



УДК 622.692.4.074.2

АНАЛИЗ НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ К НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМУ СОСТОЯНИЮ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

ANALYSIS OF REGULATORY REQUIREMENTS FOR THE STRESS-STRAIN STATE OF GAS PIPELINES

Сарычев Игорь Леонидович

начальник производственного отдела
по эксплуатации магистральных газопроводов,
ООО «Газпром трансгаз Ухта»
isarychev@sgp.gazprom.ru

Кузьбожев Александр Сергеевич

доктор технических наук, профессор,
начальник отдела надежности и ресурса
Северного коридора ГТС,
филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Ухта
a.kuzbozhev@sng.vniigaz.gazprom.ru

Бирилло Игорь Николаевич

кандидат технических наук,
начальник лаборатории надежности объектов
газотранспортной системы отдела надежности
и ресурса Северного коридора ГТС,
филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Ухта
i.birillo@sng.vniigaz.gazprom.ru

Аннотация. В статье проанализированы нормативные требования к напряженно-деформированному состоянию магистральных газопроводов, обеспечивающих их безопасную эксплуатацию на участках разных категорий при транспортировке газа с разным значением рабочего давления. Установлено, что для магистральных газопроводов с рабочим давлением свыше 9,8 МПа нормативные документы регламентируют более низкие значения допустимых кольцевых напряжений, то есть более высокий запас кольцевых напряжений до предела текучести металла труб, но допускают более значительную величину температурных и изгибных воздействий и возможность упруго-пластического деформирования металла труб от этих воздействий.

Ключевые слова: газопровод, категория участка, рабочее давление, предел текучести, допустимые напряжения.

Sarychev Igor Leonidovich

Head of the Production Department
for the Exploitation of Gas Pipelines,
LLC Gazprom transgaz Ukhta
isarychev@sgp.gazprom.ru

Kuzbozhev Alexander Sergeevich

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of Reliability and Resource Department
of the Northern Corridor of the GTS,
branch of Gazprom VNIIGAZ LLC, Ukhta
a.kuzbozhev@sng.vniigaz.gazprom.ru

Birillo Igor Nikolaevich

Candidate of Technical Sciences,
Head of the Laboratory for Reliability
of Gas Transmission System Facilities
of Reliability and Resource Department
of the Northern Corridor of the GTS,
branch of Gazprom VNIIGAZ LLC in Ukhta
i.birillo@sng.vniigaz.gazprom.ru

Annotation. The article analyzes the regulatory requirements for the stress-strain state of gas pipelines, which ensure their safe operation in sections of different categories when transporting gas with different values of working pressure. Regulatory documents regulate lower values of permissible ring stresses, but allow a greater value of temperature and bending effects and the possibility of elastoplastic deformation of the pipe metal from these effects for gas pipelines with a working pressure of more than 9,8 MPa.

Keywords: gas pipeline, pipeline section category, operating pressure, yield strength, permissible stresses.

Соблюдение нормативного уровня напряженно-деформированного состояния (НДС) магистральных газопроводов (МГ) является необходимым условием для обеспечения их надежной эксплуатации. До ввода в работу МГ Бованенково – Ухта, состоявшегося в 2012 г., транспорт газа по Российским газовым магистралям осуществлялся с рабочим давлением не более 7,4 МПа. Требования к уровню НДС таких МГ регламентировались СНиП 2.05.06-85, а с 01 июля 2013 г. его актуализированной редакцией в виде свода правил СП 36.13330 [1]. Особенности вышеназванных документов является то, что их требования распространяются только на магистральные трубопроводы с рабочим давлением не более 9,8 МПа, т.е. эти документы не могут быть применены для МГ Бованенково – Ухта, предназначенного осуществлять транспорт газа с рабочим давлением 11,8 МПа. В этой связи с 1 января 2009 г. был введен в действие отраслевой стандарт СТО Газпром 2-2.1-249 [2], распространяющийся на вновь проектируемые и реконструируемые газопроводы и ответвления от них условным диаметром до 1400 мм включительно с избыточным давлением среды до 24,52 МПа (250 кгс/см²). При этом до утверждения вышеназванного нормативного документа [2] в статусе Национального стандарта (Свода правил) его требования распространяются только на магистральные газопроводы с рабочим давлением свыше 9,8 МПа (100 кгс/см²).



Для обеспечения надежной эксплуатации МГ значения механических напряжений в стенках труб не должны превышать допускаемых значений, т.е. должно выполняться условие

$$\sigma \leq [\sigma], \tag{1}$$

где σ – фактическое значение механических напряжений; $[\sigma]$ – допускаемое значение механических напряжений.

При этом в каждой точке трубопровода рассматривается плоское напряженное состояние, составляющими компонентами которого являются кольцевые ($\sigma_{кц}$) и продольные ($\sigma_{пр}$) напряжения. Радиальные напряжения (σ_r), являющиеся третьей компонентой напряженного состояния газопроводных труб, не превышают 4 % от уровня кольцевых напряжений $\sigma_{кц}$ и по этой причине при расчете МГ не учитываются ввиду их незначительной величины.

Значения эквивалентных напряжений $\sigma_{эқв}$ при плоском напряженном состоянии рассчитываются по формуле:

$$\sigma_{эқв} = \sqrt{\sigma_{кц}^2 - \sigma_{кц}\sigma_{пр} + \sigma_{пр}^2}. \tag{2}$$

В соответствии с СП 36.13330.2012 [1] для МГ с рабочим давлением до 9,8 МПа (100 кгс/см²) значение допускаемых напряжений определяется следующим выражением:

$$[\sigma] = \frac{m}{0,9k_H} \sigma_T, \tag{3}$$

где m – коэффициент условий работы газопровода, принимаемый равным 0,660 для участков категории В, 0,825 для участков I и II категорий, 0,990 для участков категорий III и IV; k_H – коэффициент надежности по назначению газопровода, принимаемый по таблице 1; σ_T – нормативный предел текучести металла труб, МПа.

Значения $[\sigma]$, рассчитанные по формуле (3), используются для оценки соответствия нормам:

- кольцевых напряжений $\sigma_{кц}$;
- продольных напряжений $\sigma_{пр}$ при $\sigma_{пр} \geq 0$;
- эквивалентных напряжений $\sigma_{эқв}$ при $\sigma_{пр} < 0$.

Таблица 1 – Значения коэффициента k_H

Условный диаметр газопровода	Внутреннее давление p		
	$p \leq 5,4$ МПа	$5,4 < p \leq 7,4$ МПа	$7,4 < p \leq 9,8$ МПа
500 и менее	1,100	1,100	1,100
600–1000	1,100	1,100	1,155
1200	1,155	1,155	1,210
1400	1,155	1,210	1,265

В соответствии с СТО Газпром 2-2.1-249 [2] для МГ с рабочим давлением свыше 9,8 Мпа (100 кгс/см²) значения допускаемых кольцевых, продольных и эквивалентных напряжений определяются по-разному. Значение допускаемых кольцевых напряжений определяется по формуле:

$$[\sigma]_{кц} = \min \{k_T \sigma_T; k_B \sigma_B\}, \tag{4}$$

где k_T, k_B – расчетные коэффициенты по пределу текучести и по пределу прочности, соответственно, принимаемые по таблице 2 в зависимости от категории участка МГ; σ_B – нормативный предел прочности (временное сопротивление) металла труб.

Таблица 2 – Значения коэффициентов k_T и k_B

Категория участка газопровода*	k_T	k_B
Н	0,72	0,63
С	0,60	0,52
В	0,50	0,43

* Н – нормальная, С – средняя, В – высокая



Для оценки соответствия нормам продольных растягивающих $\sigma_{пр}$ напряжений ($\sigma_{пр} \geq 0$) и эквивалентных $\sigma_{экв}$ напряжений при $\sigma_{пр} < 0$ значение допускаемых напряжений принимается равным 90 % от нормативного предела текучести материала труб.

Из формул (3) и (4) видно, что значения допускаемых механических напряжений зависят не только от механических характеристик материала труб, но и от категории участка МГ, установленной при его проектировании и определяющей влияние последствий разрушения газопровода на здоровье людей, а также на стоимость выполнения ремонтно-восстановительных работ. Следует отметить, что в СП 36.13330 [1] и в СТО Газпром 2-2.1-249 [2] количество и виды категорий участков МГ отличаются.

В соответствии с СП 36.13330 [1] участки МГ подразделяются на пять категорий: В, I, II, III, IV. При этом на участках I и II, а также III и IV категорий используются трубы с одинаковой толщиной стенки, а отличие состоит в объеме освидетельствуемых сварных соединений радиографическим методом неразрушающего контроля. В частности, на участках категорий В и I должны быть проконтролированы все сварные стыки, на участках II категории – не менее 25 %, на участках III категории – не менее 10 % и на участках IV категории – не менее 5 % сварных стыков.

По СТО Газпром 2-2.1-249 [2] участки МГ подразделяются на три категории: Н (нормальная), С (средняя), В (высокая). Соответствие между категориями участков МГ по СП 36.13330 [1] и СТО Газпром 2-2.1-249 [2] приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Соответствие между категориями участков магистрального газопровода по нормативным документам

СТО Газпром 2-2.1-249-2008	Н	С	В
СП 36.13330.2012	III, IV	I, II	В

На основании вышеизложенного была выполнена оценка и сопоставление значений допускаемых напряжений для участков МГ Бованенково – Ухта по обоим нормативным документам, исходя из того, что при сооружении линейной части МГ Бованенково – Ухта использовались, как правило, трубы класса прочности К65 со следующими нормативными значениями механических характеристик:

$$\sigma_T = 555 \text{ МПа}, \sigma_B = 640 \text{ МПа}.$$

При расчете по СП 36.13330 [1] было принято максимальное значение коэффициента $k_n = 1,265$. Результаты выполненных расчетов сведены в таблицу 4, а сопоставление значений допускаемых напряжений приведено на рисунке 1.

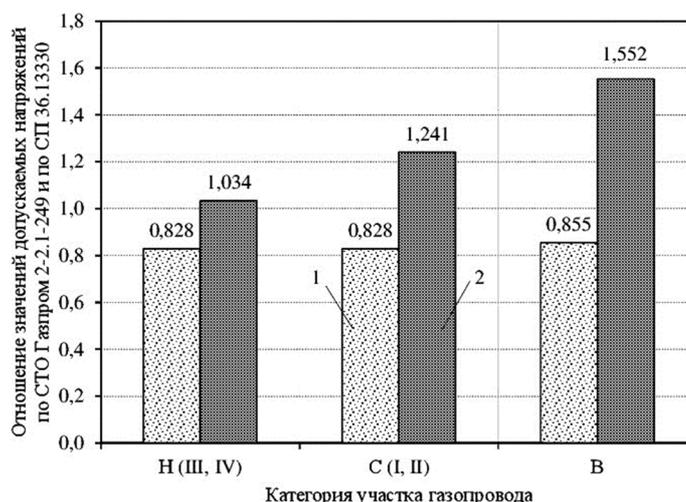


Рисунок 1 – Сопоставление значений допускаемых кольцевых (1), продольных (2) и эквивалентных (2) напряжений

Полученные данные показывают следующее.

У магистральных газопроводов с рабочим давлением до 9,8 МПа:

- допускаемые значения всех компонентов напряженного состояния (кольцевые, продольные, эквивалентные) зависят от категории участка;
- для каждой категории участка газопровода значения допускаемых напряжений одинаковы для всех компонентов напряженного состояния (кольцевые, продольные, эквивалентные);



– значения допускаемых напряжений составляют от 58,0 до 87,0 % нормативного предела текучести металла труб, а именно: на участках категории В – 58,0 %, на участках категорий I и II – 72,5 %, на участках категорий III и IV – 87,0 %. Из этого следует, что на участках газопроводов категорий В, I и II от совокупности всех нагрузок и воздействий допускается только упругое деформирование металла труб, а на участках газопроводов категорий III и IV возможно появление упругопластических деформаций.

Таблица 4 – Значения допускаемых напряжений в стенках труб магистрального газопровода

Категория участка	СП 36.13330 [1]	III, IV	I, II	B
	СТО Газпром 2-2.1-249 [2]	H	C	B
[σ] _{кц}	СП 36.13330 [1]	0,87 σ _T	0,725 σ _T	0,58 σ _T
	СТО Газпром 2-2.1-249 [2]	0,72 σ _T	0,6 σ _T	0,496 σ _T
[σ] _{пр}	СП 36.13330 [1]	0,87 σ _T	0,725 σ _T	0,58 σ _T
	СТО Газпром 2-2.1-249 [2]	0,9 σ _T	0,9 σ _T	0,9 σ _T
[σ] _{экв}	СП 36.13330 [1]	0,87 σ _T	0,725 σ _T	0,58 σ _T
	СТО Газпром 2-2.1-249 [2]	0,9 σ _T	0,9 σ _T	0,9 σ _T

У магистральных газопроводов с рабочим давлением свыше 9,8 МПа:

– от категории участка зависят только значения допускаемых кольцевых напряжений. Значения допускаемых кольцевых напряжений составляют от 49,6 до 72,0 % нормативного предела текучести металла труб, а именно: на участках категории В – 49,6 %, на участках категории С – 60,0 %, на участках категории Н – 72,0 %;

– значения продольных (при σ_{пр} ≥ 0) и эквивалентных (при σ_{пр} < 0) напряжений на участках газопровода любой категории могут достигать 90,0 % от нормативного предела текучести металла труб;

– внутреннее давление, являющееся основной нагрузкой, должно вызывать только упругое деформирование металла труб, однако совокупность всех нагрузок, действующих на участок газопровода, может вызывать появление упругопластических деформаций, как правило, за счет температурных и изгибных воздействий.

Таким образом, в стенках труб газопроводов с рабочим давлением свыше 9,8 МПа по сравнению со стенками труб газопроводов с рабочим давлением до 9,8 МПа допускаются меньшие значения кольцевых напряжений на 14,5 % на участках категории В и на 17,2 % на участках категорий С и Н. При одном и том же значении рабочего давления снижение кольцевых напряжений возможно только за счет увеличения толщины стенки труб, т.е. в СТО Газпром 2-2.1-249 [2] предусмотрен более значительный запас прочности газопроводов, чем в СП 36.13330 [1]. Наряду с этим в газопроводах с рабочим давлением свыше 9,8 МПа допускаются более высокие значения продольных (при σ_{пр} ≥ 0) и эквивалентных (при σ_{пр} < 0) напряжений, а именно на 55,2 % на участках категорий В, на 24,1 % на участках категорий С, на 3,4 % на участках категорий Н. При меньших значениях кольцевых напряжений рост продольных и эквивалентных напряжений возможен за счет увеличения температурного перепада, обусловленного температурой транспортируемого газа и температурой выполнения строительно-монтажных работ, а также за счет более существенного изгиба оси газопровода.

Литература:

1. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы (Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85*). – М. : Госстрой, ФАУ ФЦС, 2012. – 93 с.
2. СТО Газпром 2-2.1-249-2008 Магистральные газопроводы. – М. : ООО ИРЦ Газпром, 2008. – 150 с.

References:

1. SP 36.13330.2012. Main pipelines (Updated version of SNiP 2.05.06-85*). – M. : Gosstroy, FAA FTsS, 2012. – 93 p.
2. STO Gazprom 2-2.1-249-2008 Main gas pipelines. – M. : IRC Gazprom LLC, 2008. – 150 p.