

## Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

1. Расчет и проектирование композиционных материалов и элементов конструкций / Аннин Б.Д., Каламкаргов А.Л., Колпаков А.Г., Партон В.З. - Новосибирск: Наука, 1993. - 236 с.
2. Петров В.В., Овчинников И.Г., Ярославский В.И. Расчет пластинок и оболочек из нелинейно-упругого материала. - Саратов: Изд-во СГУ, 1976. - 133с.
3. Михайлов Б.К. Пластины и оболочки с разрывными параметрами. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1980. - 196 с.

### Сведения об авторе

**Пичугин С.Н.**, к.т.н., директор ЗАО «БЭСКИТ», г. Санкт-Петербург, тел.: (812)2724415, e-mail: beskit@mail.ru

**Pichugin S.N.**, Director of CJSC «BESKIT», phone: (812)2724415, e-mail: beskit@mail.ru

УДК 621.648

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА ТРУБОПРОВОДА

**В.Ф. Новиков, С.М. Кулак, К.Р. Муратов, О.К. Мацура**  
(Тюменский государственный нефтегазовый университет)

#### Эксплуатация трубопровода, напряжения, магнитные методы диагностики деформаций

#### Pipeline operation, stress, magnetic methods of deformation diagnostics

*Prediction of pipeline metal fatigue failure. Novikov V.F., Kulak S.M., Muratov K.R., Matsura O.K.*

*In this paper we propose a magnetic method to determine a location of large seasonal changes in stress to assess the deformation amplitude which will help to make adjustments in calculations of the pipeline resource life. Tables 2, ref. 8.*

**П**оскольку трубопровод не относится к динамически работающим устройствам, до недавнего времени мало внимания уделялась влиянию долговременным изменяющимся нагрузкам на его ресурс. В определенной мере это обусловлено и отсутствием оперативных методов диагностики мест, где реализуются напряжения, обеспечивающие малоцикловую усталость. В последнее время эти вопросы поднимаются всё чаще [1].

В процессе эксплуатации подземный магистральный трубопровод испытывает циклическое нагружение вследствие: 1) колебаний давления  $P$  газа; 2) колебаний температуры газа и сезонных изменений температуры окружающей среды (грунта); 3) движения блоков земной коры в геодинамических зонах; 5) вибраций, создаваемых работающим компрессором на компрессорной станции [1-3].

В работе [1] приведены результаты измерения давления газа на одном из замерных участков северного газопровода диаметром 1220 мм (в 2 км от компрессорной станции). Оказалось, что давление в процессе эксплуатации изменяется случайным образом, и имеются одиночные всплески давления с размахом 0,6÷10 МПа. Также выявлены высокочастотные пульсации давления с амплитудой 0,1 МПа (проектное давление 5,4 МПа).

Изменение давления газа приводит к колебаниям напряжений около 5÷10 % предела текучести металла труб. Число циклов этих изменений достигает

## Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

1054106 в год.

Приведены (табл.1) номинальные значения температуры и давления газа на выходе из компрессорной станции (КС) ГП диаметром 1420 мм, и соответствующие им значения кольцевых и осевых напряжений, рассчитанных как для прямолинейного трубопровода бесконечной длины [2].

Таблица 1

**Номинальные значения рабочих параметров ГП D=1420мм**

Температура газа $t$ , °C	Давление газа $P$ , МПа	Кольцевые напряжения в металле трубопровода при номинальном давлении $\sigma_k$ , МПа	Осевые напряжения в металле трубопровода при номинальном давлении $\sigma_o$ , МПа
30-40	7-7,5	240-250	75-80

В работе [4] приведена динамика изменения среднемесячной температуры и давления газа на выходе из КС-5 ГП 1420 мм Комсомольское - Челябинск в течение трёх лет (1995-1997 гг.). За этот период среднее значение температуры газа составляло  $\approx 28^\circ\text{C}$ , а её изменение  $\pm 7^\circ\text{C}$  составляло 2-3 цикла в год. Давление газа в среднем было порядка 7 МПа и изменялось в интервале  $\pm 0,4$  МПа, совершив за один год то же количество циклов. Проведённая оценка изменения кольцевых и осевых напряжений на основе этих данных по [5] показана в табл.2.

Таблица 2

**Изменение кольцевых  $\sigma_k$  и осевых  $\sigma_o$  напряжений, вызванных колебаниями температуры и давления**

$\sigma_k$ , МПа Изменения, вызванные колебаниями давления	$\sigma_o$ , МПа Изменения, вызванные колебаниями давления	$\sigma_o$ , МПа Изменения, вызванные колебаниями температуры
$\pm 15$	$\pm 20$	$\pm 20$

Кроме того, 1-2 раза в год останавливается работа КС ГП для проведения либо плановых ремонтных работ, либо по причине аварии, диагностики, ремонта изоляции и т.д. Это те случаи, когда давление газа в трубе уменьшается до нуля и затем восстанавливается до рабочего значения.

Как известно, наибольшее число аварий приходится на первые 30-40 км ГП от КС. В литературе по газопроводам нет единого мнения, почему вблизи КС разрушения ГП происходят значительно чаще. Одним из объяснений являются температурные деформации ГП, так как температура трубы на выходе из КС выше, чем на удалённых от неё участках. Особенно ярко такие деформации должны проявляться в переходный между зимой и весной период, когда фронт промерзания в одних участках фиксирует ГП грунтом, а другие участки на выходе КС окажутся в протаявшем грунте и, следовательно, будут иметь большую свободу перемещения. Согласно [1-3] в феврале-марте происходит наибольшее число аварий.

Так как ГП проходит неоднородный грунт (торф, болото, песок, глина), то некоторые его участки будут слабо препятствовать удлинению трубы, вызванному действием температуры и давления, а другие (например, песчаная насыпь, пригруз, дорожная насыпь и т.д.) достаточно жёстко закрепляют её. Поэтому накапливаемые в трубопроводе деформации будут реализовываться в слабо-закреплённых участках, и связанные с ними удлинения трубы приводят к её

## Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

изгибу (образованию арок, гофр). В этом случае, в области аркообразования могут наблюдаться даже пластические деформации трубопровода. Будет происходить движение трубы и вследствие этого разрушение изоляции, активизация коррозионных и стресс-коррозионных процессов.

Предлагаемые и опробованные нами [6] методы позволяют определять места, где происходит локализация деформаций трубопровода без его вскрытия, и предварительно оценивать величины напряжений.

Изменения температуры окружающей ГП среды за один год, если не учитывать кратковременные и малозначимые изменения, происходят, как правило, один раз, то есть за время работы ГП совершается порядка 30 циклов.

Таким образом, за время средней продолжительности эксплуатации магистрального трубопровода (~30 лет) он испытает порядка  $10^2$  циклов нагружения на уровне  $(0,5-1)u_T$ , вызванных колебаниями температуры и давления газа, температуры окружающей среды, технологическими остановками работы ГП и т.д.

Циклически изменяющиеся нагрузки приводят к усталостному изменению структуры металла, его магнитных свойств и соответствующему изменению распределения магнитного поля рассеяния. Необходимо оценить, как эти усталостные изменения скажутся на количественной стороне наблюдаемого нами явления, в частности, величине напряжённости магнитного поля рассеяния металла газопровода ( $H$ ) и его магнитоупругой чувствительности.

Как известно, напряжённость магнитного поля рассеяния ферромагнитного материала прямо пропорциональна его коэрцитивной силе  $H_c$ . В справочнике «Неразрушающий контроль» под редакцией В.В.Клюева [7] представлены результаты магнитного контроля (по коэрцитивной силе  $H_c$ ) сопротивления усталостному разрушению плоских образцов из сталей. Как следует из этих результатов, при испытании образцов растяжением в упругой области кривой нагружения при  $u < u_T$  (лёгкий режим) коэрцитивная сила  $H_c$  стабильно не изменяется до  $N > 10^6$  циклов. В области упругопластических деформаций при  $u \approx u_T$  (умеренный режим)  $H_c$  начинает незначительный рост при  $N = 10^5$  циклов. При данных условиях имеет место многоцикловая усталость. При  $u > u_T$  (тяжёлый режим)  $H_c$  резко увеличивается уже при  $N = 10^3$  циклов нагружения.

Обследуемый нами [6] газопровод (диаметром 1420 мм) «Уренгой-Сургут-Челябинск» выполнен из стали марки X70 (икс 70), у которого  $u_T = 530-550$  МПа,  $u_b = 630-650$  МПа. Заметные усталостные изменения  $H_c$  (следовательно, и напряжённости магнитного поля рассеяния металла) металла ГП будут наблюдаться при нагрузках  $u > 550$  МПа, приводящих к его значительной деформации  $\varepsilon \sim 10^{-3}$ . Проведённая калибровка показала, что наибольшие изменения напряжений, которые газопровод испытал в течение одного сезона, составляют 200 МПа ( $u < u_T$ ).

Из вышесказанного, можно сделать вывод, что на большинстве участков ГП усталостные нагрузки существенно не изменяют структуру металла, поэтому не скажутся на его магнитных свойствах и, следовательно, на величине измеряемого магнитного поля рассеяния газопровода. Если нагрузки в металле будут достигать значений  $u > u_T$ , тогда изменения магнитных свойств появляются при  $(3-5) \cdot 10^2$  циклах. Такую ситуацию можно ожидать в местах локализации напряжений (арках). Это приведёт к увеличению коэрцитивной силы  $H_c$  в местах аркообразования и, следовательно, абсолютного значения магнитного поля  $H$  ГП. Однако магнитоупругое изменение  $\Delta H$  - параметр, предлагаемый нами для контроля напряжений в металле трубопровода, будет пропорционален  $\sim H$  и  $\mu_s/H_c$ , а величина  $H \sim H_c$ . Таким образом, относительное изменение магнитоупругого сигнала будет определяться главным образом изменением магнитоупругости насыщения ( $\mu_s$ ), которые заметны при пластических деформациях [8].

## Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

Следовательно, на величине магнитоупругой памяти большинства участков подземного ГП мало скажутся структурные усталостные изменения его металла.

Изменение магнитных свойств стали будет происходить и вследствие её многолетнего старения, которое увеличивает хрупкость, прочность, уменьшает вязкость и при этом увеличивается коэрцитивная сила. Для количественной оценки влияния этих изменений на эффект магнитоупругого размагничивания металла ГП (эффект МУП) необходимо провести калибровку эффекта на трубах ГП, проработавших не одно десятилетие.

Предлагаемые нами магнитные методы [6] позволяют определять места больших сезонных изменений напряжений, оценивать амплитуды деформаций и помогут внести коррективы в расчёты по ресурсу долговечности трубопровода.

### Список литературы

1. Харионовский В.В. Надёжность и ресурс конструкций газопроводов. - М.: ОАО Издательство «Недра», 2000. -467с.
2. Бородавкин П.П., Синюков А.М. Прочность магистральных трубопроводов - М.: Недра, 1984. -248с.
3. Бородавкин П.П., Березин В.Л. Сооружение магистральных трубопроводов: учебник для вузов. – Изд.2-е, перераб. и доп.- М.: Недра, 1987.- 471 с.
4. Крылов Г.В. Быков В.Ф., Сергеева Т.К., Башкин А.В. Стресс-коррозия на газопроводе Комсомольское-Челябинск. Газовая промышленность.-1999.-№3.-С.52- 54.
5. СНиП 2.04.12-86 Расчёт на прочность стальных трубопроводов. 01.01.87.
6. Новиков В.Ф., Важенин Ю.И., Бахарев М.С., Кулак С.М., Муратов К.Р. Диагностика мест повышенной разрушаемости трубопровода, Изд-во «Недра» 2004. -С.198.
7. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. Под ред. Клюева В.В. – М.: Машиностроение. 2003. –С.656.
8. Новиков В.Ф., Бахарев М.С. Магнитная диагностика механических напряжений в ферромагнетиках. Тюмень. 2001. – С. 220.

### Сведения об авторах

**Новиков В.Ф.**, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой «Физика, методы контроля и диагностики», Тюменский государственный нефтегазовый университет, тел. (3452) 25-69-44, e-mail: [physics1@tsogu.ru](mailto:physics1@tsogu.ru)

**Кулак С. М.**, к.т.н., доцент кафедры «Физика, методы контроля и диагностики», Тюменский государственный нефтегазовый университет, тел. (3452) 25-69-44, e-mail: [physics1@tsogu.ru](mailto:physics1@tsogu.ru)

**Муратов К. Р.**, к.т.н., доцент кафедры «Физика, методы контроля и диагностики» Ю Тюменский государственный нефтегазовый университет, тел. (3452) 25-69-44, e-mail: [kamil@tsogu.ru](mailto:kamil@tsogu.ru)

**Мацура О. К.**, инженер кафедры «Физика, методы контроля и диагностики», Тюменский государственный нефтегазовый университет, тел. (3452) 25-69-44, e-mail: [physics1@tsogu.ru](mailto:physics1@tsogu.ru)

**Novikov V.F.**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, Head of Department «Physics of Monitoring and Diagnostics Methods», Tyumen State Oil and Gas University, phone: +7(3452) 25-69-44 e-mail: [physics1@tsogu.ru](mailto:physics1@tsogu.ru)

**Kulak S.V.**, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Department «Physics of Monitoring and Diagnostics Methods», Tyumen State Oil and Gas University, phone: +7(3452) 25-69-44 e-mail: [physics1@tsogu.ru](mailto:physics1@tsogu.ru)

**Muratov K.R.**, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Department «Physics of Monitoring and Diagnostics Methods», Tyumen State Oil and Gas University, phone: +7(3452) 25-69-44 e-mail: [physics1@tsogu.ru](mailto:physics1@tsogu.ru)

**Matsura O.K.**, engineer, Department «Physics of Monitoring and Diagnostics Methods», Tyumen State Oil and Gas University, phone: +7(3452) 25-69-44 e-mail: [physics1@tsogu.ru](mailto:physics1@tsogu.ru)