

УДК 621.643.053

## РЕЗЕРВЫ ПРОЧНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗО- И НЕФТЕПРОВОДОВ

Н.Г. МАЯНЧИК

(Хартфордский университет, США),  
канд. техн. наук, доц. Г.Д. МАШКОВЦЕВ  
(Полоцкий государственный университет)

По конструктивной форме магистральные газопроводы и нефтепроводы относятся к классу листовых конструкций – трубопроводам больших диаметров (более 600 мм). Рассматривается проблема резервов прочности при их длительной эксплуатации с точки зрения металлографических исследований, обычных критериев и новой методики релаксационных испытаний. Анализируются существующие нормативные документы расчета на статические и малоцикловые нагрузки. Приводится обоснование применения коэффициента деформационного старения (надежности по материалу) в расчете магистральных трубопроводов и его аналитическое описание на основе экспериментальных исследований, указанных в списке литературы. Указывается на то, что коэффициент деформационного старения не является фиксированной величиной, а изменяется в течение определенного промежутка времени при длительной эксплуатации материала магистральных трубопроводов.

**Введение.** В статье рассматривается целесообразность статического расчета линейной части газо- и нефтепровода, исключая расчет на малоцикловые нагрузки на примере стали 17ГС, диаметром 720 мм и внутренним давлением 5,37 МПа. При этом рассматривается действительная область работы магистрального трубопровода в процессе его эксплуатации, принимая во внимание существующую систему дифференцированных коэффициентов надежности нормативных документов. Анализируется возможность изменения механических характеристик материала трубопровода. Дается краткое описание новой методики релаксационных испытаний. Приводится список использованных источников, подтверждающих сущность высказываемых предположений и рассуждений. Даны краткие выводы, рассматриваемые с различных точек зрения по оценке состояния материала конструкции трубопроводов в процессе эксплуатации и выявления резервов прочности.

**Основная часть.** Известно, что линейная часть газо- и нефтепровода и их сварные узлы испытывают действие как статических, так и малоцикловых (повторно статических) нагрузок. Отдельные его участки могут испытывать в среднем 300...350 и более циклов повторных нагрузок в год [1] или  $7 \cdot 10^3$  циклов за 20 лет эксплуатации с изменением давления от 0 до  $p$  [2], вызванным различными факторами. Становится очевидной проверка малоцикловой прочности по формуле [2, 3]:

$$\sigma_{\max} \leq \alpha R_v \gamma_v \left( \frac{N_b}{N} \right)^m \leq \frac{R_u}{\gamma_u}, \quad (1)$$

где  $N_b = 5 \cdot 10^5$  – базовое число циклов нагрузки при расчете на малоцикловую прочность;  $R_{nv} = \alpha R_v \gamma_v$  – сопротивление усталости;  $\gamma_u = 1,3$  – коэффициент надежности для элементов конструкций, рассчитываемых на прочность с использованием расчетных сопротивлений  $R_u$ .

Однако формула (1) теряет всякий смысл расчета даже при эксплуатации магистрального трубопровода в течение 150 лет или  $5,25 \cdot 10^4$  циклов нагрузки трубопровода. Это легко подтверждается расчетом при следующих исходных данных: сталь 17ГС с пределом текучести 345 МПа и пределом прочности 510 МПа (в исходном состоянии); коэффициент асимметрии  $\rho = 0,2$ ; группа элементов и соединений при расчете на выносливость,  $R_u = \frac{R_{um}}{\gamma_m} = \frac{510}{1,05} = 485$  МПа.

$$\text{Тогда получим, что } \alpha R_v \gamma_v \left( \frac{N_b}{N} \right)^m = 580 > \frac{R_u}{\gamma_u} = \frac{485}{1,3} = 373 \text{ МПа.}$$

Для той же стали кольцевые напряжения от расчетного внутреннего давления не должны превышать величину расчетного сопротивления  $R_1 = 260$  МПа, определяемую по формуле [4]:

$$R_1 = \frac{R_1'' m}{k_1 k_u}, \quad (2)$$

где  $R_1'' = R_{um} = 510$  МПа – временное сопротивление (предел прочности) стали 17ГС;  $m = \gamma_c = 0,75$  – коэффициент условий работы трубопровода 1...2-й категории при расчете его на прочность и устойчивость;

$k_1 = \gamma_m = 1,47 \dots 1,55$  – коэффициент надежности по материалу в зависимости от характеристики трубы (ее изготовления и методов контроля);  $k_n = \gamma_n = 1,0$  – коэффициент надежности по назначению трубопровода в зависимости от условного диаметра (720 мм) и внутреннего давления ( $p = 5,37$  МПа).

Становится понятным, что магистральный трубопровод, спроектированный по действующей нормативно технической документации, будет эксплуатироваться только в упругой области при действующем напряжении меньше  $\frac{3}{4}$  предела текучести ( $260/345 = 0,754$ ). Расчетное сопротивление, определяемое по [4]  $R_1 = 260$  МПа, меньше значения  $\frac{R_u}{\gamma_u} = \frac{485}{1,3} = 373$  МПа, определяемого по [2, 3], в 1,43 раза.

Тем самым мы видим существенный, неиспользуемый резерв прочности трубопровода, при котором он может эксплуатироваться десятки лет без снижения рабочего давления. Установленный факт подтверждается результатами исследования микроструктуры металла труб ферритно-перлитного класса методами оптической и электронной микроскопии [5]: «В металле газопровода после длительной эксплуатации в условиях нагружения, предусмотренных проектом (т.е. при действующем напряжении, которое меньше  $\frac{3}{4}$  предела текучести металла трубы), наблюдали только виды дислокационной субструктуры, характерные для металла труб до эксплуатации. Сходство дислокационных субструктур металла труб (до и после эксплуатации) приводит к выводу, что при длительной эксплуатации в условиях, предусмотренных на стадии проектирования, действенность механизмов упрочнения и охрупчивания существенным образом не меняется. Заметных изменений свойств металла труб газопровода при длительной эксплуатации в условиях, предусмотренных проектом, ожидать не следует». Авторы опираются на допущения, принимаемые во внимание в расчетах на прочность на стадии проектирования магистральных трубопроводов. Указывается предположение о статическом характере нагружения трубопроводов и ограничение значения действующих напряжений, которые меньше принятого с определенными расчетными коэффициентами временного сопротивления металла труб (использование нормами дифференцированной системы коэффициентов запаса прочности). Как было показано, система регламентируемых дифференцированных коэффициентов надежности отодвигает действующие напряжения в трубопроводе в область упругих деформаций металла труб до значений  $0,75\sigma_{0,2}$  на выходе из компрессорных станций, а на остальной протяженности магистральных трубопроводов еще меньше. Иными словами, при эксплуатации магистральных трубопроводов в условиях, предусмотренных проектом, металл труб подвергается нагружению только в упругой области [5] и заметных изменений дислокационной структуры металла в процессе эксплуатации не обнаруживается.

Дифференцированная система коэффициентов, используемая в нормативных документах [2 – 4], подробно описана в работе [6] и учитывает определенную группу факторов, которые принимают во внимание возможное несоответствие реальной ситуации расчетным данным. В [7] рекомендуется введение дополнительного коэффициента деформационного старения в формулу (2), которая запишется в следующем виде:

$$R_1 = \frac{R_1' m}{k_1 k_n c_\sigma}, \quad (3)$$

где  $c_\sigma$  – коэффициент деформационного старения, определяемый по таблицам [7] или по формуле [8]:

$$c_\sigma = k_{vie} = e^{mct}, \quad (4)$$

здесь  $m$  – опытный коэффициент, зависящий от внешнего фактора при разделе фаз (жидкость – металл, воздушная среда – металл и т.п.);  $c$  – содержание углерода;  $t$  – срок эксплуатации.

В формуле (3) коэффициент  $k_1 = \gamma_m = 1,47 \dots 1,55$  по определению [6] является коэффициентом надежности по материалу, учитывающим возможные неблагоприятные отклонения какой-либо характеристики материала. Из этого определения следует, что коэффициент деформационного старения, имеющий аналитическое описание (4), является по сути дела коэффициентом надежности по материалу и не является константой. По нашему мнению, действующие напряжения, с учетом дополнительного коэффициента деформационного старения в формуле (3), отодвигаются еще дальше от предела текучести в область упругой работы материала трубопровода. Поэтому снижение расчетного сопротивления  $R_1$  на величину  $c_\sigma$  было бы не корректным. Логичнее ввести дополнительное условие, учитывающее неблагоприятное отклонение характеристики материала в процессе длительной эксплуатации трубопровода:

$$c_\sigma = k_{vie} \leq k_1 = \gamma_m. \quad (5)$$

При несоблюдении условия (5) в формуле (3) вместо  $k_1 = \gamma_m$  следует принимать  $c_\sigma = k_{vie}$ . В противном случае, следуя рекомендациям [7], искусственно занижается величина рабочего давления, что приводит к существенным экономическим потерям при перекачке нефтепродукта.

Таким образом, возникает противоречие. С одной стороны, утверждается, что заметных изменений свойств металла труб газопровода при его длительной эксплуатации не происходит [5], а с другой стороны, рекомендуется учитывать влияние деформационного старения в процессе эксплуатации трубопровода. Испытания по рассматриваемой методике [9 – 13] позволяют устранить это противоречие.

Исследование проводят сжатием образца (вместо растяжения) на машине высокой жесткости – жестко-деформирующее устройство, работающее на сжатие, с клиновым механизмом перемещения (нижний траверс). При этом исключается проскальзывание образца в захватах, свойственное испытаниям на растяжение, и повышается точность снимаемых характеристик. Кроме того, машина высокой жесткости охватывает большой диапазон измеряемых нагрузок: от 2 до  $3 \cdot 10^4$  Н, обеспечивает высокую разрешающую способность дискретности измерений, соответствующих лучшим зарубежным образцам прецизионной измерительной техники, и позволяет определять новую характеристику – предел микропластичности  $\sigma^0$ . В обычных испытаниях эту величину чрезвычайно трудно определить. Чувствительность обычных машин не позволяет ее исследовать. Машина высокой жесткости позволяет определить ее сразу. В связи с этим становится справедливым замечание об оценке состояния материала стальных конструкций по величине предела микропластичности и по коэффициенту запаса (надежности по материалу). Обычные методики исходят из того, что состояние материала можно квалифицировать и определять по величине предела текучести и по его изменению после того, как конструкция простояла какое-то время в условиях эксплуатации. Однако величина предела текучести не есть достаточная характеристика и ее используют в паре с величиной коэффициента надежности по материалу, уменьшающего величину предела текучести до значений, которые соответствуют работе конструкций в упругой области, отодвигая действующее напряжение за предел микропластичности  $\sigma^0$ . В состоянии поставки материала предел микропластичности связан с пределом текучести – коэффициентом надежности по материалу. Однако с течением времени величина параметра  $\sigma^0$  меняется, по-своему отличаясь от  $R_{yL}$ . Таким образом, коэффициент надежности по материалу с течением времени также меняется, и в состаренном состоянии материала нельзя использовать эту величину как постоянную, даже если известно напряжение течения. Более того, когда в эксплуатационном режиме  $\sigma^0 < \sigma$  коэффициент надежности по материалу как фиксированная (постоянная) величина теряет всякий смысл при расчетах.

По экспериментальным кривым релаксации материала в исходном состоянии и состаренном и новой характеристике  $\sigma^0$  строятся рассуждения о том, в каком состоянии находится материал эксплуатируемой конструкции. Сравнивая ее с величиной рабочих напряжений  $\sigma$  можно судить о том, как происходит накопление повреждений в металле и, самое главное, понять, как будут происходить с течением времени структурные изменения в материале. Эта механическая характеристика  $\sigma^0$ , определяемая довольно просто, чувствует старение и структурные изменения. Используя эти данные, можно перейти к вопросу определения остаточного ресурса. В рамках этой картины определение остаточного ресурса определяется двумя группами процессов: во-первых, процессы структурных изменений; во-вторых, процессы накопления повреждений. Это процессы, которые меняют величину  $\sigma^0$  до значения рабочего напряжения. Они еще не приводят к накоплению дефектов в материале. Если определять уровень его дефектности обычными методами, то ничего не обнаруживается. Тем не менее старение будет иметь место, и  $\sigma^0$  будет меняться. Как только  $\sigma^0$  дойдет до уровня рабочих напряжений, материал выйдет из безопасного режима работы и в нем начинается накопление повреждений. Наблюдаются изменения дислокационной структуры материала, которые могут приводить к существенным изменениям скорости «повреждающих процессов», а в некоторых случаях и к изменению их механизмов. Это следующая группа процессов, которые можно рассчитывать тем или иным способом. Применимы традиционные методики и методики, основанные на последних достижениях физики пластических деформаций. К сожалению, в настоящее время эффективные способы расчета кинетики процессов старения и их влияния на механические свойства металлов отсутствуют. В частности, это связано с отсутствием эффективных методик определения механических свойств металлов, чувствительных к развитию процесса старения. Заметим, что традиционно определяемый параметр – предел текучести при растяжении – мало чувствителен к развитию процессов старения в углеродистых сталях, так как масштабы изменения  $\sigma_{0,2}$  не вполне отражают масштабы тонких микроструктурных изменений, происходящих в металле в процессе эксплуатации. Конечно, на поздних стадиях развития старение отражается и на пределе текучести, и на твердости, и на трещиностойкости материала. Но это, как правило, происходит «слишком поздно», когда структурные изменения достигают опасных масштабов и грозят катастрофическим разрушением конструкции. В связи с этим возникает необходимость использования новых методик, позволяющих оценивать механические характеристики, чувствительные к развитию процессов старения металла [13].

#### Выводы

1. С точки зрения обычных критериев, механические характеристики материала рассматриваются авторами [5], как что-то неизменное, объясняя упругой работой материала трубопровода в процессе его эксплуатации.

2. В работе [10] нами показано, что материал конструкции в процессе его длительной эксплуатации и деформационного старения может находиться в различных состояниях: нормальное, пластичное; упрочненное, пластичное; сильно упрочненное, хрупкое; разупрочненное, хрупкое; сильно разупрочненное, без трещин или с трещинами. При этом для оценки состояния элемента конструкции используется отношение предела текучести до эксплуатации (в исходном состоянии) к пределу текучести после эксплуатации и дополняется информацией о типе кривой релаксации. Следует заметить, что предел текучести материала в исходном состоянии отличается от значения [3], принимаемого с весьма малой вероятностью (близкой к нулю) появления меньшего значения при достаточно большом числе испытаний. В нашем случае (для оценки состояния материала) принимается среднее, наиболее часто встречающееся значение предела текучести до и после эксплуатации. Для поверочного расчета конструкции используется наименьшее значение.

3. Новая методика релаксационных испытаний [8 – 13] с использованием машины высокой жесткости является весьма эффективной и открывает новые возможности для более точной оценки состояния материала конструкций после их длительной эксплуатации и выявления резервов прочности.

4. На основе большой статистики проведенных испытаний по методике релаксационных испытаний получено аналитическое описание изменения коэффициента деформационного старения (4) для любого интервала времени, который с высокой точностью согласовывается с экспериментальными данными [1, 7].

5. Становится очевидным применение условия (5) в расчете обследуемых стальных конструкций, в том числе магистральных трубопроводов. При этом учитывается неблагоприятное отклонение характеристики материала, а также выявление резерва прочности в процессе длительной эксплуатации трубопровода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Старение труб нефтепроводов / А.Г. Гумеров [и др.]. – М.: Недра, 1995. – 218 с.
2. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции) / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 148 с.
3. Стальные конструкции: СНиП II-23-81\* / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 96 с.
4. Магистральные трубопроводы: СНиП 2.05.06-85 / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 52 с.
5. Исследование структуры металла газопроводов после их длительной эксплуатации / Н.П. Лякишев [и др.] // Металлы. – 2005. – № 1. – С. 3 – 16.
6. Учет ответственности зданий и сооружений в нормах проектирования строительных конструкций / В.А. Отставнов [и др.] // Строительная механика и расчет сооружений. – 1981. – № 1. – С. 11 – 14.
7. Учет старения трубных сталей при проектировании и эксплуатации магистральных нефтепроводов: метод. рекомендации / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т по сбору, подготовке и транспорту нефти и нефтепродуктов. – Уфа, 1988. – 30 с.
8. Машковцев, Г.Д. Учет деформационного старения при проектировании и эксплуатации вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефтепродуктов / Г.Д. Машковцев // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений: сб. тр.; под ред. Д.Н. Лазовского. – Минск: УП «Технопринт», 2001 – С. 288 – 290.
9. Чувильдеев, В.Н. Новая методика оценки эксплуатационного состояния и остаточного ресурса / В.Н. Чувильдеев // Новые методы технического диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса конструкций и оборудования, работающего под давлением: материалы совещ., Новополоцк, 4 – 6 февр. 1997 г. – Новополоцк: ПГУ, 1997. – С. 20 – 26.
10. Оценка эксплуатационного состояния элементов строительных конструкций, основанная на анализе данных, получаемых при релаксационных испытаниях в области микропластической деформации / В.Н. Чувильдеев [и др.] // Информационный бюллетень. Белорусская ассоциация не разрушающего контроля. – Минск, 1996. – № 7. – С. 15 – 18.
11. Машковцева, Н.Г. Возможности методики релаксационных испытаний при оценке эксплуатационного состояния стальных конструкций / Н.Г. Машковцева, Г.Д. Машковцев // Бюллетень строительной техники. Метрология. – 1998. – № 10. – С. 13.
12. Использование методики релаксационных испытаний для оценки сталей транспортных трубопроводов / В.Н. Чувильдеев [и др.] // Проблемы безопасности и надежности трубопроводного транспорта: тез. докл. науч.-техн. конф., Новополоцк. – Новополоцк, 1999. – С. 67 – 69.
13. Чувильдеев, В.Н. Возможности методики релаксационных испытаний (РИ) при оценке эксплуатационного состояния конструкций, работающих под давлением / В.Н. Чувильдеев, Н.Г. Машковцева // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2000. – С. 34 – 43.

Поступила 13.04.2007