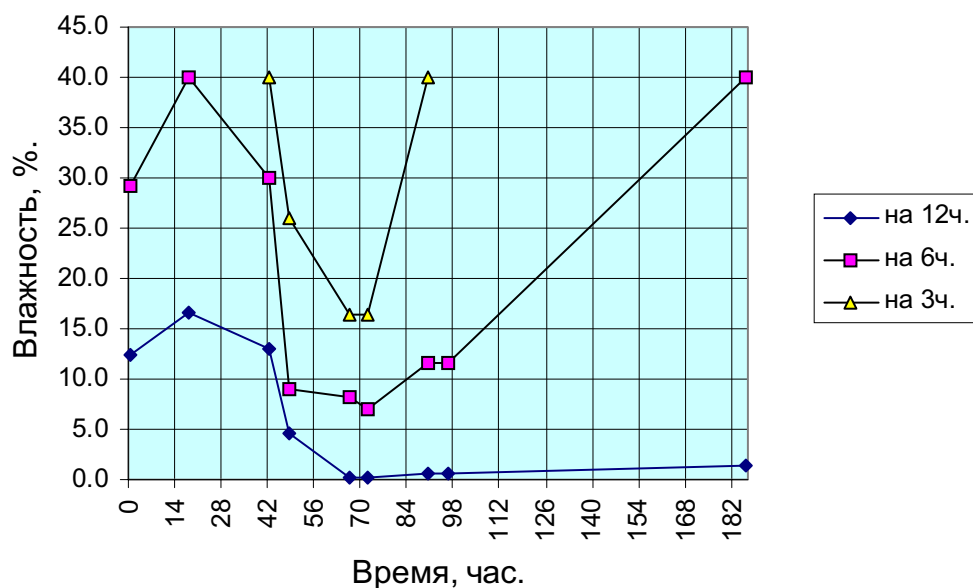


Рис. 2

Так как включение и отключение аппаратов воздушного охлаждения (АВО) - наиболее часто повторяющиеся операции, необходимые для охлаждения газа после нагнетателей и стабилизации его температуры при подаче в газопровод, то было принято решение по отслеживанию волны распространения температурного импульса, возникающего при включении и отключении АВО.

Промышленный эксперимент со ступенчатым изменением температуры газа  $t_r$  по схеме: 30/35/30 °С проводился на участке Поляна – Москово магистрального газопровода Уренгой – Новопсков в период с 12.11.01. по 19.11.01 предприятием "Баштрансгаз" при участии сотрудников каф. "Гидравлика и ГМ" УГНТУ. Целью опыта было отслеживание волны распространения импульса температуры, неизбежно возникающего в момент отключения или включения АВО и влияние этого импульса на протекание коррозионных процессов по типу КРН.

На рис. 1 представлен фрагмент, характеризующий изменение влажности по контуру трубы (на позициях: 12, 3, и 6 часов) за недельный период эксплуатации газопровода. Сопоставляя данные графики с температурными кривыми, изображенными на рис. 2, заметим, что они хорошо коррелируются. С ростом температуры влажность грунта возле трубы уменьшается, и наоборот, понижение температуры вызывает приток влаги к трубе.

На рис. 2 все три графика имеют минимум, что свидетельствует о прохождении тепловой волны. Действительно, минимальные значения влажности  $W$  отмечаются на 72 часа с момента повышения температуры газа до 35°С. В течение 3-х суток грунт интенсивно прогревался, и влажность грунта, контактирующего с трубопроводом уменьшилась в несколько раз. С момента включения вентиляторов АВО (15.11.01г.) грунт начал остывать, а его влажность  $W$  стала увеличиваться.

Эти графики не только подтверждают ранее полученные результаты, но и наглядно показывают, что такие технологические операции, как включение и отключение АВО изменяют температурный напор в грунте вокруг газопровода и **создают тепловой импульс.**

Таким образом, сопоставляя два факта: импульсного изменения температуры и влажности в зоне ее максимального скопления (на позиции 5...7 часах) и коррозионного разрушения, тоже на позиции 5...7 часов, можно установить связь между ними.

Т. о, импульсное изменение температуры стенки трубы, вызывающее почти синхронное изменение температуры прилегающего грунта и его влажности, стоит рассматривать как побудительный момент, активизирующий электрохимическую коррозию, интегрально проявляющийся в дискретном растрескивании металла под напряжением и разрушении наружной поверхности трубопровода в направлении максимального развития напряжений.

Такое толкование не противоречит, а скорее находится в соответствии и с моделью биокоррозии [6,7]. Коррозионная трещина представляет собой широко раскрытую конусообразную полость, имеющую несколько пасынковых трещин, заполненную продуктами коррозии, в том числе и органомогенными карбонатными отложениями. Вследствие колебания температуры стенки трубы, внутренних напряжений, влажности грунта и дискретного подрастания трещины, периодически открывается доступ питательной среды и новых микроорганизмов в полость трещины.

Это объясняет и тот факт, что на линейных участках КРН практически не обнаруживается. Если на заземленных линейных участках трещина закупоривается и не разрастается: бактерии замуровывают сами себя, - то на отводах, под действием высоких напряжений и подвижек она вновь и вновь открывается, обнажая новые контактные поверхности на микроуровне.

Следует отметить, что подобные явления также происходят в грунте в моменты перекрытия или открытия перемычек между отдельными нитками газопроводов. Это объясняется тем, что при изменении производительности трубопровода пропорционально уменьшаются или увеличиваются тепловые потери в окружающую среду, оказывая импульсное воздействие на контактирующий слой грунта и содержащуюся в нем влагу. Такие изменения провоцируют развитие КРН на конечных участках газопроводов.

### **ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ НА СКОРОСТЬ КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ**

Т.о., с изменением температуры газа изменяется влажность грунта, контактирующего с трубопроводом. Если температура газа меняется импульсно, то также импульсно, с некоторым запаздыванием, в силу тепловой инерции грунта, меняется его влажность.

При изменении влажности  $W$  меняется соотношение между потенциалами в различных точках грунта как по периметру трубопровода, так и по длине, что является причиной возникновения уравнивающих токов и активизирует коррозионные процессы.

Влияние влажности грунта  $W$  на скорость коррозионных процессов – явление весьма сложное. Особенно, если мы говорим не о лабораторном эксперименте, а о промышленных условиях, более того, об объекте, коррозионная среда вокруг которого непрерывно меняется по такому импульсному режиму, когда, практически, не повторяются одинаковые состояния.

Кроме того, при увеличении влажности происходит набухание коллоидных частиц глинистых грунтов, что уменьшает проходное сечение капилляров. Это замедляет перенос влаги и тормозит катодные процессы. При смене или чередовании грунтов вдоль трассы газопровода отличие процессов еще более выражено.

Поэтому, при непрерывном изменении климатических факторов и состояния грунта вокруг газопровода возникают непредсказуемые условия протекания коррозионных процессов.

Коррозия металла труб находится в функциональной зависимости от влажности грунта. Рассмотрим влияние основных параметров на этот процесс.

1. В маловлажных грунтах с ростом влажности до некоторого предела, назовем его критическим, интенсивность коррозионных процессов нарастает. При дальнейшем повышении влажности скорость коррозии  $v_{кор}$  снижается и становится равномерной. Т.е., характер изменения скорости коррозии  $v_{кор}$  в зависимости от влажности  $W$  может быть описан кривой, имеющей максимум, см. рис. 3.

Такое явление можно объяснить условиями протекания анодной и катодной реакций на стальной поверхности, находящейся в контакте с капиллярно-пористой средой, какой является грунт [8].

При уменьшении влажности грунта происходит сдвиг потенциала анода в положительную сторону (анодная поляризация), уменьшающий скорость анодного растворения. Поэтому при уменьшении влажности грунта скорость коррозии уменьшается. См. анодные поляризационные кривые для различной влажности грунта на рис. 4а.

Торможение катодного процесса увеличивается с увеличением влажности. Интенсивность этого торможения меняется с изменением влажности грунта, см. рис. 4в. В [9] отмечается, что катодный потенциал является важным фактором стресс – коррозии. Это подтверждают лабораторные опыты [10,11].

Очевидно, что для каждого грунта существует определенный интервал влажности, при которой обеспечивается наибольшая скорость протекания как анодного, так и катодного процессов, что будет соответствовать максимальной скорости коррозии стали в данном грунте.

На условия нестабильной катодной поляризации во времени указывается в [9,12]. В [12] отмечается: "...в большинстве случаев интенсивное протекание коррозионных процессов стимулируется нестабильностью поляризации во времени".

2. В сечении газопровода большого диаметра складываются различные условия для доступа воздуха в верхней части трубы и к нижней образующей. Создается дифференциальная аэрация. Особенно отчетливо это проявляется в оврагах: под отводами грунт нередко имеет высокую степень оглеения, что свидетельствует о недостатке кислорода.

В зависимости от влажности  $W$  грунта преобладающее значение может иметь перенос кислорода либо в жидкой, либо в газовой фазе по межпоровому пространству. Очевидно, что по периметру трубы диффузия кислорода через слой грунта будет переменной, что также влияет на скорость коррозии.

3. И наконец, на некотором удалении от трубопровода, за счет температурного напора поддерживается зона переувлажненного грунта, см. рис.5. Для условий газопровода Поляна – Москово это расстояние невелико и меняется в пределах от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров. В данном случае это 20...60 см.

При колебательных процессах на контуре трубы зона переувлажненного грунта является **аккумулятором влаги**: периодически подпитывает активную коррозионную зону или наоборот, принимает мигрирующую влагу. Очевидно, что скорость коррозионных процессов при этом постоянно меняется. Коррозионный процесс практически приостанавливается, когда  $W \rightarrow 0$ , и активизируется, когда  $W \rightarrow W_{кр}$ . Сопоставляя данные аргументы с графиком на рис. 3, делаем вывод, что коррозионное растворение металла в подобных ситуациях происходит **дискретно**.

Отметим, что коррозионное растрескивание под напряжением также носит **дискретный характер**.

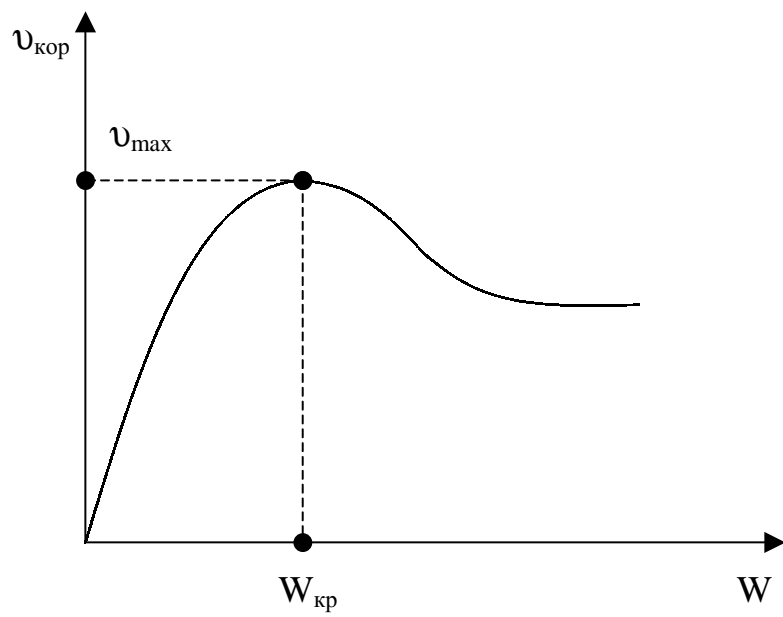


Рис. 3

Поляризационные кривые для различной влажности грунта  
 $(W_1 > W_2 > W_3)$

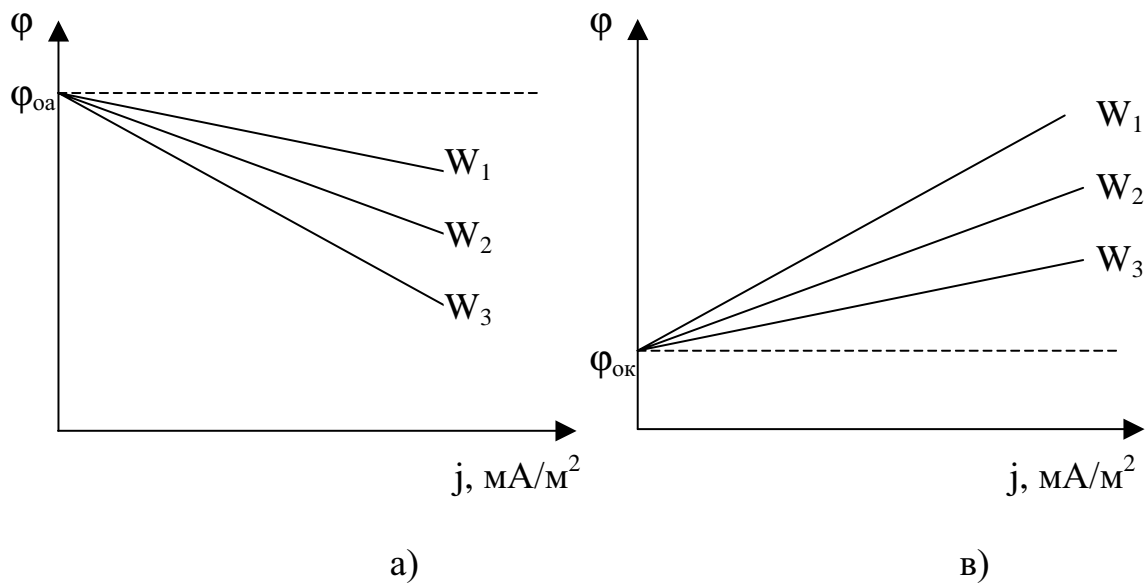


Рис. 4



### **СТАБИЛИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ГАЗОПРОВОДА, КАК МЕРА СНИЖЕНИЯ АКТИВНОСТИ КРН**

Одним из наиболее простых мероприятий является стабилизация температурного режима газопровода, в результате чего колебания влажности прилегающего к трубопроводу грунта сводятся к минимуму.

Однако, анализ экспериментальных данных показал, что параметры теплообмена не стабилизируются на начальном участке газопровода даже при обеспечении постоянства температуры газа на выходе из АВО  $t_r = 30^\circ\text{C}$ . Колебания температуры на замерном пункте № 2 достигали  $6,7^\circ\text{C}$  в месяц и более.

На основании проведенных исследований предлагается регламент эксплуатации газопровода по температуре и давлению, обеспечивающий стабильный гидрологический режим грунта на участке газопровода с пересеченной местностью (для данного газопровода на первых 20...30 км). Расчеты показали, что при этом летние и зимние температуры газа после АВО должны отличаться примерно на  $2^\circ\text{C}$ .

### **ПАКЕТ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ**

Регламент эксплуатации рассчитывается с помощью пакета прикладных программ, который разработан для целей прогнозирования эксплуатационных режимов магистрального газопровода большого диаметра.



Программы написаны на языке Object Pascal в среде Delphi, обладают удобным пользовательским интерфейсом и возможностью вывода результатов на принтер.

1. COEFF – расчет коэффициента теплопередачи  $K$  на основе диспетчерских данных;

2. GIDR3 – расчет коэффициента гидравлической эффективности по диспетчерским данным;

3. GAS – расчет теплогидравлических режимов газопровода по допустимым давлениям  $P_x$  и температурам  $T_x$  лимитирующих участков, подверженных КРН.

Программы соответствуют отраслевому стандарту [13] и позволяют учесть следующие факторы:

- тепловую интерференцию параллельно уложенных  $N$  трубопроводов большого диаметра в одном коридоре;

- отбор газа в промежуточном пункте практически при любой точности исходной информации, в том числе и при использовании диспетчерских данных;

- изменение параметров теплообмена в течение года в зависимости от климатических условий;

- эффект Джоуля-Томпсона в соответствии с отраслевым стандартом с учетом зависимости термодинамических свойств газа от приведенных температуры  $T_{пр}$  и давления  $P_{пр}$ ;

- реальные свойства газа через коэффициент сжимаемости;

- изменение теплофизических свойств грунта вследствие его подсушки или переувлажнения в зоне теплового влияния газопровода.

Отличительной особенностью и преимуществом предлагаемого пакета программ является то, что он позволяет выполнить расчеты эксплуатационных режимов газопровода в условиях дефицита исходной информации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Регламент эксплуатации, рассчитанный данным пакетом прикладных программ, в настоящее время проходит стадию внедрения на участке газопровода Поляна-Москово. С 2000 по 2002 г. температуры газа на выходе из АВО поддерживались на заданном уровне. За данный период аварий не наблюдалось. Исследование выполнено по заказу ООО "Баштрансгаз".

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гареев А.Г., Иванов И.А., Абдуллин И.Г. и др. Прогнозирование коррозионно-механических разрушений магистральных трубопроводов. Научный, технический, социальный вклад газовиков XX века в развитие научно-технического прогресса. - М.: ИРЦ Газпром, 1997. 170 с.

2. Асадуллин М.З., Усманов Р.Р., Аскарлов Р.М. и др. Коррозионное растрескивание магистральных газопроводов. Газовая промышленность. – 2000. - № 2. – С. 38 – 39.

3. I. Ismagilov, N. Garris, M. Asadullin, R. Askarov. Impulse temperature influence on stress-corrosion cracking of big diameter gas main. Oil and Gas business. [www.ogbus.org/authors/Garris/gar\\_e.pdf](http://www.ogbus.org/authors/Garris/gar_e.pdf), 2002. - 9 p.

4.Исмагилов И.Г., Гаррис Н.А., Асадуллин М.З., Аскарлов Р.М. Импульсное температурное воздействие на коррозионное растрескивание магистральных газопроводов большого диаметра. Нефтегазовое дело. [www.ogbus.net / authors / Garris / gar\\_1. pdf](http://www.ogbus.net/authors/Garris/gar_1.pdf), 2002. - 9 с.

5.Public Inquiry Concerning Stress Corrosion Cracking on Canadian Oil and Gas Pipelines, Report of NEB, MH-2-95,Nov. 1996.

6.Отт К.Ф. Стресс-коррозия на газопроводах. Гипотезы, аргументы и факты /ОИ РАО "Газпром. – М.: 1998. – 73 с.

7. Отт К.Ф. Стресс – коррозионная повреждаемость магистральных газопроводов. Газовая промышленность. – 2000. - № 4. – С. 38 – 41.

8.Дизенко Е.И., Новоселов В.Ф., Тугунов П.И. и др. Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров. Учебник. М., 1968. 199 с.

9.Быков В.Ф. Стресс-коррозия на газопроводе Комсомольское – Челябинск. Газовая промышленность, 1999 г., № 3. С. 52 – 54.

10.Сергеева Т.К. Механизм стресс-коррозионного растрескивания труб на магистральных газопроводах России//Основные причины процессов коррозионного растрескивания под напряжением. – М.: ИРЦ Газпром, 1996. – С. 27 – 35.

11.Волгина Н.И. Разработка метода и критериев устойчивости к стресс – коррозии металла магистральных газопроводов: Дис... канд. техн. наук. – М., 1997. – 120 с.

12.Ачильдеев И.Я., Винокурцев Г.Г., Денисов А.Н. Проблемы объективной оценки степени защищенности подземных сооружений от коррозии. Сер. Коррозия и защита сооружений в газовой промышленности. – М.: ВНИИГазпром, вып. 3, 1989. 25 с.

13.Общесоюзные нормы технологического проектирования. Магистральные трубопроводы. Часть I. Газопроводы. ОНТП 51-1-85.- М.: ВНИИЭгазпром, 1985.- 220 с.