

ной кривой позволяет с помощью экспериментальных и справочных данных о температурах в нескольких точках быстро получить компактный вид полного набора температурных профилей се-

чения в разные моменты времени нагрева, пригодных для непосредственного использования в расчёте огнестойкости железобетонных конструкций по деформационной модели.

#### Список литературы

1. Яковлев А. И. Основные принципы расчёта пределов огнестойкости строительных конструкций / А. И. Яковлев // Огнестойкость строительных конструкций. – 1980. – Вып. 8. – С. 3–14.
2. Сегалов А. Е. О расчёте фактических пределов огнестойкости бетонных и железобетонных конструкций / А. Е. Сегалов // Огнестойкость железобетонных конструкций. – М.: НИИЖБ, 1984. – С. 61–68.
3. Wickstrom U. A Very Simple Method for Estimating Temperatures in Fire Exposed / U. Wickstrom // Concrete Structures. – Elsevier Applied Science Publishers, 1986. – P. 186–194.
4. Kodur V. K. R. A Simplified Approach for Predicting Temperature in Reinforced Concrete Members Exposed to Standard Fire / V. K. R. Kodur, B. L. Yu, M. M. S. Dwaikat // Fire Safety Journal. – 2013. – Vol. 56. – P. 39–51.
5. Купчикова Н. В. Технология реконструкции, санации и капитального ремонта зданий, включая экспертизу геоподосновы, оснований и фундаментов / Н. В. Купчикова. – Астрахань: АГАСУ, 2019.
6. Fedorov V. S., Kupchikova N. V. Numerical researches of the work of the pile with end spherical broadening as part of the pile group / V. S. Fedorov, N. V. Kupchikova // Материалы XIII Международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов / под общ. ред. В. А. Гутмана, Т. В. Золиной. – 2019. – С. 149–153.
7. Kupchikova N. V. Numerical researches of the work of the pile with end spherical broadening as part of the pile group / N. V. Kupchikova // Building and Reconstruction. – 2019. – № 6 (86). – С. 3–9.
8. Купчикова Н. В. Экспериментальные исследования с ложными ограничениями при разработке способа возведения инъекционных свай / Н. В. Купчикова, Р. И. Шаяхмедов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2020. – № 3 (33). – С. 58–62.
9. Купчикова Н. В. Экспертиза геоподосновы, оснований и фундаментов глубокого заложения: региональные особенности учёта и оценки деформаций при эксплуатации / Н. В. Купчикова // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2020. – № 3 (33). – С. 63–68.
10. Купчикова Н. В. Технология реконструкции, санации и капитального ремонта зданий, включая экспертизу геоподосновы, оснований и фундаментов / Н. В. Купчикова. – Астрахань, 2019.
11. Zolina T. Influence of vibration impacts from vehicles on the state of the foundation structure of a residential building / T. Zolina, N. Kupchikova // E3S Web of Conferences. Innovative Technologies in Environmental Science and Education, ITESE 2019. – 2019. – P. 03053.

© В. С. Федоров, В. Е. Левитский, В. Е. Матвиенко

#### Ссылка для цитирования:

Федоров В. С., Левитский В. Е., Матвиенко В. Е. Методика построения температурных профилей для расчёта огнестойкости железобетонных конструкций методом нормализованной кривой // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2021. № 1 (35). С. 5–8.

УДК 624.078.465

## ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЕ (АБСОЛЮТНОЕ) УДЛИНЕНИЕ РАСТЯНУТОГО БОЛТА

**Н. Л. Тишков, А. Н. Степаненко, А. В. Белов, А. А. Иодчик**

*Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия*

В статье предложен прием определения величины действительного удлинения растянутого болта для измерения его предварительного напряжения во фланцевых соединениях. Для обеспечения неизменяемости стыковых фланцевых соединений (не превращения их в механизм) при эксплуатации в болтах стыка создается начальное растягивающее усилие. Величина этого усилия должна быть близкой к оптимальной, позволяющей сохранить неизменяемость соединения при нагружении до достижения в нем расчетного усилия в стыкуемом элементе. Чтобы определить оптимальную величину усилия предварительного напряжения высокопрочного болта, необходимо знать действительную величину абсолютного удлинения рабочей части «стержня». В работе представлено численное моделирование болтового соединения для определения его действительного удлинения с учетом: ослабления сечения резьбой рабочей части «стержня», податливости резьбового соединения, зазоров между болтом и стенкой фланцев, деформаций гайки и головки болта. По результатам численного эксперимента предложена регрессия, которая может быть рекомендована для практических расчетов.

**Ключевые слова:** фланцевое соединение, болты, предварительное напряжение, оптимальное усилие, удлинение болтового соединения.

## A VALID (ABSOLUTE) LENGTHENING STRETCHED BOLT

**N. L. Tishkov, A. N. Stepanenko, A. V. Belov, A. A. Iodchik**

*Pacific National University, Khabarovsk, Russia*

The article proposes a method for determining the value of the actual elongation of a stretched bolt to determine the magnitude of the prestressing of bolts in flange joints. To ensure the invariability of butt flange joints (not turning them into a mechanism) during operation, an initial tensile force is created in the joint bolts. The magnitude of this force should be close to the optimal one, allowing the joint to remain unchanged under loading until it reaches the design force in the abutting element. To determine the optimal value of the prestressing force of a high-strength bolt, it is necessary to know the actual value of the absolute elongation of the working part of the “rod” of the prestressing bolt. The paper presents a numerical modeling of a bolted connection to determine the actual elongation

of a bolted connection, taking into account: weakening of the section by the thread of the working part of the "rod", compliance of the threaded connection, gaps between the bolt and the flange wall, deformations of the nut and bolt head. Based on the results of a numerical experiment, a regression is proposed, which can be recommended for practical calculations.

**Keywords:** flange connection, bolts, prestressing, optimum force, bolt extension.

### Введение

При проектировании стыковых фланцевых соединений растянутых элементов строительных металлических конструкций [1] для обеспечения их неизменяемости (не превращения в механизм) при эксплуатации в болтах стыка создается начальное растягивающее усилие (усилие предварительного напряжения  $N_{pn}$  [2–4]). Обеспечение усилия затяжки прежде всего необходимо для надежной работы соединения (нераскрытия соединения [5–9]). Величина этого усилия должна быть близкой к оптимальной, позволяющей сохранить неизменяемость соединения при нагружении до достижения в нем расчетного усилия в стыкуемом элементе, близкого к несущей способности болта  $[N]_{bt}$  на растяжение [10]:

$$N_{pn}^{opt} = \frac{[N]_{bt}}{1+n},$$

где  $n$  – отношение жесткости стержня болта при растяжении ( $E_b A_b$ ) и условной жесткости неравномерно обжимаемой одним болтом зоны пакета фланцев ( $E_{pf} A_{pf}^*$ ), которое при  $E_b = E_{pf}$  и действии в болте только усилия предварительного напряжения можно представить в

$$\text{виде } n = \frac{A_b}{A_{pf}^*} = \frac{\Delta_{pf}^*}{\Delta_b};$$

$E_b$  – модуль упругости материала болта;

$A_b$  – площадь поперечного сечения стержня болта  $A_b = \pi d_b^2 / 4$ ;

$d_b$  – номинальный диаметр болта;

$E_{pf}$  – модуль упругости материала фланцев;

$A_{pf}^*$  – условная площадь сжатой одним болтом зоны пакета фланцев (определяемая по [11]);

$\Delta_b$  – абсолютное (действительное) удлинение рабочей части стержня болта;

$\Delta_{pf}^*$  – абсолютная деформация обжатия пакета фланцев в зоне от стенки отверстия до внешней грани гайки (или головки) болта (определяемая по [11]).

### Постановка задачи

Для определения оптимальной величины усилия предварительного напряжения высокопрочного болта необходимо знать действительную величину абсолютного удлинения ( $\Delta_b$ ) рабочей части «стержня» (диаметром  $d_b$  и длиной рабочей части  $l_b$ ), которая существенно больше величины, определяемой по традиционной (упрощенной) формуле:

$$\Delta_b^o = \frac{N_{pn} l_b}{E_b A_b}. \quad (1)$$

Она обусловлена рядом факторов (рис. 1), которые не учтены в (1):

- ослаблением сечения резьбой рабочей части «стержня» (от двух шагов резьбы до половины толщины фланца со стороны гайки [2, 3]);
- малой относительной длиной рабочей части «стержня» (как правило  $l_b / d_b < 4$ , [2]);
- податливостью резьбового соединения гайки с болтом;
- зазором между болтом и стенкой пакета фланцев;
- деформацией гайки и головки болта.

Целью данной работы является определение действительного удлинения болтового соединения с учетом выше перечисленных факторов.

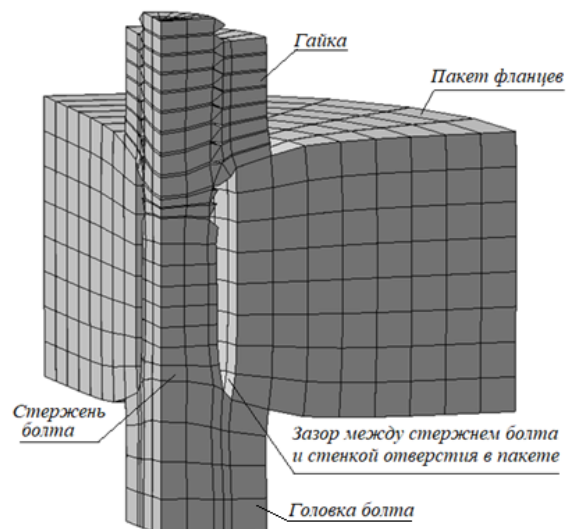


Рис. 1. Действительная схема деформирования фрагмента модели узла с предварительно напряженным болтом

### Методы исследования

Действительную величину абсолютного удлинения болта можно представить:

$$\Delta_b = k_{\Delta b} \Delta_b^o, \quad (2)$$

где  $k_{\Delta b}$  – коэффициент удлинения рабочей части стержня растянутого болта, определенный численным экспериментом.

Численное моделирование болтового соединения выполнялось методом конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе Лира-САПР. Расчетная модель каждого болта (включая и витки резьбы стержня болта и гайки) собрана из объемных восьмиузловых конечных элементов КЭ 36 (рис. 2), в которых узлы верхних граней

витков резьбы гайки и контактирующие с ними узлы нижних граней витков резьбы стержня объединены специальными (связевыми) конечными элементами КЭ55.

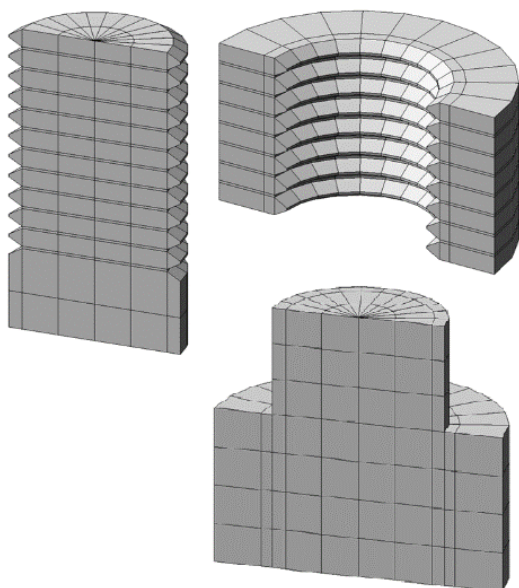


Рис. 2. Схема разбивки на конечные элементы стержня болта, гайки и головки болта

Расчетные модели нагружались растягивающим усилием 100 кН, приложенным к 48-ми узлам гайки и головки болта, контактирующими со смежными узлами пакета фланцев (рис. 3а). Для упрощения определения удлинения рабочей части стержня болта перемещения нагружаемых узлов в гранях гайки и головки болта по направлению оси болта объединены (рис. 3в).

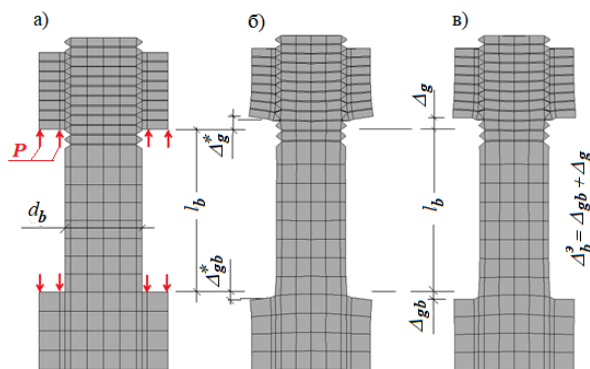


Рис. 3. Продольный разрез опытного болта с гайкой и схема разбивки сечения конечными элементами: а – до нагружения (со схемой приложения опытных нагрузок); б – действительная деформированная схема сечения болта; в – деформированная схема сечения расчетной модели болта

### Результаты исследования

Коэффициент удлинения рабочей части стержня растянутого болта определен численным экспериментом для болтов и гаек по [12, 13]

диаметром 20, 24, 30 и 36 мм с длиной рабочей части стержня 50 и 72 мм (см. табл. 1). При этом резьба принята крупной по [14], а для упрощения расчетной схемы модели ее внутренний диаметр совмещен с внутренним диаметром наружной резьбы по дну впадины. Наружные контуры гайки и головки болта (тоже для упрощения расчетной модели) приняты цилиндрическими, диаметр которых равен их размеру под ключ.

Определенные упрощенно по (1) и численным экспериментом (соответственно  $\Delta_b^o$  и  $\Delta_b^3$ ) абсолютные удлинения рабочей части стержня болта приведены в таблице 1. При этом коэффициент удлинения рабочей части стержня опытных болтов ( $k_{\Delta b}$ ) лежит в диапазоне от 1,288 до 1,695.

К основным параметрам, влияющим на удлинение «короткого» стержня болта при его растяжении относятся диаметр  $d_b$  и рабочая длина стержня болта  $l_b$ . К дополнительным: длина и размеры резьбы на рабочей части стержня болта, зазор между его стержнем и стенкой отверстия скрепляемого пакета, деформация головки и гайки болта и податливость резьбового соединения гайки со стержнем болта. Так как перечисленные дополнительные параметры влияния определяются основными (они зависят от диаметра и длины болта), то зависимость для определяемого коэффициента удобно представить в виде дробно степенной регрессии [15]

$$k_{\Delta b} = a \left( \frac{d_b}{l_b} \right)^b,$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты регрессии.

Для упрощения определения коэффициентов регрессии ее линеаризуем логарифмированием. Из решения переопределенной системы восьми неоднородных линейных уравнений, составленной из опытов для перечисленных в таблице 1 уровней основных параметров и при  $k_{\Delta b} = \Delta_b^3 / \Delta_b^o$  с использованием средств Mathcad, получаем коэффициенты регрессии  $a = 1,764$ ,  $b = 0,24$  и выражение для коэффициента удлинения рабочей части стержня растянутого болта

$$k_{\Delta b} = 1,764 \left( \frac{d_b}{l_b} \right)^{0,24} \text{ или } k_{\Delta b} = 1,8 \sqrt[4]{\frac{d_b}{l_b}}. \quad (3)$$

Вычисленные по (3) коэффициенты удлинения рабочей части опытных болтов, приведенные в нижней строке таблицы 1, свидетельствуют о хорошей сходимости их с экспериментальными значениями (отклонения составляют не более 2,5 %).

Таблица 1

Номинальные диаметры ( $d_b$ ) и рабочие длины ( $l_b$ ) опытных болтов, определенные по (1) ( $\Delta^{\circ}_b$ ), полученные экспериментально ( $\Delta^{\Delta}_b$ ) абсолютные удлинения болтов, экспериментальный ( $k^{\Delta}_b$ ) и определенный по предлагаемой регрессии ( $k^{m\Delta}_b$ ) коэффициенты удлинения рабочей части растянутых болтов

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$d_b$ , мм	20		24		30		36	
$l_b$ , мм	50	72	50	72	50	72	50	72
$\Delta_{об}$ , мкм	78,039	112,384	53,625	77,260	34,338	49,446	23,616	50,500
$\Delta_{эб}$ , мкм	111,338	144,808	80,907	104,462	53,100	70,127	40,040	34,007
$k_{\Delta b} = \Delta_{эб} / \Delta_{об}$	1,427	1,288	1,509	1,352	1,546	1,418	1,695	1,485
$k^{m\Delta}_b$	1,431	1,307	1,498	1,368	1,584	1,446	1,658	1,514

### Выводы

Установлено, что действительное удлинение болта существенно отличается от удлинения, определяемого по формуле упругой работы его материала (1). При этом коэффициент удлинения рабочей части стержня опытных болтов ( $k_{\Delta b}$ ) лежит в диапазоне от 1,288 до 1,695 и зависит от перечисленных выше «дополнительных»

факторов болтового соединения, которые необходимо учитывать при определении величины предварительного напряжения болтов.

Полученная в ходе эксперимента регрессия (3) показала хорошую сходимость с результатами опытов, поэтому может быть рекомендована для практических расчетов соединений с фланцами толщиной 25–36 мм.

### Список литературы

1. Рекомендации по расчету, проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций : утверждены 14.09.1988 ЦНИИПСК им. Мельникова 13.09.1988, ВНИПИ Промстальконструкция Минмонтажспецстроя СССР: дата введения 1988-09-13 ЦБНТИ. Минмонтажспецстроя. – 1989. – 54 с.
2. СТО НОСТРОЙ 2.10.76-2012. Болтовые соединения. Правила и контроль монтажа, требования к результатам работ. – М. : БСТ. 1013. – 36 с.
3. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. СНиП 3.03.01-87. – М. : Госстрой, ФАУ «ФЦС», 2013. – 299 с.
4. СП 294.1325800.2017. Конструкции стальные. Правила проектирования. – М. : Стандартинформ, 2017. – 167 с.
5. Гучинский Р. В. Расчет усилия контролируемой затяжки в групповом болтовом соединении / Р. В. Гучинский // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2020. – № 6. – С. 12–21. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-6-12-21.
6. Сыромятников В. С. Расчет болтового соединения при переменной нагрузке / В. С. Сыромятников, М. Гарсия, К. Самора, Р. Ортега // Известия высш. учеб. заведений. Машиностроение. – 2017. – № 11 (692). – С. 28–35.
7. Сон М. П. Фланцевые соединения в строительных конструкциях / М. П. Сон // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2018. – № 1. – С. 125–136.
8. Вдовенко Н. В. К вопросу об определении предельной несущей способности болтов во фланцевых соединениях изгибаемых конструкций / Н. В. Вдовенко // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 5–3 (59). – С. 23–28.
9. Couchaux M. Bolted circular flange connections under static bending moment and axial force / M. Couchaux // Journal of Constructional Steel Research. – June 2019. – P. 314–336.
10. Тишков Н. Л. Оптимальное усилие предварительного напряжения болтов во фланцевом стыке / Н. Л. Тишков, А. Н. Степаненко, А. В. Белов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2020. – № 1 (31). – С. 8–11.
11. Вольная Д. М. Экспериментальное определение местной жесткости пакета фланцев напрягаемым болтом / Д. М. Вольная, В. С. Золотарев, А. Н. Степаненко // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплекса : мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. – Хабаровск : Тихоокеан. гос. ун-т, 2019. – Вып. 19. – С. 41–45.
12. ГОСТ Р 52644-2006. Болты высокопрочные с шестигранной головкой с увеличенным размером под ключ для металлических конструкций. – М. : Стандартинформ, 2007. – 24 с.
13. ГОСТ Р 52645-2006. Гайки высокопрочные шестигранные с увеличенным размером под ключ для металлических конструкций. – М. : стандартинформ, 2007. – 20 с.
14. ГОСТ 24705-2004. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Основные размеры. – М. : Стандартинформ, 2005. – 19 с.
15. Гутер Р. С. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта / Р. С. Гутер, Б. В. Овчинский. – М. : Наука, 1970. – 432 с.

© Н. Л. Тишков, А. Н. Степаненко, А. В. Белов, А. А. Иодчик

### Ссылка для цитирования:

Тишков Н. Л., Степаненко А. Н., Белов А. В., Иодчик А. А. Действительное (абсолютное) удлинение растянутого болта // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2021. № 1 (35). С. 8–11.