

Местная устойчивость стенки вакуумных участков трубопроводов

А. В. Матвеев
ООО «НТП Трубопровод»

Предложена методика, в которой оценка прочности и оценка устойчивости производятся отдельно, в отличие от методики, приведенной в ГОСТ 14249–89 на сосуды и аппараты. Методика адаптирована применительно к трубопроводам с избыточным наружным давлением.

На конкретном примере показано, что такой подход позволяет существенно снизить запасы при оценке местной устойчивости стенки трубопровода.

Ключевые слова: трубопровод, оценка прочности, оценка местной устойчивости трубы, теорема Папковича.

Опыт применения стандарта ассоциации «Ростехэкспертиза» СА 03-003-07 [1] к расчету вакуумных трубопроводов в программе «СТАРТ» [2] показал, что методика ГОСТ 14249–89 [3] расчета на прочность сосудов и аппаратов, на которую ссылается СА 03-003-07, оказывается чрезмерно консервативной при оценке устойчивости трубопроводов.

Согласно [3], каждый из внутренних силовых факторов P , F , M , Q (будем условно называть X) вычисляется по формуле

$$[X] = \frac{[X]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[X]_n}{[X]_E}\right)^2}}, \quad (1)$$

где $[X]_E$ — допускаемый силовой фактор из условия устойчивости в предположении линейно упругой работы металла; $[X]_n$ — допускаемый силовой фактор из условия прочности.

Допускаемые силовые факторы $[X]_E$ справедливы только при условии, что максимальные эквивалентные напряжения σ_e не превышают предел пропорциональности материала, так как получены в предположении справедливости закона Гука. Вычисление допускаемых силовых факторов за пределом упругости представляет собой довольно сложную задачу, которая в общем случае может быть решена лишь с использованием ЭВМ. По этой причине авторами [3] был использован приближенный подход (формула 1) и введен дополнительный коэффициент запаса к силовым факторам $[X]_E$, который должен принимать максимальное значение, если в момент потери устойчивости напряжения равны пределу пропорциональности металла [4].

Поскольку значение предела пропорциональности в стандартах не нормируется, авторами [3] в качестве предельного значения был использован предел текучести с коэффициентом запаса 1,5.

Формула (1) обеспечивает запас устойчивости, равный 1,414 при $[X]_E = [X]_n$. Таким образом:

- если в момент потери устойчивости напряжения равны условному пределу пропорциональности $[X]_E = [X]_n$, то коэффициент запаса оказывается максимальным $[X] = [X]_E / 1,414$;
- если в момент потери устойчивости напряжения существенно меньше условного предела пропорциональности $[X]_E \ll [X]_n$, допускаемый силовой фактор будет определяться условиями устойчивости в предположении упругой работы металла $[X] \approx [X]_E$;
- если напряжения существенно больше предела пропорциональности $[X]_E \gg [X]_n$, допускаемый силовой фактор будет определяться исключительно условиями прочности $[X] \approx [X]_n$.

Условие устойчивости согласно [3] выглядит следующим образом:

$$\frac{P}{[P]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 \leq 1. \quad (2)$$

Уравнение (2) соответствует теореме П. Ф. Папковича, которая позволяет оценить устойчивость тела при многопараметрической нагрузке. Кратко теорема формулируется так: пограничная поверхность области устойчивости всегда выпукла [5, 6]. Практическая значимость теоремы состоит в том, что она гарантирует уменьшение области устойчивости при замене пограничной поверхности плоскостью. Таким образом, уравнение (2) позволяет с гарантированным запасом оценить устойчивость трубы при одновременном действии нескольких силовых факторов X .

Следует отметить, что теорема Папковича применима только к задаче устойчивости и ее не следует применять для оценки прочности, поскольку результат вычисления оказывается чрезмерно консервативным. Продемонстрируем это на примере.

Был произведен расчет трубы 159×8, допускаемое напряжение принято $[\sigma] = 14\,700$ тс/м², по методике [3] получены следующие значения допускаемых силовых факторов:

$$[P]_{\text{п}} = 1560 \text{ тс/м}^2; [P]_{\text{Е}} = 3200 \text{ тс/м}^2; \\ [F] = 1400 \text{ тс/м}^2;$$

$$[F]_{\text{п}} = 55,8 \text{ тс/м}; [F]_{\text{Е}} = 3890 \text{ тс/м}; \\ [F] = 55,79 \text{ тс/м};$$

$$[M]_{\text{п}} = 1,99 \text{ тс·м}; [M]_{\text{Е}} = 159 \text{ тс·м}; \\ [M] = 1,99 \text{ тс·м};$$

$$[Q]_{\text{п}} = 13,2 \text{ тс}; [Q]_{\text{Е}} = 229 \text{ тс}; [Q] = 13,2 \text{ тс}.$$

В качестве примера примем следующие значения действующих силовых факторов: $P = 730$ тс/м², $F = 25$ тс, $M = 1$ тс·м, $Q = 6$ тс и выполним расчет по формуле (2):

$$\frac{730}{1400} + \frac{25}{55,79} + \frac{1}{1,99} + \left(\frac{6}{13,2}\right)^2 = 1,68 > 1.$$

Оказывается, что условия устойчивости не выполнены (превышение в 1,68 раза).

Подставив в формулу (2) допускаемые значения по условиям устойчивости $[X]_{\text{Е}}$

$$\frac{730}{3200} + \frac{25}{3890} + \frac{1}{159} + \left(\frac{6}{229}\right)^2 = 0,24 < 1,$$

получим коэффициент запаса 0,24, т. е. на самом деле условия устойчивости выполнены с большим запасом.

Если подставить в формулу (2) допускаемые значения по условиям прочности

$$\frac{730}{1560} + \frac{25}{55,8} + \frac{1}{1,99} + \left(\frac{6}{13,2}\right)^2 = 1,62 > 1, \quad (3)$$

то становится понятно, что определяющим фактором в нашем случае являются условия прочности, а не условия устойчивости.

Сравним формулу (2) с условиями прочности по теории наибольших касательных напряжений (третья теория прочности).

Кольцевое напряжение:

$$\sigma = \frac{P(D_i + s)}{2s} = \frac{-730(0,143 + 0,008)}{2 \cdot 0,008} = -6889 \text{ тс/м}^2.$$

Продольное напряжение от продольной силы:

$$\sigma_N = \frac{F}{A_p} = \frac{25}{3,594 \cdot 10^{-3}} = 6956 \text{ тс/м}^2.$$

Продольное напряжение от момента:

$$\sigma_M = \frac{M}{W} = \frac{1}{1,364 \cdot 10^{-4}} = 7329 \text{ тс/м}^2.$$

Суммарное продольное напряжение:

$$\sigma_z = \pm \sigma_N \pm \sigma_M = -14285 \text{ тс/м}^2.$$

Касательные напряжения от поперечной силы:

$$\tau = \frac{2Q}{A_p} = \frac{2 \cdot 6}{3,594 \cdot 10^{-3}} = 3339 \text{ тс/м}^2.$$

Получаем эквивалентное напряжение

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma^2 - \sigma \sigma_z + \sigma_z^2 + 4\tau^2} = 14061 \text{ тс/м}^2. \quad (4)$$

Отношение вычисленного эквивалентного напряжения к допускаемому

$$\frac{\sigma_e}{[\sigma]} = \frac{14061}{14700} = 0,96. \quad (5)$$

Следовательно, условия прочности для данной трубы выполнены с коэффициентом запаса 0,96. Однако по формуле (2) условия прочности не выполнены с коэффициентом запаса 1,62 (3). В чем же причина?

Представим формулу (2) в следующем виде:

$$\frac{\sigma}{[\sigma]} + \frac{\sigma_N}{[\sigma]} + \frac{\sigma_M}{[\sigma]} + \left(\frac{2\tau}{[\sigma]}\right)^2 \leq 1.$$

Затем получим формулу для эквивалентных напряжений:

$$\sigma_e = \sigma + \sigma_N + \sigma_M + \frac{4\tau^2}{[\sigma]} \leq [\sigma],$$

$$\sigma_e = 6889 + 6956 + 7329 + \frac{4 \cdot 3339^2}{14700} = 24208 \text{ тс/м}^2.$$

Итак, причина заключается в том, что в формуле (2) фактически линейно суммируются напряжения, что соответствует значению 24208 тс/м², а при расчете по формуле (4) эквивалентные напряжения должны быть равны 14061 тс/м². Таким образом, формулу (2) нельзя применять для оценки прочности.

Поэтому было принято решение о доработке методики [3] и внесении следующих изменений в нормы [1].

1. В уравнение (2) введен допускаемый момент из условий устойчивости при кручении $[M]$ согласно [5]. В сосудах крутящие моменты практически отсутствуют, поэтому не учтены авторами ГОСТ [6]. Но в трубопроводах крутящие моменты бывают достаточно большими, что может существенно отразиться на устойчивости.

2. В формулу (2) подставлены только значения допускаемых силовых факторов из условий устойчивости $[X]_{\text{Е}}$. Коэффициент устойчивости трубы $K_{\text{Е}}$ равен

$$K_E = \frac{P}{[P]_E} + \frac{F}{[F]_E} + \frac{M}{[M]_E} + \frac{M_t}{[M_t]_E} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2.$$

3. В формуле (5) в качестве допускаемого напряжения вместо $[\sigma]$ принято $1,5[\sigma]$, что соответствует критериям прочности для труб согласно [1]. Коэффициент прочности K_{Π} вычисляется по формуле

$$K_{\Pi} = \frac{\sigma_e}{1,5[\sigma]}.$$

4. Коэффициент запаса устойчивости вычисляется с применением условия, аналогичного формуле (1):

$$K = K_E \sqrt{1 + \left(\frac{K_{\Pi}}{K_E} \right)^2} \leq 1.$$

Продемонстрируем преимущества новой методики для рассмотренного выше примера. Коэффициент запаса устойчивости в предположении упругой работы металла равен

$$K_E = \frac{730}{3200} + \frac{25}{3890} + \frac{1}{159} + \left(\frac{6}{229} \right)^2 = 0,24.$$

Коэффициент запаса прочности

$$K_{\Pi} = \frac{\sigma_e}{1,5[\sigma]} = \frac{14061}{1,5 \cdot 14700} = 0,64.$$

Окончательно получаем, что коэффициент устойчивости с учетом запаса на работу за пределами упругости равен

$$K = 0,24 \sqrt{1 + \left(\frac{0,64}{0,24} \right)^2} = 0,68 \leq 1.$$

Как видим, запас устойчивости трубы на самом деле очень большой ($K_E = 0,24 < 1$), следовательно, в данном случае определяющим является критерий прочности согласно стандарту [1].

Выводы

Изменение № 4 к СА 03-003-07 содержит модифицированную методику ГОСТ 14249–89, адаптированную для расчета трубопроводов:

- добавлен учет потери устойчивости труб под действием крутящего момента;
- устранена неточность методики, приводящая к неоправданно высоким запасам (в 1,5 раза);
- методика приведена в соответствие с критериями прочности СА 03-003-07;
- реализация новой методики в программе СТАРТ и опыт ее использования позволяют сделать вывод о ее применимости для практических расчетов трубопроводов.

Литература

1. СА 03-003–07. Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов.
2. Программная система СТАРТ. Расчет прочности и жесткости трубопроводов. Руководство пользователя. — М.: ООО «НТП Трубопровод».
3. ГОСТ 14249–89. «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность».
4. Рачков В. И. К истории создания норм и методов расчетов на прочность сосудов и аппаратов химической, нефтехимической, нефтегазоперерабатывающей промышленности. Сборник лекций. Расчеты на прочность сосудов, аппаратов и трубопроводов, применяемых на опасных производственных объектах. — Волгоград: Страница-2, 2006.
5. Биргер И. А., Пановко Я. Г. Прочность. Устойчивость. Колебания. Т. 3. — М.: Машиностроение, 1968.
6. Смирнов А. Ф., Александров А. В., Лазеников Б. Я. и др. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений. — М.: Стройиздат, 1984.
7. Вольмир А. С. Устойчивость упругих систем. — М.: Физматиздат, 1963.

A. V. Matveev

The Local Pipe Wall Stability Problem of Vacuum Piping

The method, in which the evaluation of the strength and stability problems carried out separately in contrast to the method given in GOST 14249–89 is presented in the article. The method is adapted for pipelines with an external pressure.

A specific example is shown that this approach can significantly reduce the local stability reserves.

Key words: pipeline, pipe stress, local stability, Papkovich theorem.