

## КОМПЕНСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАГРУЗОК ВО ФЛАНЦЕВОМ РАЗЪЕМНОМ СОЕДИНЕНИИ

Г. В. Божко, В. В. Черемухин,  
И. В. Скопинцев

*Кафедра «Техника и технология полимерных материалов»,  
ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»,  
г. Москва, Россия; hiteta@npp.ru*

**Ключевые слова:** давление среды; детали фланцевого соединения; коэффициент термического расширения; крепежные элементы; температурная деформация силовая нагрузка; уплотнительный элемент.

**Аннотация:** Отмечено, что при проектировании герметичных фланцевых соединений учитывают влияние давление уплотняемой среды, снижение нагрузки на элементы соединения от времени в результате релаксации напряжения и колебания нагрузки, но практически не учитывается температурная нагрузка, возникающая в результате изменения температуры. Представлены методика подбора условий при проектировании фланцевого соединения, исключающих возникновение температурных нагрузок на элементы соединения и пример такой конструкции.

---

Широкое применение на практике получили разъемные фланцевые соединения, содержащие уплотнительный элемент (прокладку), уплотняемые фланцы, между которыми размещена прокладка, и крепежные болты (шпильки) при сборке соединения, нагружающие прокладку определенным усилием. Так как прокладка должна в процессе эксплуатации обеспечить заданную герметичность соединения, а крепежные болты и фланцы его прочность, то эти элементы соединения выполняют из различных по своим физико-механическим свойствам материалов. В процессе эксплуатации на элементы данных соединений действует давление уплотняемой среды; меняется их температура при изменении температуры уплотняемой среды (нагревание или охлаждение); первоначально созданная нагрузка на элементы соединения затяжкой крепежных деталей уменьшается с течением времени или за счет релаксации напряжений, или колебаний нагрузки (усталость материала).

Для учета влияния давления уплотняемой среды используют специальные силовые диаграммы [1]. Изменение температуры уплотняемой среды при расчетах соединений практически не учитывается. Однако при эксплуатации изменение температуры уплотняемой среды часто вызывает существенные проблемы из-за нарушения герметичности соединения. Заданная герметичность соединения, то есть допустимая в данных условиях эксплуатации величина утечки уплотняемой среды, обеспечивается в рабочих условиях определенной удельной нагрузкой  $[q]$ , МПа, на сопрягаемые с фланцами уплотняющие поверхности прокладки. В про-

цессе сборки соединения (при затяжке крепежных элементов заданной силой  $Q_3$ , Н) температура окружающей среды и, следовательно, температура элементов соединения принята обычно 20 °С. При увеличении температуры уплотняемой среды в условиях эксплуатации вследствие разности коэффициентов термического расширения материала прокладки и болтов нагрузка на элементы соединения увеличивается и может превысить допускаемую по условию прочности нагрузку на болты, и по условию герметичности – на прокладку.

При уменьшении температуры уплотняемой среды нагрузка на прокладку уменьшится. Но материал прокладки при сборке соединения с учетом частичной разгрузки от действия давления уплотняемой среды нагружается большей силой (близкой или равной пределу текучести материала прокладки), чем требуется для герметичности соединения. Поэтому при уменьшении нагрузки может возникнуть остаточная деформация материала прокладки. В данном случае для обеспечения герметичности соединения потребуется дополнительная подтяжка крепежных болтов, что в свою очередь увеличит на них нагрузку.

Фланцевое соединение представляет собой единый комплекс взаимосвязанных элементов (прокладки, фланцев, болтов). Поэтому при изменении нагрузки на отдельные элементы соединения температуры окажет влияние определенное сочетание податливостей его элементов. Данное изменение нагрузки можно представить графически (рис. 1):  $Q_6$ ,  $Q_{\Pi}$  – нагрузка соответственно на болты и прокладку, Н;  $[Q]$  – сила затяжки болтов, Н;  $t_3$  – температура, при которой затягивались болты, °С;  $\gamma_6$ ,  $\gamma_{\Pi}$  – углы наклона прямых зависимостей нагрузок на болты и прокладку соответственно от температуры, характеризующие интенсивность изменения нагрузки на них от температуры, °.

Интенсивность изменения нагрузки от температуры при нагревании соответственно для болтов и прокладки

$$\operatorname{tg} \gamma_6 = (Q_6 - Q_3) / (t_6 - t_3); \quad \operatorname{tg} \gamma_{\Pi} = (Q_{\Pi} - Q_3) / (t_{\Pi} - t_3).$$

Нагрузка на болты и прокладку в рабочих условиях

$$Q_6 = Q_3 + (1 - \alpha) Q_t; \quad Q_{\Pi} = Q_3 + \alpha Q_t,$$

где  $Q_t$  – температурная нагрузка на элементы соединения, Н;  $\alpha$  – коэффициент жесткости соединения, (безразмерная величина),

$$\alpha = \lambda_6 / (\lambda_6 + \lambda_{\Pi}),$$

где  $\lambda_6$  и  $\lambda_{\Pi}$  – осевые податливости соответственно болтов и прокладки, м/Н;

$$\lambda_6 = 4(L + 0,3d) / Z\pi d^2 E_6,$$

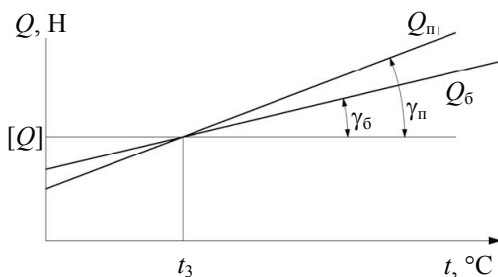


Рис. 1. Зависимость изменения нагрузки на прокладку и болты фланцевого соединения от температуры уплотняемой среды

где  $d$  – наружный диаметр болта, м;  $L$  – его расчетная длина между торцами гайки и головки, м;  $Z$  – число болтов в соединении;  $E_6$  – модуль упругости материала болтов, МПа,

$$\lambda_{\Pi} = h / \pi d_{\text{cp}} b E_{\Pi},$$

здесь  $h$  и  $d_{\text{cp}}$  – соответственно толщина и средний диаметр прокладки, м;  $b$  – ее ширина, м;  $E_{\Pi}$  – модуль упругости материала прокладки, МПа.

Для большинства материалов, применяемых для изготовления прокладок, модуль упругости не подчиняется принятому при расчетах закону Гука [2]. Значение деформации для них не линейно зависит от нагрузки. Поэтому при расчетах обычно используют усредненное значение модуля упругости между принятыми начальным и конечным значениями нагружения.

В применяемых на практике разъемных фланцевых соединениях болты и фланцы выполнены, как правило, из углеродистой стали, то есть имеют примерно одинаковые физико-механические свойства. Расчетная длина крепежных болтов (расстояние между торцами головки болта и гайки) – сумма толщин фланцев и прокладки. При изменении температуры фланцевого соединения изменение осевых размеров фланцев и болтов происходит практически на одну и ту же величину. Прокладка, выполненная из материала с повышенным коэффициентом термического расширения, при этом стремится к увеличению толщины, но, будучи сжатой в осевом направлении, увеличивает осевую нагрузку на элементы соединения. Следовательно, изменение нагрузки на элементы соединения происходит за счет разности осевой температурной деформации прокладки и участка болта, равного толщине прокладки. Это условие можно записать как

$$Q_t = h(\alpha_{\text{п}} - \alpha_{\text{б}})t/\lambda_{\text{п}}. \quad (1)$$

Согласно выражению (1), температурная нагрузка будет отсутствовать, если коэффициенты термического расширения материала прокладки и болтов будут одинаковы по величине. При значении  $\alpha_{\text{б}}$  большем, чем значение  $\alpha_{\text{п}}$ , повышение температуры уплотняемой среды приведет к снижению температурной нагрузки на элементы соединения. Выражение (1) получено при условии, что температура нагрева болтов и прокладки уплотняемой средой одинакова, что обеспечивается на практике внешней термоизоляцией фланцевого соединения. Применяют соединения и без термоизоляции. В данном случае температура болтов за счет потери тепла в окружающую среду будет ниже, чем температура прокладки. Установлено, что ее значение можно принять как  $0,9t$ , где  $t$  – температура уплотняемой среды. Величину температурной нагрузки на элементы соединения можно выразить следующей формулой

$$Q_t = ht(\alpha_{\text{п}} - 0,9\alpha_{\text{б}})t/\lambda_{\text{п}}.$$

Равенство коэффициентов термического расширения материала болтов и узла прокладки может быть достигнуто за счет создания узла прокладки, состоящего из последовательно размещенных прокладки и подобного ей промежуточного или вставного кольца определенной толщины  $h_{\text{в}}$ , выполненного из материала, значение коэффициента термического расширения которого меньше, чем значение его для материала прокладки и замыкающих ее деталей соединения.

Из условия равенства осевой деформации созданного узла прокладки и соответствующего его толщине длине болта  $h_{\text{б}}$  определим требуемую толщину промежуточного кольца. При  $h_{\text{б}} = h + h_{\text{в}}$ , где  $h$  и  $h_{\text{в}}$  – толщины уплотнительного элемента (прокладки) и промежуточного или вставного кольца соответственно

$$(h + h_{\text{в}}) \alpha_{\text{б}} = h\alpha_{\text{п}} + h_{\text{в}}\alpha_{\text{в}}, \quad (2)$$

используя выражение (2), получим

$$h_{\text{в}} = h(\alpha_{\text{п}} - \alpha_{\text{б}})/(\alpha_{\text{б}} - \alpha_{\text{в}}). \quad (3)$$

В качестве примера рассмотрим компенсацию температурной нагрузки для соединения с уплотнительным элементом толщиной  $h = 5$  мм, выполненного из алюминия марки АД-1. Коэффициент термического расширения алюминия  $\alpha_{\text{п}} = 23,7 \cdot 10^{-6}$  град.<sup>-1</sup>. Болты и фланцы изготовлены из углеродистой стали, коэф-

коэффициент термического расширения для которой  $\alpha_6 = 14,3 \cdot 10^{-6}$  град.<sup>-1</sup>. В качестве материала промежуточного кольца взято кварцевое стекло с коэффициентом термического расширения  $\alpha_в = 0,5 \cdot 10^{-6}$  град.<sup>-1</sup> [3]. По выражению (3) получим  $h_в = 3,4$  мм. Для соединения с алюминиевой прокладкой толщиной 5 мм установка промежуточного кольца из кварцевого стекла толщиной 3,4 мм полностью исключит температурную нагрузку, возникающую при изменении температуры уплотняемой среды. Более целесообразным представляется не установление толщины промежуточного кольца, выполненного из кварцевого стекла, а нахождение определенной толщины уплотнительного элемента при известной толщине промежуточной пластины. Его толщину можно определить по выражению

$$h = h_в(\alpha_6 - \alpha_в)/(\alpha_п - \alpha_6).$$

Применение кварцевого стекла в качестве материала промежуточного элемента вполне приемлемо из условия его прочности в условиях работы фланцевого разъемного соединения. Так, предел текучести алюминия 50 МПа, а предел прочности кварцевого стекла на сжатие 65 МПа [3]. Даже если в стекле при сборке соединения и появятся трещины, то это не отразится на герметичности соединения. Герметичность обеспечивается материалом уплотнительного элемента (прокладки). Так как промежуточный элемент не контактирует с уплотняемой средой, то можно использовать любой материал, значение коэффициента термического расширения которого меньше, чем материала прокладки и замыкающих ее элементов соединения. У технического фарфора коэффициент термического расширения в пределах температуры 20 ... 700 °С достигает значения  $(4,0 \dots 6,5)10^{-6}$  град.<sup>-1</sup>, а предел прочности его на сжатие – 26 ... 43 МПа; у керамики  $(8,0 \dots 12)10^{-6}$  град.<sup>-1</sup> и 50 ... 130 кПа соответственно.

Так как промежуточный элемент предназначен только для снижения температурной нагрузки на элементы фланцевого соединения, а соединение должно быть герметичным, то необходима специальная конструкция фланцевого соединения, в которой промежуточный элемент не контактирует с уплотняемой средой.

На рисунке 2 представлен один из возможных вариантов такой конструкции, которая обеспечит компенсацию температурной деформации элементов соединения. На внешнем контуре прокладки 1 выполнена кольцевая проточка, в которую вставлено кольцо 2 (или сегменты), коэффициент термического расширения материала которого  $\alpha_в < \alpha_6$ , град.<sup>-1</sup>. Геометрические параметры, представленные

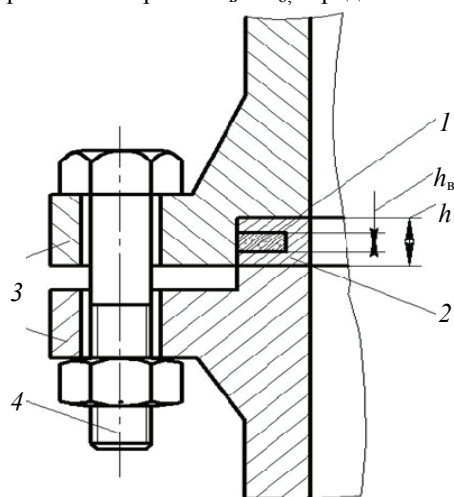


Рис. 2. Фланцевое соединение с комбинированной прокладкой

на рис. 2:  $h$  – толщина уплотнительного элемента, м;  $h_в$  – толщина вставного кольца или сегментов, м.

В представленной на рис. 2 конструкции фланцевого соединения промежуточный элемент, выполненный в виде вставного кольца из материала, значение коэффициента термического расширения которого меньше, чем у материала уплотнительного элемента и элементов 3 и 4, не контактирует с уплотняемой средой. Для компенсации температурных нагрузок необходимо только установить толщину вставного кольца (или сегментов).

Вывод выражения для определения требуемой толщины вставного кольца  $h_в$  для фланцевого соединения, представ-

ленного на рис. 2 подобен выводу выражения (2) и (3). Условие равенства деформации от температурной нагрузки прокладочного узла и соответствующего толщине длины участка болта

$$h\alpha_{\delta} = (h - h_{\text{в}})\alpha_{\text{п}} + h_{\text{в}}\alpha_{\text{в}}. \quad (4)$$

Из выражения (4) находим

$$h_{\text{в}} = h(\alpha_{\text{п}} - \alpha_{\delta}) / (\alpha_{\text{п}} - \alpha_{\text{в}}).$$

Использование представленного материала позволит создать конструкцию разъемного фланцевого соединения, работающего при колебаниях температуры рабочей среды, сохранить в условиях эксплуатации его герметичность и исключить малоцикловую нагрузку на элементы разъемного соединения.

#### *Список литературы*

1. Продан, В. Д. Герметичность оборудования : учеб. пособие / В. Д. Продан, Г. В. Божко. – М. : Ун-т машиностроения, 2014. – 109 с.
2. Божко, Г. В. Совершенствование герметичных разъемных соединений с уплотняющими элементами из материалов с зависящими от нагрузки физико-механическими свойствами : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.13 / Божко Григорий Вячеславович. – Тамбов : Тамб. гос. техн. университет, 2010. – 357 с.
3. Справочник машиностроителя : в 6 т. / под ред. Э. А. Сателя. – 3-е изд. – М. : Машиностроение, 1964. – Т. 6. – 540 с.

---

## **Compensation of Thermal Loads in Detachable Flange Connections**

**G. V. Bozhko, V. V. Cheryomukhin, I. V. Skopintsev**

*Department "Equipment and Technology of Polymeric Materials",  
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia; hitema@npp.ru*

**Keywords:** coefficient of thermal expansion; fasteners; medium pressure; parts of flange connection; power load; sealing element; temperature deformation.

**Abstract:** Design of sealed flange connections accounts for the effect of pressure of the sealing medium, reduction in the load on the parts of the connection with time caused by relaxation of stresses and vibrations of the load. However, the thermal load resulting from temperature changes is not taken into consideration. The article presents a methodology of selecting conditions in the design of flange connections eliminating the occurrence of thermal loads on the parts of the connection and an example of the design.

#### *References*

1. Prodan V.D., Bozhko G.V. *Germetichnost' oborudovaniya : uchebnoe posobie* [The tightness of the equipment: a tutorial], Moscow: Universitet mashinostroeniya, 2014, 109 p. (In Russ.)
2. Bozhko G.V. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov: TSTU, 2010, 357 p. (In Russ.)
3. Satel' E.A. *Spravochnik mashinostroitelya* [Manual Machinist], Moscow: Mashinostroenie, 1964, vol. 6, 540 p. (In Russ.)

## **Kompensation der Temperaturbelastungen in der lösbaren Flanschverbindung**

**Zusammenfassung:** Es ist bemerkt, dass bei der Projektierung der hermetischen Flanschverbindungen der Einfluss des Drucks der verdichteten Umgebung, die Senkung der Belastung auf die Elemente der Verbindung von der Zeit infolge der Relaxation der Anstrengung und der Schwingung der Belastung berücksichtigt werden, aber tatsächlich wird die Temperaturbelastung, die infolge der Veränderung der Temperatur entsteht, nicht berücksichtigt. Es ist die Methodik der Auswahl der Bedingungen bei der Projektierung der Flanschverbindung, die das Entstehen der Temperaturbelastungen auf die Elemente der Verbindung und das Beispiel solcher Konstruktion ausschließen, dargelegt.

---

## **Compensation des charges de température dans un assemblage mobile dissossiable**

**Résumé:** Est noté que lors de la conception des assemblages dissossiable on tient en compte l'influence de la pression du milieu à étancher, la réduction de la charge sur les éléments de l'assemblage du temps à la suite de la relaxation de la tension et de la fluctuation de la charge, mais on ne tient pratiquement pas compte de la charge de température qui surgit à la suite du changements de la température. Est présentée la méthode du choix des conditions lors de la conception des assemblages dissossiables, excluant l'apparition des charges de température sur les éléments de l'assemblage ainsi qu'un exemple d'une telle construction.

---

**Авторы:** *Божко Григорий Вячеславович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технология полимерных материалов»; *Черемухин Владимир Васильевич* – аспирант кафедры «Техника и технология полимерных материалов»; *Скопинец Игорь Викторович* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Техника и технология полимерных материалов», ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия.

**Рецензент:** *Лагуткин Михаил Георгиевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Аппаратурное оформление и автоматизация технологических производств», ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия.