

УПЛОТНЕНИЕ РАЗЪЕМНОГО СОЕДИНЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КАНАЛА ПРОТЕЧКИ

В. Д. Продан¹, Г. В. Божко¹, М. С. Фокина², Н. И. Воробьева¹

*Кафедра «Процессы и аппараты химической технологии»(1), hitema@npp-htm.ru,
Центр проектной деятельности (2),
ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия*

Ключевые слова: герметичность; каналы протечки; крепежные элементы; прокладка; прокладочный коэффициент; разъемные соединения; терморасширенный графит; уплотняющие поверхности; фланцы.

Аннотация: Рассмотрены виды разъемных неподвижных соединений с упругим и пластичным уплотнением, указаны их недостатки. Представлена новая конструкция уплотнительного узла для неподвижных и подвижных соединений, исключая данные недостатки. Герметичность конструкции обеспечивается за счет повышения гидравлического сопротивления канала протечки уплотняемой среды, имеющего сечение в виде равностороннего треугольника. Канал спирально размещен в зоне контакта уплотняющих поверхностей, вход и выход которого расположены по внутреннему и наружному диаметрам сопрягаемых поверхностей соответственно. Представлены выражения, позволяющие рассчитать предлагаемый тип соединения для реальных условий его применения.

Применяемые на практике разъемные неподвижные соединения уплотняют или поверхностями сопрягаемых деталей (беспрокладочные соединения), или прокладкой, выполненной из материала, твердость которого меньше, чем твердость уплотняемых поверхностей фланцев (прокладочные соединения).

Для беспрокладочных герметичных соединений требуется повышенная точность и чистота обработки сопрягаемых уплотняющих поверхностей и значительная нагрузка при сборке соединения крепежными деталями. Для прокладочных соединений нет необходимости в тщательной обработке уплотняемых поверхностей соединения, так как материал прокладки в процессе сборки соединения заполняет возможные зазоры между сопрягаемыми поверхностями уплотняемого разъема. Однако при колебаниях температуры рабочей среды вследствие различия значений коэффициента термического расширения материала прокладки и замыкающих ее деталей соединения возможно нарушение его герметичности.

Рассматриваемая конструкция уплотнительного узла свободна от этих недостатков и может быть использована для уплотнения разъемных соединений и неподвижных, и подвижных. Конструкция разъемного герметичного соединения, на полезную модель которой получен патент РФ [1], обеспечивает герметичность за счет повышения гидравлического сопротивления канала протечки уплотняемой

среды. В данных соединениях канал протечки может быть одним, спирально размещенным в зоне контакта уплотняющих поверхностей соединения, или таких каналов может быть несколько. Площадь сечения каналов выполняется относительно небольшой в виде равностороннего треугольника.

На рисунке 1 представлена конструктивная схема такого соединения. Вход и выход уплотняемой среды в канал осуществляются соответственно со стороны внутреннего d и внешнего D диаметров разъемного соединения. Для данного соединения требуемая осевая сила предварительной затяжки крепежных элементов Q_3 , Н, будет существенно меньше, чем для существующего фланцевого соединения, и равна осевой силе давления p рабочей среды на поверхность фланца l с учетом коэффициента жесткости соединения α [2]

$$Q_3 = 0,25\alpha p l d_{cp}^2 = 0,0625\alpha p l (D + d)^2;$$

$$\alpha = \lambda_{п} / (\lambda_{п} + \lambda_{б}),$$

где $\lambda_{п}$ и $\lambda_{б}$ – осевые податливости соответственно системы «прокладки» и «болта», то есть элементов разъемного герметичного соединения, которые соответственно разгружаются и нагружаются при увеличении давления уплотняемой среды, м/Н [2].

Осевая податливость уплотняемой зоны рассматриваемого соединения $\lambda_{п}$, м/Н,

$$\lambda_{п} = 1,02h / (nL_{cp}hE) = 1,02 / (nL_{cp}E), \quad (1)$$

где n – число витков канала протечки; L_{cp} – усредненная длина одной спирали канала протечки, м; h – ширина верхней стороны стенки канавки, м; E – модуль упругости материала уплотнительного элемента, Н/м².

Выражение (1) взято как обратное значение коэффициента жесткости конического элемента [3, с. 355]. Значение осевой податливости фланцевого соединения $\lambda_{б}$ можно определить из литературы [2, табл. 4.7 – 4.10].

Давление уплотняемой рабочей среды p , Н/м²,

$$p = \Delta p + p_{\text{вых}},$$

где Δp – потеря давления уплотняемой среды при движении ее в канале, Н/м²;

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2,$$

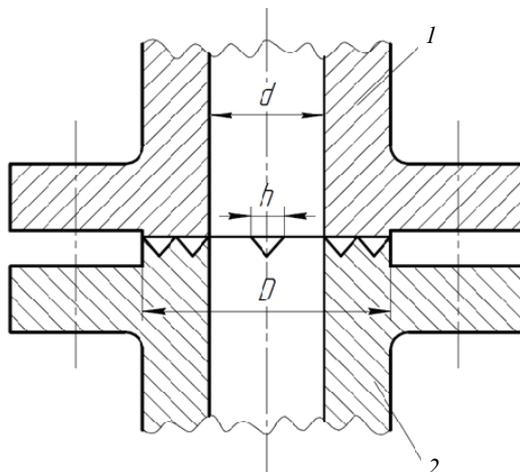


Рис. 1. Конструктивная схема уплотнительного узла разъемных соединений:
1, 2 – фланцы с гладкой уплотняющей поверхностью и с выполненным на его уплотняющей поверхности спиральным каналом протечки соответственно

где Δp_1 , Δp_2 – потери давления среды в результате трения о стенку канала и изменения направления движения и в результате местного сопротивления при входе среды в канал соответственно, Н/м².

Давление среды на выходе из канала протечки снижается за счет увеличения гидравлического сопротивления до $p_{\text{вых}}$. При движении среды в прямолинейном канале величина гидравлического сопротивления [4]

$$\Delta p_1 = \lambda_T L w^2 \rho / (2d_3), \quad (2)$$

где λ_T – безразмерный коэффициент трения, зависящий от шероховатости стенки канала и режима течения среды в канале; L – длина одной спирали канала протечки, м; w – значение скорости движения уплотняемой среды в канале, м/с; ρ – плотность уплотняемой среды, кг/м³; d_3 – эквивалентный диаметр для канала, отличного от круглого сечения, м. При ламинарном режиме течения ($Re < 2300$) λ_T не зависит от шероховатости стенки канала, а зависит от числа Рейнольдса. Так, для треугольного равностороннего сечения канала

$$\lambda_T = 53/Re;$$

$$Re = w d_3 \rho / \mu,$$

где μ – коэффициент динамической вязкости среды, Па · с.

Значение скорости движения среды w для канала сечением в виде равностороннего треугольника можно определить из заданного значения ее протечки V , м³/с, в канале и площади f сечения канала, м².

Для сечения канала в виде равностороннего треугольника со стороной h , м,

$$f = 0,433h^2,$$

тогда

$$w = V/f = V/(0,433h^2). \quad (3)$$

Эквивалентный диаметр для канала, отличного от круглого сечения определяется по выражению:

$$d_3 = 4f/P,$$

где P – периметр, м, и равен

$$d_3 = 4 \cdot 0,433h^2 / (3h) = 0,577h.$$

Полное сопротивление канала

$$\Delta p = 0,25w^2 \rho + \lambda_T L w^2 \rho / (2d_3). \quad (4)$$

При криволинейном движении среды в канале сопротивление ее движению будет больше, чем при прямолинейном, в Φ раз [4]

$$\Phi = 1 + d_3/D_{\text{ср}},$$

где $D_{\text{ср}}$ – средний радиус уплотняющей поверхности соединения, м.

Учитывая, что радиус кривизны канала протечки переменный и зависит от значения текущего радиуса уплотнительного кольца, расчеты следует вести по $D_{\text{ср}}$.

Длина одной спирали канала

$$L_1 = 0,5 \pi (D + d). \quad (5)$$

Число ветвей одиночного канала на уплотняющей поверхности соединения есть отношение ширины контакта поверхностей к стороне треугольника

$$n = 0,5(D - d)/h. \quad (6)$$

Общая длина одиночного канала протечки с учетом выражений (5) и (6) определяется по выражению

$$L = nL_1 = 0,25\pi (D^2 - d^2)/h. \quad (7)$$

Используя выражение (7), получим ширину уплотняющей поверхности соединения, занятую спиральной канавкой:

$$0,5(D - d) = hn.$$

Для определения давления среды на выходе из канала протечки воспользуемся законом Пуазейля [5].

Объемный расход протечки уплотняемой среды на выходе из одиночного канала V , м³/с, определяется по выражению

$$V = \pi p_{\text{вых}} (d_3/2)^4 / (8 \mu L). \quad (8)$$

Если уплотнительный узел имеет i каналов протечки, то расчетное значение объемной протечки через каждый канал уплотнения

$$V_1 = V/i.$$

Из выражения (8) определим $p_{\text{вых}}$, Па,

$$p_{\text{вых}} = 8V\mu L / (\pi (d_3/2)^4) = 128V\mu L / (\pi d_3^4).$$

Представленные расчетные выражения дают возможность рассчитать предлагаемый тип соединения для реальных условий его применения.

Рассмотренное уплотнение может быть использовано для герметизации рабочих сред с повышенной вязкостью (для жидкости) при относительно небольшом ее давлении; разъемных соединений, на уплотняющих поверхностях которых возможно разместить заданную длину канала протечки, например, для барабанных аппаратов. Данный тип уплотнения можно применить в подвижных соединениях с торцевым уплотнением. Канавка спирально выполняется на уплотняющей поверхности аксиально-подвижного кольца по направлению его вращения. В таком исполнении создаваемое вращающимися стенками спиральных канавок давление уплотняемой среды создаст дополнительное гидравлическое сопротивление протекающей по каналу среде, что может полностью исключить ее протечку при работе торцевого уплотнения [6]. В данном случае целесообразно использовать уплотнение с несколькими канавками протечки. Отличие такого соединения от рассмотренного выше неподвижного герметичного соединения заключается в том, что вход в каналы сопротивления осуществляется со стороны наружного диаметра D вращающегося аксиально-подвижного кольца, а выход – со стороны внутреннего диаметра d .

Список литературы

1. Пат. на полезную модель 197904 Российская Федерация, МПК F16L 23/028, F16J 15/04, F16J 15/48. Герметичное разъемное соединение / В. Д. Продан, Г. В. Божко, А. С. Михальченко, И. В. Скопинцев, М. С. Фокина. – № 2019141605 ; заявл. 16.12.2019 ; опубл. 04.06.2020, Бюл. № 16. – 5 с.
2. Продан, В. Д. Герметичность разъемных соединений оборудования, эксплуатируемого под давлением рабочей среды : учеб. пособие / В. Д. Продан. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 280 с.
3. Справочник машиностроителя в 6 томах. Т. 3 / Под ред. С. В. Серенсена. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Машгиз, 1962. – 651 с.

4. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учеб. пособие / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – 9-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1981. – 560 с.

5. Политехнический словарь / Гл. ред. И. И. Артоболевский. – М. : Изд-во «Советская энциклопедия», 1977. – 608 с.

6. Продан, В. Д. Герметичность оборудования : учеб. пособие / В. Д. Продан, Г. В. Божко. – М. : Университет машиностроения, 2014. – 109 с.

Detachable Joint Sealing Based on Leakage Duct Hydraulic Resistance

V. D. Prodan¹, G. V. Bozhko¹, M. S. Fokina², N. I. Vorobyova¹

*Department of Processes and Devices of Chemical Technology (1),
hitema@npp-htm.ru; Project Work Center (2),
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia*

Keywords: tightness; leakage channels; fasteners; gasket; spacer factor; detachable connections; thermally expanded graphite; sealing surfaces; flanges.

Abstract: The types of detachable fixed joints with elastic and plastic sealing are considered, their disadvantages are indicated. A new design of the sealing unit for fixed and movable joints is presented, eliminating these disadvantages. The tightness of the structure is ensured by increasing the hydraulic resistance of the leakage channel of the sealed medium, which has a cross-section in the form of an equilateral triangle. The channel is spirally placed in the contact zone of the sealing surfaces, the inlet and outlet of which are located along the inner and outer diameters of the mating surfaces, respectively. Expressions for calculation of the proposed type of joints for real conditions of its use are presented.

References

1. Prodan V.D., Bozhko G.V., Mikhal'chenko A.S., Skopintsev I.V., Fokina M.S. *Germetichnoye raz'yemnoye soyedineniye* [Sealed detachable connection], Russian Federation, 2020, Patent for utility model 197904. (In Russ.)

2. Prodan V.D. *Germetichnost' raz'yemnykh soyedineniy oborudovaniya, ekspluati-ruyemogo pod davleniyem rabochey sredy: uchebnoye posobiye* [Tightness of detachable joints of equipment operated under pressure of the working environment: a tutorial], Tambov: Izdatel'stvo FGBOU VPO "TGTU", 2012, 280 p. (In Russ.)

3. Serensen S.V. [Ed.] *Spravochnik mashinostroitel'ya v 6 tomakh. T. 3* [Handbook of a mechanical engineer in 6 volumes. Vol. 3], Moscow: Mashgiz, 1962, 651 p. (In Russ.)

4. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. *Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii: uchebnoye posobiye* [Examples and tasks for the course of processes and apparatuses of chemical technology: a tutorial], Leningrad: Khimiya, 1981, 560 p. (In Russ.)

5. Artobolevskiy I.I. [Ed.] *Politekhnicheskiy slovar'* [Polytechnic Dictionary], Moscow: Izdatel'stvo "Sovetskaya entsiklopediya", 1977, 608 p. (In Russ.)

6. Prodan V.D., Bozhko G.V. *Germetichnost' oborudovaniya: uchebnoye posobiye* [Leakage of equipment: a tutorial], Moscow: Universitet mashinostroyeniya, 2014, 109 p. (In Russ.)

Abdichtung der Steckverbindung auf der Grundlage des hydraulischen Widerstands des Kanals des Dichtungsverlustes

Zusammenfassung: Es sind die Arten von abnehmbaren festen Verbindungen mit elastischer und plastischer Abdichtung betrachtet, ihre Nachteile sind angegeben. Um diese Nachteile zu beseitigen, ist eine neue Konstruktion der Dichtungseinheit für feste und bewegliche Verbindungen vorgestellt. Die Dichtheit der Struktur wird durch Erhöhen des hydraulischen Widerstands des Kanals des Dichtungsverlustes des eingedichteten Mediums sichergestellt, das einen Querschnitt in Form eines gleichseitigen Dreiecks aufweist. Der Kanal ist spiralförmig in der Kontaktzone der Dichtflächen angeordnet, deren Einlass und Auslass sich entlang des Innen- bzw. Außendurchmessers der Passflächen befinden. Es sind Ausdrücke dargestellt, mit denen der vorgeschlagene Verbindungstyp für die tatsächlichen Verwendungsbedingungen berechnet werden kann.

Consolidation du joint d'étanchéité à la base de la résistance hydraulique du canal de fuite

Résumé: Sont examinés les types des connexions fixes séparables avec un joint élastique et plastique; sont indiqués leurs inconvénients. Est présentée une nouvelle conception de l'ensemble d'étanchéité pour les joints fixes et mobiles éliminant ces inconvénients. L'étanchéité de la structure est assurée par une augmentation de la résistance hydraulique du canal de fuite du milieu d'étanchéité ayant une section transversale sous la forme d'un triangle équilatéral. Le canal est placé en spirale dans la zone de contact des surfaces d'étanchéité dont l'entrée et la sortie sont respectivement situées le long des diamètres intérieur et extérieur des surfaces d'accouplement. Sont présentées des indications permettant de calculer le type du composé proposé pour les conditions réelles de son application.

Авторы: **Продан Василий Дмитриевич** – доктор технических наук, профессор; **Божко Григорий Вячеславович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химической технологии»; **Фокина Мария Сергеевна** – кандидат технических наук, доцент Центра проектной деятельности; **Воробьева Наталья Ивановна** – старший преподаватель кафедры «Процессы и аппараты химической технологии», ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия.

Рецензент: **Першин Владимир Федорович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.