

С.А. БАБАЯН

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ ПО ВИТКАМ РЕАЛЬНОЙ КОНИЧЕСКОЙ РЕЗЬБЫ

Рассмотрено распределение нагрузки по непрерывным виткам конических резьбовых соединений типа “болт-гайка” и “стяжка”, для которых на основе условия совместности деформации тела и витков болта и гайки получены дифференциальные уравнения, решаемые численными методами. Изучено влияние на распределение нагрузки таких параметров резьбы, как отклонения конусности и шага. Выведено условие равномерного распределения нагрузки путем расчёта соответствующих отклонений элементов резьбы.

Ключевые слова: виток, резьба, зазор, конусность, нагрузка.

Закон распределения нагрузки по виткам конического резьбового соединения установлен в работе А.Е. Сарояна [1]. При решении задачи был использован метод, предложенный Н.Е. Жуковским: винтовая нарезка заменена кольцеобразными выступами, которые под воздействием приложенных сил подвергаются деформациям сдвига. Нагрузка на каждый виток определяется из системы уравнений, число которых равно количеству витков резьбы.

В отличие от рассмотренной схемы, в [2] закон распределения усилий по виткам идеальной конической резьбы определен с использованием метода И.А. Биргера [3], учитывающего конечное число непрерывных витков, подверженных деформациям сдвига и изгиба. Помимо этого представляется возможным приближенно учесть влияние отклонений элементов реальной резьбы.

Для соединения типа стяжки с переменными площадями поперечного сечения тела болта и гайки уравнение совместности деформаций записывается в виде [2]

$$\int_0^z Q(z) / [E_1 F_1(z)]^{-1} dz - \int_0^z [Q - Q(z)] / [E_2 F_2(z)]^{-1} dz = q(z) \cdot \gamma(z) - q(0) \gamma(0),$$

$$\int_0^r Q(z) dr / E_1 F_1(z) - \int_0^r [Q - Q(z)] dr / E_2 F_2(z) = q(z) \cdot \gamma(z) - q(0) \gamma(0),$$
(1)

где $Q(z)$ - величина осевой силы, действующей в сечении z ; Q - полная осевая нагрузка в соединении; E_1 и E_2 - модули упругости материала болта и гайки; $F_1(z)$ и $F_2(z)$ - площади поперечного сечения тела болта и гайки в сечении z ; $\gamma(z)$ и $\gamma(0)$ - величины, характеризующие податливость витков болта и гайки в сечениях z и $z=0$; $q(z)$ и $q(0)$ - интенсивность распределения осевых сил на боковой поверхности стержня болта в тех же сечениях.

Величина γ для цилиндрического резьбового соединения определяется по формуле [3]

$$\gamma = S_0^2 (\lambda_1 / E_1 + \lambda_2 / E_2) / f,$$

где S_0 - шаг резьбы; f - проекция площади боковой поверхности витка на плоскость, перпендикулярную оси резьбы; λ_1 и λ_2 - безразмерные коэффициенты, зависящие от геометрических параметров нарезки и соединения и определяемые по формулам

$$\lambda_1 = \omega + r_1 t_2 S_0^{-2} [(r_1^2 + r_b^2)(r_1^2 - r_b^2)^{-1} - \mu_1] \operatorname{tg}^2 \alpha / 2,$$

$$\lambda_2 = \omega + r_0 t_2 S_0^{-2} [\mu_2 + (R^2 + r_0^2)(R^2 - r_0^2)^{-1}] \operatorname{tg}^2 \alpha / 2.$$

Для упрощения последующих расчетов введем коэффициент

$$\beta(z) = [E_1 F_1(z)]^{-1} + [E_2 F_2(z)]^{-1}.$$

Здесь r_1 и r_0 - внутренний и наружный радиусы нарезки; t_2 - рабочая высота витка; α - угол профиля резьбы; R - наружный радиус муфты; r_b - радиус отверстия в болте; μ_1 и μ_2 - коэффициенты Пуассона материалов болта и гайки соответственно; ω - безразмерный коэффициент, зависящий от схемы нагружения и геометрических параметров профиля нарезки.

Определим переменные коэффициенты уравнения (1) для конической резьбы (рис. 1). В этом случае при $E_1 = E_2$ и $\mu_1 = \mu_2$, а также при $r \gg t/2$; $r \pm t/2 = r$; $f = 2\pi r t_2$ получим

$$\gamma(z) = (\pi E)^{-1} \{ S_0^2 \omega (r \cdot t_2)^{-1} + [(r^2 - r_b^2)^{-1} r_b^2 + (R^2 - r^2)^{-1} R^2] \operatorname{tg}^2 \alpha / 2 \}, \quad (2)$$

$$\beta(z) = (\pi E)^{-1} [(r^2 - r_b^2)^{-1} + (R^2 - r^2)^{-1}], \quad (3)$$

$$F_2(z) = \pi(R^2 - r^2). \quad (4)$$

В формулах (2)-(4) переменной величиной является средний радиус нарезки r , определяемый из выражения: $r = R_1 + Z \operatorname{tg} \varphi$.

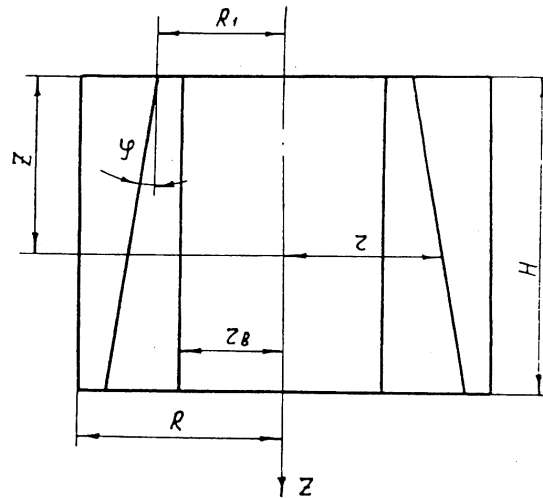


Рис. 1. Схема конического соединения

Граничные условия для неизвестной функции $Q(z)$ следующие: при $z=0$ - $Q(0)=0$; при $z=H$ - $Q(H)=Q$.

Ввиду незначительного угла уклона конической нарезки ($\varphi_{\max}=7^{\circ}7'30''$) значение коэффициента ω можно принять таким же, как и для цилиндрического соединения [3].

Распределение нагрузки по виткам конической резьбы для соединения типа «болт-гайка» получено в виде [2]

$$\int_0^z Q(z)[E_1 F_1(z)]^{-1} dz + \int_0^z Q(z)[E_2 F_2(z)]^{-1} dz = q(z)\gamma(z) - q(0)\gamma(0). \quad (5)$$

Уравнения (1) и (5) после соответствующих дополнений позволяют приближенно оценить влияние точности изготовления реальной резьбы на распределение нагрузки.

Рассмотрим влияние трех основных элементов конической резьбы: отклонений конусности, шага и половины угла профиля. Полагаем, что в соединении имеют место накопленные погрешности шага, и эти отклонения одинаковы для всех витков. Будем считать также, что в соединении, изготовленном с отклонениями конусности резьбы, все соответствующие точки профиля лежат на одной прямой. На рис. 2 показаны схемы соединений с отклонениями конусности резьбы при сопряжениях по большому (а) и малому (б) диаметру конуса.

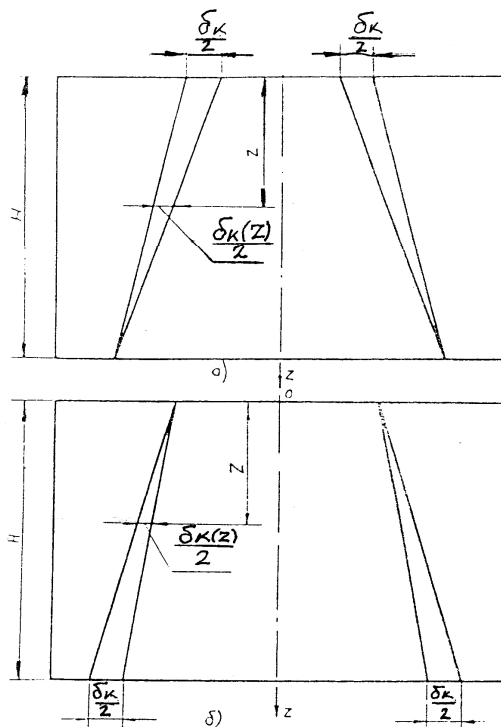


Рис. 2. Схема соединения с отклонениями конусности: а – сопряжение по большому диаметру; б – сопряжение по малому диаметру

Во втором случае между витками резьбы образуется дополнительный диаметральный зазор, изменяющийся от нуля (в сечении $z=0$) до максимального значения δ_k суммарного отклонения конусности ниппеля и муфты в сечении $z=H$.

Осевой зазор между витками в сечении с координатой z будет

$$\Delta_k(z) = (2H)^{-1} \delta_k(z) \cdot \operatorname{tg} \alpha / 2 = Kz. \quad (6)$$

Тогда условие совместности деформаций для конического соединения типа «болт-гайка» при наличии отклонений конусности примет вид

$$\int_0^z Q(z)[E_1 F_1(z)]^{-1} dz + \int_0^z Q(z)[E_2 F_2(z)]^{-1} dz = q(z)\gamma(z) - q(0)\gamma(0) + \Delta_k(z). \quad (7)$$

Продифференцировав (7) по z , получим

$$\gamma(z)Q''(z) + \gamma'(z)Q'(z) - \beta(z)Q(z) = -K. \quad (8)$$

В первом случае при сопряжении по большому диаметру конуса (рис. 2а) имеем

$$\Delta_k(z) = K(H - z). \quad (9)$$

С учетом (7) и (9) получим

$$\gamma(z)Q''(z) + \gamma'(z)Q'(z) - \beta(z)Q(z) = \pm K. \quad (10)$$

Уравнение (10) описывает закон распределения нагрузки по виткам конической резьбы в соединении типа «болт-гайка» с учетом отклонений конусности резьбы.

Аналогично, с учетом [2], для соединения типа стяжки получим

$$\gamma(z)Q''(z) + \gamma'(z)Q'(z) - \beta(z)Q(z) = -Q[E_2 F_2(z)]^{-1} \pm K. \quad (11)$$

В уравнениях (10) и (11) знак “плюс” при коэффициенте «К» соответствует отклонениям, обуславливающим сопряжение по большому диаметру конуса, знак “минус” – при сопряжении по малому диаметру.

В соединениях, изготовленных с погрешностями в шаге так же, как и при отклонениях конусности, в недеформированном состоянии образуется дополнительный осевой зазор

$$\Delta_s(z) = \delta_s z / H = \lambda z, \quad (12)$$

где δ_s – накопленная по всей длине соединения разница в шаге гайки и винта. В случае, когда шаг винта больше шага гайки, имеем

$$\Delta_s(z) = \lambda(H - z). \quad (13)$$

По аналогии с (10) и (11) с учетом соотношений (12) и (13) получим

$$\gamma(z)Q''(z) + \gamma'(z)Q'(z) - \beta(z)Q(z) = \pm(K + \lambda), \quad (14)$$

$$\gamma(z)Q''(z) + \gamma'(z)Q'(z) - \beta(z)Q(z) = -Q[E_2 F_2(z)]^{-1} \pm (K + \lambda) \quad (15)$$

Уравнения (14) и (15) описывают закон изменения нагрузки по длине конического соединения при наличии отклонений конусности и шага.

Представляет интерес определение закона изменений отклонений элементов резьбы (например, конусности) из условия равномерного распределения усилий по виткам. В этом случае $\Delta_k(z)$ в уравнении (11) является искомой функцией.

При равномерном распределении нагрузки по виткам имеем

$$Q(z) = Qz / H; Q'(z) = Q / H; Q'' = 0.$$

Учитывая эти соотношения, дифференцируя по z уравнение (11), получим

$$-\gamma'(z)Q + \beta(z)Qz = H\Delta'_K(z). \quad (16)$$

После интегрирования выражения (16) находим

$$H\Delta_K(z) = Q[\gamma(0) - \gamma(z)] + Q \int_0^z \beta(z) \cdot z \cdot dz. \quad (17)$$

Имея в виду (2) и (4) и раскрывая интеграл в (17), получим

$$\begin{aligned} \Delta_K(z) = & QH^{-1}[\gamma(0) - \gamma(z)] + [2\pi EHtg^2\varphi]^{-1} Q \{ \ln[(R_1 + ztg\varphi)^2 - r_b^2] \times \\ & \times (R_1^2 - r_b^2)^{-1} + + R_1 r_b^{-1} \ln(R_1 + ztg\varphi + r_b)(R_1 - r_b) \times \\ & \times [(R_1 + ztg\varphi - r_b)(R_1 + r_b)]^{-1} - \\ & - \ln[R^2 - (R_1 + ztg\varphi)^2](R^2 - R_1^2)^{-1} - R_1 R^{-1} \ln(R + R_1 + ztg\varphi)(R - R_1) \times \\ & \times [(R - R_1 - ztg\varphi)(R + R_1)]^{-1} \}, \end{aligned} \quad (18)$$

где $\gamma(z)$ и $\gamma(0)$ определяются из выражения (3).

Формула (18) определяет изменение осевого зазора в соединении типа «болт-гайка», обеспечивающего равномерное распределение нагрузки по виткам конической резьбы. Закономерность изменения разницы шагов гайки и винта $\Delta s(z)$ для обеспечения равномерного распределения нагрузки по виткам находится аналогично.

Полученные зависимости были использованы для расчета предельных отклонений элементов конической резьбы и учтены в ГОСТ 5286-75 «Замки для бурильных труб», а также в его последующих переизданиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сароян А.Е.** Проектирование бурильных колонн. – М.: Недра, 1971.
2. **Бабаян С.А.** и др. Распределение нагрузки по виткам конической резьбы // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1972. – № 1.
3. **Биргер И.А.** Расчет резьбовых соединений. – М.: Оборонгиз, 1959.

Арцахский госуд. ун-т.

Материал поступил в редакцию 24.04.2007.

Ս.Հ. ԲԱԲԱՅԱՆ

ԲԵՌՆՎԱԾՔԻ ԲԱՇԽՈՒՄԸ ԻՐԱԿԱՆ ԿՈՆԱԿԱՆ ՊԱՐՈՒՐԱԿԻ ԳԱԼԱՐՆԵՐՈՎ

Քննարկված է բեռնվածքի բաշխումը «առձգիչ», հեղույս, մանեկ տիպի կոնական պարուրակաձև միացությունների անընդհատ գալարներով, որոնց համար հեղույսի ու մանեկի գալարների ու իրանի դեֆորմացիաների համատեղության պայմանի հիման վրա ստացվել է դիֆերենցիալ հավասարում, որը լուծվում է թվային մեթոդներով: Ուսումնասիրվել է բեռնվածքի ազդեցությունը բաշխման վրա իրական պարուրակի այնպիսի պարամետրերի համար, ինչպիսիք են կոնաձևության շեղումը և քայլը: Դուրս է բերվել բեռնվածքի հավասարաչափ բաշխման պայմանը, որն ապահովում է պարուրակի տարրերի համապատասխան հաշվարկը: Նոր ստանդարտներով մշակված առաջարկները հաշվի են առնվել գործողների վերանայման ժամանակ:

Առանցքային բառեր. գալար, պարուրակ, բացակ, կոնականություն, բեռնվածություն:

S.H BABAYAN

DISTRIBUTION OF REAL CONIC THREADING SPIRE LOAD

The distribution of continuous spire load of such conic threading junctions like “bolt -nut” and “tie” (rod, brace, stay) is considered. Using the numerical method of solution, we have deduced a differential equation based on the condition of simultaneous deformation of the body and spires of the bolt and nut. The influence of such parameters of real threading like concavity and pitch deviations on load distribution has been studied. The condition of even load distribution which is supported by the analysis of the thread element deviations is formulated.

Keywords: spire, thread, gap, concavity, load.