

О циклических нагрузках, влияющих на прочность труб для добычных скважин газа

С. В. Марфицын^{1*}, А. В. Марфицын², В. П. Марфицын¹

¹ПК «Уралец», г. Курган, Россия

²ООО «Энерготехстрой», г. Курган, Россия

*e-mail: delta-kurgan@yandex.ru

Аннотация. Применение полиномов Чебышева 1-го рода в сопротивлении материалов основано на использовании вероятностной логики для объективных состояний металла. Это тот случай, когда «чистая» наука помогает практическим вопросам объективной реальности. Благодаря этому видно, что металл в процессе нагрузки претерпевает устойчивое и неустойчивое состояния. Применяя полиномы Чебышева 1-го рода, можно заметить, что наиболее устойчивое состояние металла показывает кривая T_9 , при которой соотношение $\frac{\sigma}{\sigma_T} = 0,5$, то есть это соотношение наиболее благоприятно для сосудов под давлением, в отличие от рекомендованного американским стандартом ASME, в котором $\frac{\sigma}{\sigma_T} = 0,666$, что уменьшает надежность. Более перспективным является оценка состояния металла с учетом частотных характеристик, подтверждающая частотные соотношения $\frac{\sigma}{\sigma_T} \approx 0,5$ и позволяющая учесть неупругие явления в металле, учитываемые коэффициентом потерь, а также оценить возможность резонанса.

Применение регулирующей заслонки с использованием патента RU 2416751C1 позволяет добиться оптимальной частоты колебаний газа в трубе, уменьшается вероятность резонанса.

Ключевые слова: кристаллическая решетка; частота колебаний; оценка прочности; резонанс

Cyclic loads affecting the durability of pipes for production wells gas

Sergey V. Marfitsyn^{1*}, Andrey V. Marfitsyn², Vladimir P. Marfitsyn¹

¹Uralec CC, Kurgan, Russia

²Energotechstroy LLC, Kurgan, Russia

*e-mail: delta-kurgan@yandex.ru

Abstract. The use of Chebyshev's polynomials of the first type to the strength of materials is based on probabilistic logic for the objective states of a metal. This is the case when "pure" science helps practical issues of objective reality. Due to this, it was noted that the metal undergoes a stable and unstable state during loading. The use of Chebyshev's polynomials of the first type has showed that the most stable state of the metal is shown by the T_9 curve, at which the ratio $\frac{\sigma}{\sigma_T} = 0,5$. This ratio is most favorable for pressure vessels, in contrast to the recommended American standard ASME, in which $\frac{\sigma}{\sigma_T} = 0,666$ (this ratio reduces the reliability). Assessment of the state of the metal taking into account the frequency characteristics

is more promising. This assessment confirms the frequency ratio $\frac{\omega}{\omega_T} \approx 0,5$ and allows taking into account inelastic phenomena in the metal, taking into account the loss coefficient, as well as to assess the possibility of resonance.

The application of the control valve using the patent RU 2416751C1 allows achieving the optimal frequency of gas oscillations in the pipe and reducing the probability of resonance.

Key words: crystal lattice; oscillation frequency; assessment of the strength; resonance

Введение

Конструкция добычной скважины газа представляет собой стальную трубу, у которой длина во много раз больше диаметра и состоящую из участков, соединенных сварными швами. Труба работает при температуре газа, достигающей значения 523 °К, давлении до 100 МПа и циклическом нагружении. Главной опасностью при этом является «усталость» металла. Таким образом, материалы необходимо оценить на циклическую прочность и возможность резонанса.

В работе [1] установлена зависимость напряжения от условного вероятностного ряда от нуля до единицы. Эта зависимость оказалась весьма продуктивной в объяснении некоторых феноменов поведения материалов при нагрузках. Например, T_9 , один из полиномов Чебышева 1-го рода имеет минимум при значении $\frac{\omega}{\omega_T} = 0,5$. То есть это наиболее благоприятное значение, соответствующее максимальной способности восстановительных свойств материалов. Поэтому мы считаем, что значение допускаемых напряжений в американском стандарте ASME, равное $\frac{2}{3}\sigma_T$, не соответствует условию безопасности устьевого оборудования при циклическом нагружении участка скважины для добычи нефти и газа. Более безопасно принимать допускаемое напряжение равным $0,5\sigma_T$, как принято в руководящем документе¹. Это также подтверждают экспериментальные исследования.

Термином «усталость» обозначают повреждения, возникающие под действием циклических напряжений. Обычно эти напряжения являются знакопеременными, то есть растяжение сменяется сжатием. «Усталость» также может возникнуть в результате циклических напряжений одного знака. Усталостные трещины обычно зарождаются на поверхности детали, хотя в ряде случаев они могут возникать и во внутренних областях материала, особенно при больших напряжениях.

Частотный подход к поведению материала в добычных скважинах газа

Более перспективным является частотный подход к поведению материала. Он позволяет оценить прочность материала при знакопеременных нагрузках, то есть оценить его «усталость».

«Для большинства твердых тел ω_{max} по порядку величины составляет 10^{13} Гц, в то время как ω_{min} зависит от числа атомов в решетке (от размеров тел) и для кристалла объемом $\approx 1\text{ см}^3$ составляет 10^5 Гц. У обычных твердых

¹ РД 50-694-90. Методические указания. Надежность в технике. Вероятностный метод расчета на усталость сварных конструкций / Государственный комитет по стандартам СССР по управлению качеством продукции и стандартов. – Введ. 1991-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 88 с.

тел (металлов, полупроводников или диэлектриков) амплитуда нулевых колебаний значительно меньше межатомных расстояний. Вероятность дислокации атомов при этом пренебрежительно мала, так что каждый атом при этом можно рассматривать локализованным в определенном объеме пространства, малом по сравнению с объемом элементарной ячейки» [2]. Между диэлектрическими и неупругими потерями есть общие закономерности. Это коэффициент рассеивания или коэффициент потерь. Их можно выразить через частотные характеристики. На рисунке 1 показана зависимость коэффициента потерь от частоты поля. Происходящий процесс можно рассматривать как упорядочение под действием приложенного напряжения, так как внедренные атомы занимают наиболее благоприятные межузлия. При возникновении такого упорядочения О.Ц.К. решетки железа уменьшается полная энергия деформации, так как внедренные атомы более свободно располагаются в увеличенных межузлах. Частота от 0 до 10^5 соответствует нагружению тела. Далее идет участок, свободный от потери упругости. Этот участок, особенно его начальная и средняя часть, особенно благоприятен для упругих деформаций, где находится поле частот от 10^5 до 10^6 Гц. В этом промежутке находится частота, соответствующая допускаемым напряжениям для расчета сосудов под давлением, то есть $\omega = 0,56\tau$. Далее при частотах 10^{12} – 10^{13} коэффициент потерь снова возрастает, что соответствует состоянию предела текучести материала [3].

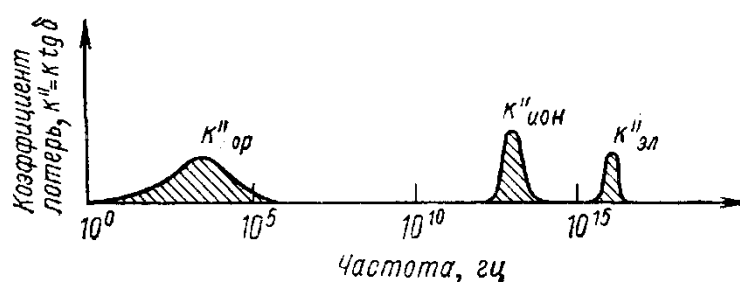


Рис. 1. Зависимость коэффициента потерь от частоты поля

Частотный подход позволяет определить резонансную частоту колебаний кристаллической решетки.

$$K = 1 + \frac{NE_0/\epsilon_0}{1+\omega^2\tau^2} - i \frac{NE_0\omega\tau/\epsilon_0}{1+\omega^2\tau^2}, \quad (1)$$

где N — число циклов; E_0 — поляризуемость в статическом поле; ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; ω — угловая частота; τ — постоянная времени диэлектрической релаксации.

Дифференцируя мнимую часть уравнения (1), получаем, что K'' принимает максимальное значение при $\omega\tau = 1$. Это является условием резонанса. Следовательно, при этой частоте потери энергии будут наибольшими. График зависимости составляющих K' и K'' от частоты приведен на рисунке 1 [4].

На рисунке 2 показана зависимость между максимально допустимым напряжением и числом циклов, необходимых для возникновения разрушения.

Мы видим также высокие напряжения при малых частотах (см. рис. 2). Это показывает, что при ударных нагрузках имеется возможность возникновения

резонанса при малых частотах. Наиболее опасным является первоначальный момент после включения заслонки, когда возникает ударная нагрузка и время воздействия на трубу составляет 10^3 – 10^4 Гц [5], что приводит к появлению резонанса в металле.

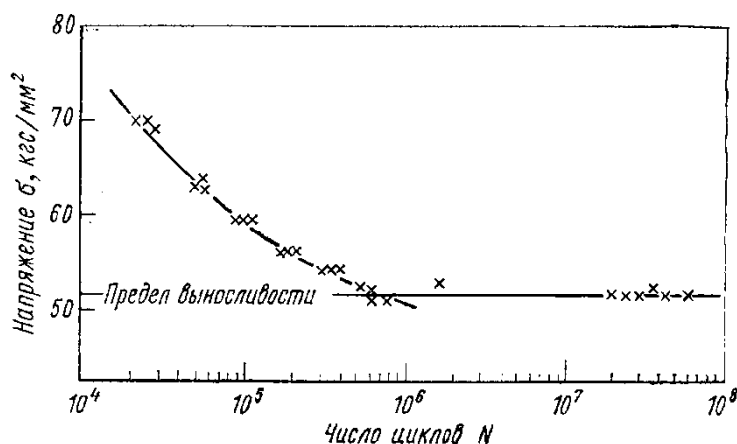


Рис. 2. Зависимость между напряжением и числом циклов

Помимо рассмотренных ранее свободных колебаний кристаллической решетки, а также колебаний под действием нагрузки, в металле при высокой температуре возникают дополнительные вынужденные колебания.

Если температура газа испытывает весьма быстрые пульсации, период которых по сравнению со временем пребывания горячего газа внутри оболочки очень мал, то температура стенок оболочки также будет испытывать пульсации с тем же периодом, что и период пульсации температуры газа. В этом случае возможны чисто температурные параметрические возбуждения колебаний стенок оболочки, и как результат этих колебаний — возникновение значительных деформаций. «Предположим, что температура газа испытывает очень быстрые пульсации, подчиняясь закону:

$$T(t) = T_0 + T_1 \cos \omega t.$$

Таким образом, если частота ω будет лежать в определенных пределах и если амплитуда термокинетических пульсаций будет удовлетворять определенным неравенствам в металле, возникновение параметрического резонанса становится вполне возможным [6]».

Выводы

- Подтверждаются частотные вероятностные закономерности Чебышева для прочностных характеристик стали.
- Низкочастотный резонанс возможен в материале при ударных нагрузках при условии равенства вынужденных колебаний свободным колебаниям кристаллической решетки.
- Применение регулирующей заслонки с использованием патента RU 2416751C1 [7] позволяет добиться оптимальной частоты колебаний газа в трубе, уменьшается вероятность резонанса колебаний трубы и газа.

Библиографический список

1. Марфицын С. В., Марфицын В. П. Применение полиномов Чебышева 1-го рода для описания устойчивых состояний металла при постоянных и переменных нагрузках // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2016. – № 3 (42). – С. 96–98.
2. Брандт Н. Б., Чудинов С. М. Электроны и фононы в металлах: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 334 с.
3. Полухин П. И., Горелик С. С., Воронцов В. К. Физические основы пластической деформации: учеб. пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1982. – 584 с.
4. Ван Флек Л. Х. Теоретическое и прикладное материаловедение / Пер. с англ. О. А. Алексеева. – М.: Атомиздат, 1975. – 472 с.
5. Марфицын С. В., Марфицын В. П. О вероятностном подходе к ударным нагрузкам // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2017. – № 4 (47). – С. 87–89.
6. Расчеты на прочность, устойчивость и колебания в условиях высоких температур / Н. И. Безухов [и др.]; под ред. И. И. Гольденבלата. – М.: Машиностроение, 1965. – 567 с.
7. Марфицын В. П., Марфицын А. В., Марфицын С. В. Изобретение к патенту RU 2416751C1 от 14.06.2009. Затвор повышенной герметичности и вибрационной стойкости с усиленным стопорением и разгрузочным круговым кольцом для сосудов и аппаратов, работающих под внутренним и наружным давлением.

References

1. Marfitsyn, S. V., & Marfitsyn, V. P. (2016). The use of Chebyshev's polynomials of the first type for a description of the steady-state conditions of metal under constant and variable loading. Bulletin of Kurgan State University. Technical Sciences, (3(42)), pp. 96-98. (In Russian).
2. Brandt, N. B., & Chudinov, S. M. (1990). Elektrony i fonony v metallakh. 2nd edition, revised and expanded. Moscow, MGU Publ., 334 p. (In Russian).
3. Polukhin, P. I., Gorelik, S. S., & Vorontsov, V. K. (1982). Fizicheskie osnovy plasticheskoy deformatsii. Moscow, Metallurgiya Publ., 584 p. (In Russian).
4. Van Vlack, L. H. (1970). Materials science for engineers. California, Addison Wesley Publishing Company, 545 p. (In English).
5. Marfitsyn, S. V., & Marfitsyn, V. P. (2017). About probabilistic approach to impact loads. Bulletin of Kurgan State University. Natural Sciences, (4(47)), pp. 87-89. (In Russian).
6. Bezukhov, N. I., Bazhanov, V. L., Gol'denblat, I. I., Nikolaenko, N. A., & Sinyukov, A. M. (1965). Raschety na prochnost', ustoychivost' i kolebaniya v usloviyakh vysokikh temperatur. Moscow, Mashinostroenie, 567 p. (In Russian).
7. Marfitsyn, V. P., Marfitsyn, A. V., & Marfitsyn, S. V. Izobretenie k patentu RU 2416751S1 ot 14.06.2009. Zatvor povyshennoy germetichnosti i vibratsionnoy stoykosti s usilenym stoporenim i razgruzochnym krugovym kol'tsom dlya sosudov i apparatov, rabotayushchim pod vnutrennim i naruzhnym davleniem. (In Russian).

Сведения об авторах

Марфицын Сергей Владимирович,
председатель ПК «Уралец», г. Курган,
e-mail: delta-kurgan@yandex.ru

Марфицын Андрей Владимирович,
директор ООО «Энерготехстрой»,
г. Курган

Марфицын Владимир Петрович, за-
меститель директора по научным исследо-
ваниям и конструированию, ПК «Уралец»,
г. Курган

Information about the authors

Sergey V. Marfitsyn, Chairman of Uralec CC,
Kurgan, e-mail: delta-kurgan@yandex.ru

Andrey V. Marfitsyn, Director,
Energotechstroy LLC, Kurgan

Vladimir P. Marfitsyn, Deputy Director for
Scientific Research and Design, Uralec CC,
Kurgan