

Чичулін В.П.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Чичуліна К.В.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ЙМОВІРНІСНИЙ РОЗРАХУНОК ФЛАНЦЕВОГО З'ЄДНАННЯ

У статті приведені основні етапи оцінки надійності сталевих конструкцій та їх окремих конструктивних елементів. Розрахунок будь-якої конструкції заснований на виборі певної моделі або розрахункової схеми. При цьому виділяють істотні чинники і відкидають несуттєві, другорядні. При оцінці напруженого стану конструкції можливі два підходи до аналізу: детермінований та ймовірнісний. На початку ймовірнісних розрахунків визначаються геометричні характеристики об'єкта. Наступним етапом визначаються розрахункові характеристики міцності та навантаження. Також розраховуються статистичні залежності, зокрема, математичне сподівання та середнє квадратичне відхилення, коефіцієнт варіації міцності та навантаження. Запропоновано приймати випадкові характеристики міцності та навантаження у вигляді нормального розподілення. Оцінка надійності сталевих конструкцій здійснюється з достатньою достовірністю, за детерміністичними формулами граничної рівноваги, використовуючи математичні очікування і стандарти внутрішніх і зовнішніх факторів. У розрахунках використовуються загально прийняті залежності для нормального розподілу резерв міцності, характеристика безпеки. Ймовірність відмови та ймовірність безвідмовної роботи визначаються з використанням функції Лапласа. Представлено ймовірнісний розрахунок фланцевого з'єднання на навантаження від кручення. У розрахунках використовуються статистичні характеристики болтів різних класів міцності. Задаються коефіцієнти варіації міцності і навантаження. Кількість болтів задається умовно. Конструктивні вимоги до з'єднання враховуються додатково. Спроцєні процедури розрахунку дозволяють виконати оперативну оцінку конструктивної надійності з використанням ймовірнісних концепцій. Знаходження характеристик для вихідних параметрів у цьому випадку зводиться до застосування відомих формул теорії ймовірностей, дають розподіл випадкових функцій від випадкових величин.

Ключові слова: надійність, фланцеве з'єднання, відмова, ймовірність, руйнування, міцність, навантаження.

Постановка проблеми. Реальні умови експлуатації конструкцій будівель і споруд можуть значно відрізнятись від тих, які приймаються на стадії проектування і базуються на гіпотезах і припущеннях. Основним інструментом виходу із цієї невизначеності є розрахунок у поєднанні з конструюванням. Розрахункова модель будівельних конструкцій повинна містити комплекс базових даних, що представляють собою фізичні параметри, які відповідають навантаженням і впливам зовнішнього середовища, властивостям матеріалів, а також геометричним параметрам. Основною метою розрахунків є забезпечення розрахункового рівня надійності із застосуванням двох можливих підходів: ймовірнісного методу або методу коефіцієнтів, прив'язаного до граничних станів конструкцій. Існує тенденція до поступового переходу до ймовірнісних методів розрахунку, оскільки шлях забезпечення надійності залежить від величезної кількості чинників, пов'язаних із

проектуванням, виготовленням, експлуатацією конструкцій, вплив яких неможливо оцінити коефіцієнтами методу граничних станів. Отже, актуальність приведення ймовірнісного розрахунку фланцевих з'єднань не викликає сумніву.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналізу ймовірнісних методів та теорії надійності присвячені роботи [1–4], в яких загалом представлені основні методи будівельних конструкцій та, зокрема, окремих конструктивних елементів (підкранових та кроквяних балок, ферм, колон та загалом рамних конструкцій). Робота [5] присвячується аналізу розрахунку болтів фланцевих з'єднань при складному напружено-деформованому стані, який виникає в болтах контактного фланцевого з'єднання (з'єднання без прокладок, які застосовуються в конструкціях що не потребують повної герметизації стиків), в нашому випадку – з'єднання направляючої і валу колеса огляду. У [6] представлені основні поняття

теорії надійності, компоненти та показники надійності, найбільш поширені методи оцінювання показників надійності будівельних конструкцій, імовірнісні моделі навантажень, методи їх статистичного дослідження та встановлення розрахункових значень.

Постановка завдання. При ймовірнісних розрахунках розглядаються випадкові характеристики, використання яких дає можливість проектувати конструкції заданого рівня надійності. Тому розробка методів імовірнісних розрахунків різного типу конструкцій є актуальною проблемою. При цьому дуже важливо достовірно представлені характеристики міцності і навантаження. Спрощені процедури розрахунку дозволяють виконати оцінку конструктивної надійності з використанням ймовірнісних методів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглядаючи основи надійності механічних деталей, наведемо розв'язання цього питання в техніці випадкових величин. Розглянемо випадок, коли досліджена деталь (елемент) завантажена випадковим механічним навантаженням \tilde{g} , котра викликає в деталі випадкові механічні напруження $\tilde{\sigma}$. Відмітимо, що міцність деталі – також випадкова величина, вона визначається випадковими напруженнями руйнування $\tilde{\sigma}_y$ (наприклад, межа плинності для м'якої сталі). Отже, несуча здатність деталі дорівнює:

$$\tilde{R} = \tilde{\sigma}_y A, \quad (1)$$

де A – геометрична характеристика перерізу деталі.

Запишемо узагальнену умову безвідмовності деталі:

$$\tilde{Y} = \tilde{R} - \tilde{S} \geq 0, \quad (2)$$

де \tilde{R} – несуча здатність (або опір) деталі;

$\tilde{S} = a\tilde{q}$ – зусилля в деталі або напруження від зовнішнього навантаження;

\tilde{Y} – резерв міцності (резерв несучої здатності) деталі.

У першу чергу, розглянемо ці параметри в техніці випадкових величин. Таке уявлення доречно при дії навантажень мало змінних у часі (постійних і деяких технологічних) або тих, що мають одноразовий характер.

Зону допустимих станів складає множина, для кожного елемента якої виконується наведена нерівність:

$$\Omega = \{Y : y = (R-S) \geq 0\}. \quad (3)$$

У координатах $R=S$ область Ω має трикутну форму та розташовується вище прямої $R=S$ (рис. 1, а).

Загалом, відомо, що метод визначення надійності, описує ймовірність відмови [2]. Припустимо, що криві розподілу навантажень і несучої здатності підпорядковуються нормальному закону (рис. 1, б). Отже, загальну умову безвідмовної роботи можна записати в такому вигляді:

$$Y = R - S \geq 0, \quad (4)$$

де R – розрахунковий параметр несучої здатності;

S – розрахунковий параметр навантаження.

Також ймовірність безвідмовної роботи можна представити у наступному вигляді:

$$P = \int_{\Omega} f(Y) dY. \quad (5)$$

Зазначимо, що за умови нормальних розподілів і розподілення їхньої різниці відбувається за нормальним законом. Приведемо алгоритм розрахунку надійності:

- 1) математичні очікування та стандарти випадкових величин зусиль (\bar{S}, \hat{S}) ;
- 2) характеристики несучої здатності (\bar{R}, \hat{R}) ;
- 3) резерв міцності (Y) ;
- 4) математичне очікування (\bar{Y}) та стандарт резерву міцності (\hat{Y}) :

$$\bar{Y} = \bar{R} - \bar{S}, \quad (6)$$

$$\hat{Y} = \sqrt{\hat{R}^2 + \hat{S}^2}; \quad (7)$$

- 5) характеристика безпеки:

$$\beta = \frac{\bar{Y}}{\hat{Y}} = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\hat{R}^2 + \hat{S}^2}}; \quad (8)$$

- 6) ймовірності відмови:

$$Q(Y \leq 0) = F_y(0) = F_y(\bar{Y} - \beta \hat{Y}). \quad (9)$$

Під час використання нормального розподілу $f(Y)$ із застосуванням характеристики безпеки отримуємо такі вирази:

$$\begin{aligned} Q(Y \leq 0) &= 0,5 - \Phi(\beta) \\ P(Y \geq 0) &= 0,5 + \Phi(\beta) \end{aligned} \quad (10)$$

Представимо функцію Лапласа – табульовану в такому вигляді:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-z^2/2} dz. \quad (11)$$

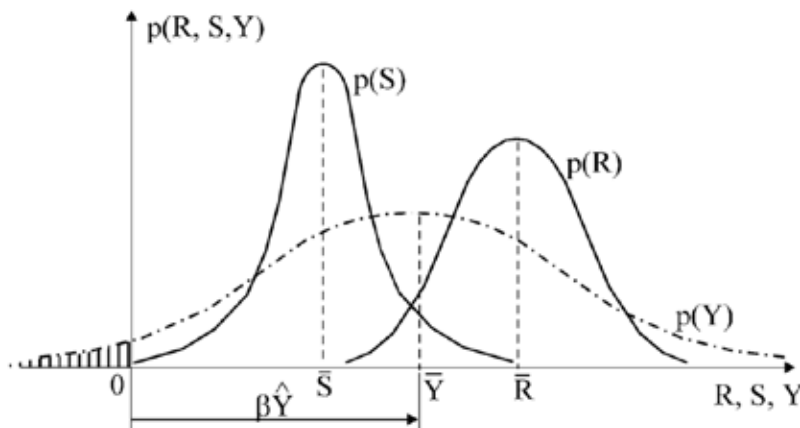
Проаналізуємо поетапне визначення надійності фланцевого з'єднання (рис. 2).

Спочатку існує необхідність оцінки ймовірності відмови фланцевого з'єднання механізму трансмісії. Підберемо новий діаметр за необхідності і кількість болтів, що кріплять фланцеву частину з умови $Q(x) < [0,001]$.



- ① - зона допустимих станів
- ② - зона відмови
- 3 - межа допустимої зони
- 4 - проекція розподілу $P_Y(R,S)$

а)



б)

Рис. 1. Визначення ймовірності відмови

- а) оцінювання надійності у техніці випадкових величин;
- б) за нормальним законом розподілення

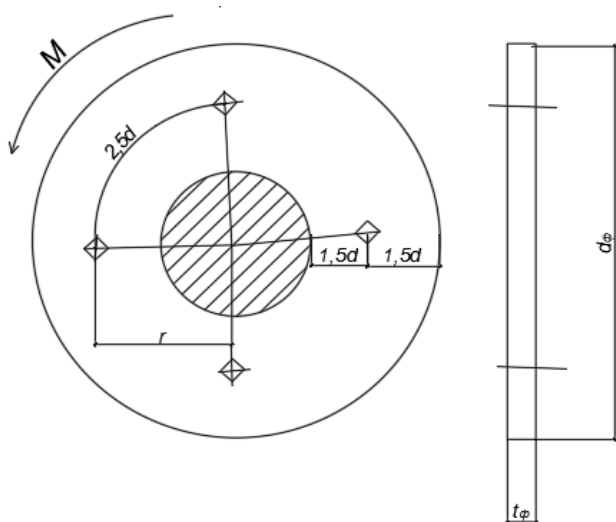


Рис. 2. Розрахунок фланцевого з'єднання

Вихідні дані розрахунку можна представити у наступному вигляді:

- 1) діаметр болтів: $d=16 \text{ мм}$;
- 2) зусилля, що передається: $M=20 \text{ кНм}$;

- 3) кількість болтів: $n=4$;
- 4) клас міцності болтів: 5.6.
- 5) $\bar{S} = 0,5S$; $V_B = 0,2$ – числові характеристики вантажу;
- 6) $\bar{\sigma} = 220 \text{ МПа}$; $V_\sigma = 0,1$ – числові характеристики межі міцності сталі;
- 7) математичне очікування розрахункового опору зрізанню для класів міцності болтів;

Таблиця 1

Математичне очікування розрахункового опору зрізанню, мПа

Клас болтів	4.6	4.8	5.6	5.8	6.6	8.8
R_{ds}	215	230	270	285	330	415

- 8) сталь для вала і фланцю 09Г2С із характеристиками зрізанню $[\tau] = 174 \text{ МПа}$, змінанню $R_{bp}=520 \text{ МПа}$ (товщина фланцю визначається з умов роботи на змінанню).

Отже, запропонуємо основні етапи детального розрахунку ймовірності безвідмовної роботи (надійності):

1. Детермінований розрахунок. Діаметр вала:

$$d_6 = \sqrt[3]{\frac{16M_{кр}}{\pi[\tau]}} = \sqrt[3]{\frac{16E20E100}{3,14E17,4}} = 8,4 \text{ см}. \quad (11)$$

2. Характеристики резерву несучої здатності:

2.1. Площа болта:

$$A_b = \pi d^2 / 4 = 3,14E1,6^2 / 4 = 2,01 \text{ см}^2; \quad (12)$$

2.2. Радіус до осі болтів:

$$r_0 = 0,5d_6 + 1,5d = 0,5E8,4 + 1,5E1,6 = 6,6 \text{ см}; \quad (13)$$

2.3. Напруження від зрізу на один болт:

$$S = M / (r_0 n A_b) = 20E100 / (6,6E4E2,01) = 38 \text{ кН} / \text{см}^2; \quad (14)$$

2.4. Математичне очікування напруження в болтах:

$$\bar{S} = 0,5\bar{S} = 0,5E38 = 19 \text{ кН} / \text{см}^2; \quad (15)$$

2.5. Середнє квадратичне відхилення напруження в болтах:

$$\hat{S} = V_s \bar{S} = 0,2E19 = 3,8 \text{ кН} / \text{см}^2; \quad (16)$$

2.6. Математичне очікування міцності болтів:
 $\bar{R} = 27 \text{ кН} / \text{см}^2;$

2.7. Середнє квадратичне відхилення міцності болтів:

$$\hat{R} = V_\sigma \bar{R} = 0,1E27 = 2,7 \text{ кН} / \text{см}^2. \quad (17)$$

3. Характеристика безпеки через резерв несучої здатності за формулою (8):

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\hat{R}^2 + \hat{S}^2}} = \frac{27 - 19}{\sqrt{2,7^2 + 3,8^2}} = 1,72.$$

3.1. Визначення ймовірності безвідмовної роботи болтів:

$$P = 0,5 + \Phi(1,72) = 0,5 + 0,4573 = 0,9573 < 0,999 \quad (\text{надійність не забезпечена}). \quad (18)$$

4. Збільшуємо кількість болтів (чи збільшення діаметра болтів, чи підвищення класу міцності болтів):

4.1. Максимальна кількість болтів даного діаметру, котрі можна розмістити на фланці (заокруглюємо до меншого):

$$n = 2\pi r_0 / (2,5Ed) = 2E3,14E6,6 / (2,5E1,6) = 10,36 \approx 10 \text{ шт}; \quad (18)$$

4.2. Імовірність безвідмовної роботи $P = 0,999$ відповідає характеристиці безпеки $\beta = 3,08$.

Якщо вирішити зворотну задачу, математичне очікування навантаження: $\bar{S} = 0,5445\bar{R}$. Тоді необхідна кількість болтів становитиме (заокруглюємо до більшого):

$$n = M / (r_0 A_b 2\bar{R}x0,5445) = 2000 / (6,6E2,01E2E27E0,5445) = 5,12 \approx 6 \text{ шт}.$$

Потрібно, щоб необхідна кількість болтів була менше або дорівнювала максимальній кількості, в іншому випадку поступово збільшуємо діаметр болтів.

5. Перевіряємо ймовірність відмови, використовуючи той самий алгоритм розрахунку:

$$S = M / (r_0 n A_b) = 20E100 / (6,6E6E2,01) = 25,13 \text{ кН} / \text{см}^2$$

$$\bar{S} = 0,5E25,13 = 12,56 \text{ кН} / \text{см}^2;$$

$$\hat{S} = 0,2E12,56 = 2,5 \text{ кН} / \text{см}^2;$$

$$\beta = \frac{27 - 12,56}{\sqrt{2,5^2 + 2,5^2}} = 3,92.$$

Отже, визначаємо ймовірність безвідмовної роботи болтів:

$$P = 0,5 + \Phi(3,92) = 0,5 + 0,4999 = 0,9999 > 0,999$$

(надійність забезпечена). Приймаємо 6 болтів діаметром 16 мм.

Висновок. Представлено ймовірнісний розрахунок фланцевого з'єднання надає можливість використовувати в реальному проектуванні статистичні характеристики міцності і навантаження, а також отримувати конструкції заданого рівня надійності. Методика визначення ймовірнісних характеристик резерву несучої здатності може бути застосована для різних конструктивних елементів і систем в цілому для більш повного врахування несучої здатності всіх елементів конструкції при проектуванні нових і реконструкції наявних будівель.

Список літератури:

1. Пічугін С.Ф. Розрахунок надійності будівельних конструкцій. *Монографія*. 2016. 520 с.
2. Чичулін В.П., Чичуліна К.В. Межа застосування формули визначення ймовірності відмови об'єкту з урахуванням параметра часу. *Нові технології в будівництві*. 2014. № 27. С. 30–34.
3. Перельмутер А.В. Развитие требований к безотказности сооружений. *Вестник ТГСАУ*. 2015. № 1. С. 81–101.
4. Краснощекоев Ю.В. Вероятностный расчет строительных конструкций с учетом асимметрии распределения случайных величин и функций. *Вестник СибАДИ*. 2020; 17(5). С. 635–636.
5. Білик С.І., Бут М.О., Шпинда В.З. Аналіз розрахунку болтів фланцевого з'єднання в умовах складного напружено-деформованого стану. *Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського*. Випуск 13. 2014. С. 76–84.

6. Пашинський В.А. Основи теорії надійності будівель і споруд. *Методичні вказівки до самостійної роботи студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» усіх форм навчання*. Кропивницький. 2018. 50 с.

Chichulin V.P., Chichulina K.V. PROBABILITY CALCULATION OF FLANGE CONNECTION

The article presents the main stages of evaluating the reliability of steel structures and their individual structural elements. The calculation of any design is based on the choice of a specific model or design scheme. At the same time, significant factors are identified and insignificant, secondary ones are discarded. When assessing the stress state of a structure, two approaches to analysis are possible: deterministic and probabilistic. At the beginning of probabilistic calculations, the geometric characteristics of the object are determined. The next step is to determine the calculated strength and load characteristics. Statistical dependences are also calculated, in particular, the mathematical expectation and mean square deviation, the coefficient of variation of strength and load. It is proposed to take random strength and load characteristics in the form of a normal distribution. Assessment of the reliability of steel structures is carried out with sufficient reliability, using deterministic formulas of boundary equilibrium using mathematical expectations and standards of internal and external factors. The calculations use generally accepted dependencies for the normal distribution of strength Reserve and safety characteristics. The probability of failure and the probability of uptime are determined using the Laplace function. A probabilistic calculation of the flange connection for torsional loads is presented. The calculations use statistical characteristics of bolts of different strength classes. The coefficients of variation of strength and load are set. The number of bolts is set conditionally. Design requirements for the connection are taken into account additionally. Simplified calculation procedures allow you to perform an operational assessment of structural reliability using probabilistic concepts. Finding the characteristics for the initial parameters in this case is reduced to applying the well-known formulas of probability theory, which give the distribution of random functions from random variables.

Key words: reliability, flange connection, probability, failure.