

Nachalov, V.A.

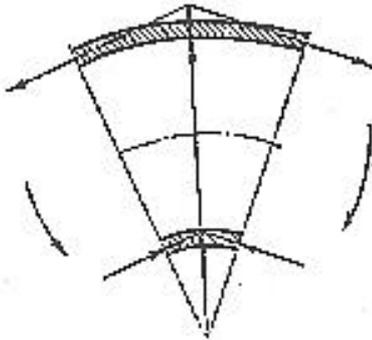
**Spannungen in Rohrbogen aufgrund von Gewichts- und Kompensationslasten.**

Deutsche Auszugsübersetzung aus:

Nachalov, V/iktor/ A/leksandrovič/: Nadežnost' gibov trub elektroenergetičeskich ustanovok /Sicherheit von Rohrbogen in Wärmeenergieanlagen; russ./ . Moskva: Verlag "Energoatomizdat", 1983, S. 63 - 66.

Russ.: Напряжения в гibaх труб от весовых и компенсационных нагрузок.  
Naprjaženija v gibach trub ot vesovych i kompensacionnyh nagruzok.

Gewichtsbelastungen, Wärmeausdehnungen von Rohrleitungen und Versetzungen von Anlagenteilen, mit denen die Rohrleitung verbunden ist, erzeugen Biegungen und Krümmungen innerhalb der Leitung. Unter Einwirkung des Biegemoments verformt sich ein Rohrquerschnitt mit gekrümmter Achse wie beim Biegen (siehe Abb. 2.2), d.h. verbiegt man ein Rohr, verbiegt sich auch die Rohrwand. Bei Innendruck nimmt die Verformung des Rohrquerschnitts beim Biegen ab. Die Frage der Verformungen und Spannungen in gebogenen und mit einem Biegemoment belasteten Rohren wurde in den Arbeiten [30, 49, 50] u.a. ausführlich untersucht.



**Abb. 2.2. Schematische Darstellung der beim Biegen auf ein Rohrelement einwirkenden Kräfte**

Die Spannungen beim Biegen eines Rohrs mit konstanter Wanddicke und ursprünglich rundem Querschnitt können nach den folgenden Formeln bestimmt werden [50]:

$$\sigma_{\theta} = \sigma^0_{\theta x} \beta_1 + \sigma^0_{\theta y} \beta_2; \quad (3.46)$$

$$\sigma_{\varphi} = \sigma^0_{\theta x} \gamma_1 + \sigma^0_{\theta y} \gamma_2. \quad (3.47)$$

Dabei ist

$$\beta_1 = k_p \left( \sin \varphi - \frac{6 \sin^3 \varphi}{5 + 6\lambda^2 + 12\omega_1} \mp \frac{9\mu\lambda \cos 2\varphi}{5 + 6\lambda^2 + 12\omega_1} \right); \quad (3.48)$$

$$\beta_2 = k_p \left( \cos \varphi - \frac{-9 \cos \varphi + 6 \cos^3 \varphi}{5 + 6\lambda^2 + 12\omega_1} \pm \frac{9\mu\lambda \sin 2\varphi}{5 + 6\lambda^2 + 12\omega_1} \right); \quad (3.49)$$

$$\gamma_1 = \mu k_p \left( \sin \varphi - \frac{6 \sin^3 \varphi}{5 + 6\lambda^2 + 12\omega_1} \mp \frac{9\lambda \cos 2\varphi}{\mu (5 + 6\lambda^2 + 12\omega_1)} \right); \quad (3.50)$$

$$\gamma_2 = \mu k_p \left( \cos \varphi - \frac{-9 \cos \varphi + 6 \cos^3 \varphi}{5 + 6\lambda^2 + 12\omega_1} \pm \frac{9\lambda \sin 2\varphi}{\mu (5 + 6\lambda^2 + 12\omega_1)} \right); \quad (3.51)$$

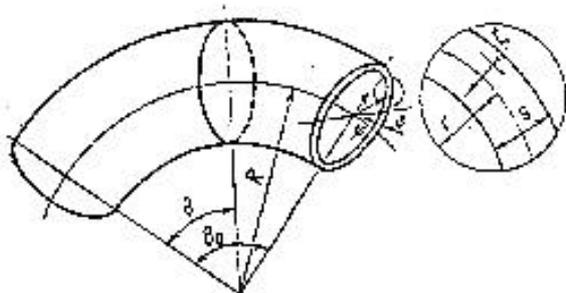
$$\omega_1 = \frac{p2(1-\mu^2)R^2}{Esr}; \quad (3.52)$$

$$k_p = \frac{10 + 12\lambda^2 + 24\omega_1}{1 + 12\lambda^2 + 24\omega_1}; \tag{3.53}$$

$$\sigma^0_{\theta x} = M_x r / J; \quad \sigma^0_{\theta y} = M_y r / J, \tag{3.54}$$

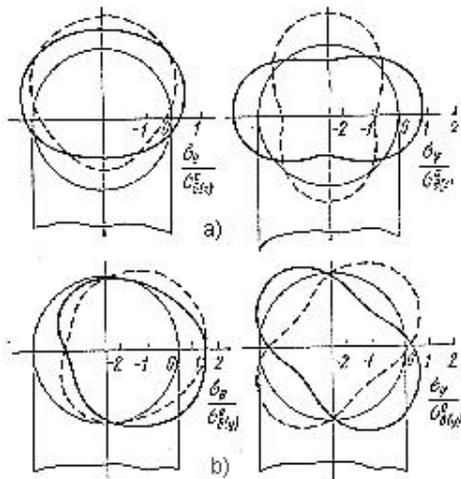
mit  $M_x$  das in der Biegungsebene wirkende Moment;  $M_y$  das in der zum Biegungsradius senkrechten Ebene wirkende Moment (Biegung "aus der Ebene");  $J$  das Querschnittsträgheitsmoment und  $\mu$  Poissonsche Zahl.

Das hochgestellte Zeichen in den Ausdrücken (3.48) - (3.51) entspricht der Rohrinnenfläche, das tiefgestellte der Außenoberfläche. Der Winkel  $\varphi$  wird entsprechend Abb. 2.1 berechnet.



**Abb. 2.1. Wichtigste Krümmungsmaße**

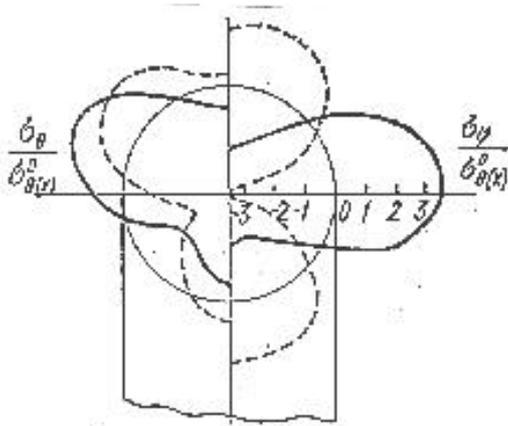
Bei  $\lambda \geq 0,35$  gewährleisten die Formeln eine für praktische Zwecke ausreichende rechnerische Genauigkeit (Fehlergröße 5 - 10%). Benutzt man sie für Rohrbogen von Wärmekraftanlagen, wird der Koeffizient  $\omega_1$  normalerweise nicht berücksichtigt.



**Abb. 3.7. Spannungen in Rohrbogen  $\varnothing 273 \times 20$  mm,  $R = 1370$  mm bei Biegung in der Krümmungsebene (a) und bei Biegung "aus der Ebene" (b)**

Durchgehende Linie: Außenoberfläche; gestrichelte Linie: Innenfläche.

Die Abb. 3.7, 3.8. zeigen die Verteilung der Längs- und Umfangsspannungen im Bogenquerschnitt eines Rohres  $\varnothing 273 \times 20$  mm,  $R = 1370$  mm ( $\lambda = 1,71$ ) und eines Krümmers  $\varnothing 740 \times 40$  mm,  $R = 1000$  mm ( $\lambda = 0,327$ ) bei Biegung in der Krümmungsebene und aus der Ebene. Das Vorzeichen der Spannungen beim Biegen in der Krümmungsebene entspricht dem Biegen (Zunahme der Krümmung) eines Bogens. Beim Auseinanderbiegen haben die Spannungen umgekehrte Vorzeichen.



**Abb. 3.8. Spannungen im Krümmer  $\varnothing 740 \times 40$  mm,  $R = 1000$  mm bei Biegung in der Krümmungsebene.**  
Durchgehende Linie: Außenoberfläche;  
gestrichelte Linie: Innenfläche.

In Rohren mit dem Parameter  $\lambda > 1,32$  tritt die maximale Längsspannung bei einem Extradados von  $\varphi = 90^\circ$  auf. Mit abnehmendem  $\lambda$  verschiebt sich das Spannungsmaximum in die neutrale Zone. Bei  $\lambda < 0,66$  bestimmt sich seine Lage durch den Winkel, rad,

$$\varphi = 0,645 \sqrt[3]{I} .$$

Die größten Umfangsspannungen treten bei ebener Biegung in der neutralen Zone und im Extradados auf.

Bei Biegung aus der Ebene kommen die größten Längsspannungen in der neutralen Zone, die größten Umfangsspannungen in der zur Krümmungsebene im Winkel  $45^\circ$  stehenden Ebene vor. Am Extra- und Intradados sind die Spannungen gleich null.

Unabhängig von der Einwirkungsebene des Biegemoments kann man die im Querschnitt maximale Spannung nach folgenden Formeln berechnen:

$$\sigma_{\theta_{\max}} = m_1 M/W; \quad (3.55)$$

$$\sigma_{\varphi_{\max}} = m_2 M/W \quad (3.56)$$

( $W$  Widerstandsmoment des Querschnitts). Im Bereich  $\lambda > 0,35$

$$m_1 = 0,161 k_p \sqrt{5 + 6\lambda^2} ; \quad (3.57)$$

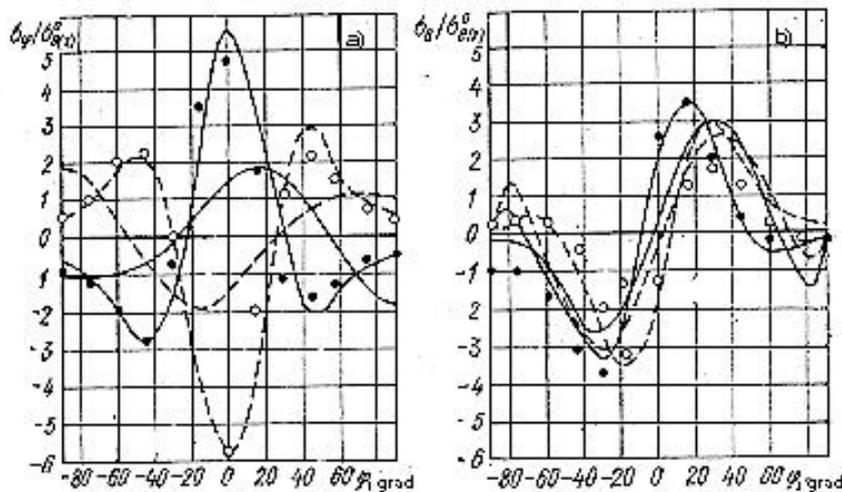
$$m_2 = \frac{18\lambda}{1 + 12\lambda^2}. \quad (3.58)$$

Bei  $\lambda < 0,35$

$$m_1 = 0,836\lambda^{-\frac{2}{3}}; \quad (3.59)$$

$$m_1 = 1,896\lambda^{-\frac{2}{3}}; \quad (3.60)$$

Bei geringen Werten von  $\lambda$  wird die Berechnung der Spannungen nach den Formeln (3.48) - (3.51) ungenau. In Abb. 3.9 sind die Spannungen in einem Rohrbogen  $\varnothing 762 \times 12,7$  mm,  $R = 1142$  mm angegeben, die nach diesen Formeln und bei genauer Berechnung (fünfte Näherung) ermittelt wurden. Das Rohr stand unter einem Druck von 2,75 MPa. Die Punkte bezeichnen die Versuchsergebnisse. Die Rohrbelastung wurde in den Versuchen anfangs mit Innendruck, danach mit einem Biegemoment durchgeführt.



**Abb. 3.9. Umfangs- (a) und Längsspannungen (b) beim Biegen eines dünnwandigen Rohres.**

Durchgehende Linien und schwarze Kreise: Außenfläche; gestrichelte Linien und helle Kreise: Innenflächen.

Die Zeichnungen enthalten die Spannungswerte, die dem zweiten Belastungsschritt entsprechen. Die Spannungen aufgrund des Innendrucks sind darin nicht enthalten, ein möglicher Einfluß der Unregelmäßigkeit der Querschnittsform wurde bei den Versuchsdaten ausgeschlossen.

**Literatur**

30. Дудко Б.Н., Солодова, Л.Н. Исследование напряженного состояния литых колен высокого давления. – Химическое и нефтяное машиностроение. (1975), № 6, стр. 4 – 7.  
Dudko, B.N.: Solodova, L.N.: Issledovanie naprjažennogo sostojanija litych kolen vysokogo davlenija. - In: Chimičeskoe i neftjanoe mašinostroenie. Moskva, (1975), Nr 6, S. 4 - 7.  
Engl.: Stressed state of cast high-pressure elbows. - In: Chemical and petroleum engineering. New York, (1975), Nr 6, S. 493 - 496.
49. Кларк Р., Рейсснер Э.: Изгиб труб с криволинейной осью. – В кн.: Проблемы механики. Москва: Иностранная литература, 1955.  
Klark, R.; Rejsner, E.: Izgib trub s krivolinejnoj os'ju. - In: Problemy mechaniki. Moskva: Inostrannaja literatura, 1955.  
Übersetzung aus dem Englischen: Clark, R.A, Reissner, E.: Bending of curved tubes. - In: Advances in Applied Mechanics. New York, 2 (1951), S. 93 - 122.
50. Костовецкий Д.Л.: Прочность трубопроводных систем энергетических установок. Ленинград: Энергия, 1973.  
Kostoveckij, D.L.: Pročnost' truboprovodnych sistem energetičeskich ustanovok. Leningrad: Energija, 1973.  
/Sicherheit der Rohrleitungssysteme von Energieanlagen; russ./

---

Stuttgart, den 5. August 1996

übersetzt von

Ottmar Pertschi  
(Dipl.-Übersetzer)