

## К вопросу определения количественной оценки проницаемости ТОКОВОДОВ

Лазаревский Н.А.  
Тепляков М.В.

На основе рассмотренных ранее механизмов проницаемости конструкций токовводов предложена последовательность расчёта объёмных протечек через элементы конструкций и границы сопряжения элементов токовводов.

Возможные пути проницаемости токовводов при их установке в прочные конструкции рассмотрены в [3]. Там же приведены характеристики основных материалов, применяемых при их изготовлении и монтаже.

При действии перепада давлений с одной и другой сторон оболочки для неподвижных соединений по отдельным путям – капиллярам ( $i$ ) возникают утечки  $Q_i$ , суммарное значение которых можно оценить по упрощённой схеме.

Детализацию дальнейшего учёта многообразных требований и для проведения количественных оценок проницаемости конструкций токовводов предлагается выполнить на основе известных математических зависимостей на основе схемы замещения рис.1.

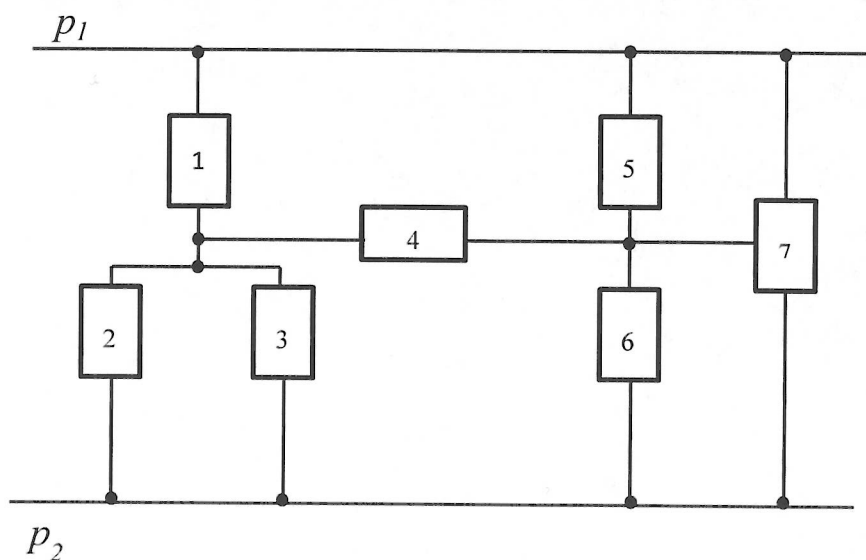


Рис. 1. Схема замещения для конструкции токоввода при расчёте проницаемости, где:

$p_1$  и  $p_2$  давления среды с разных сторон оболочки,

1 – каналы проницаемости в массиве изолятора (зависит от структуры материала),

2, 3 – микроканалы по границам металл-изолятор,

4 - канал проницаемости, определяемый слоистостью прессматериала и границами в поперечной плоскости,

5, 6 – проницаемость резиновых уплотнений (2 кольца),

7 – проницаемость, обеспечиваемая различного рода механическими дефектами и включениями по границам контактирования различных материалов.

Кроме того имеет место контактная диффузия среды. На основе математического выражения для определения расхода среды через зазор [1], применив его для расчёта  $Q_i$  в каждом  $i$ -том канале общую утечку можно определить на основании выражения

$$Q = \Psi_x \frac{B \Delta p}{l \mu} R_z^3 \quad (1),$$

где  $Q$  расход среды через канал проницаемости,  $\Psi_x$  коэффициент формы, характеризующий проводимость микроканалов, и является безразмерной функцией состояния поверхности: параметра  $R_z$  – чистота обработки поверхности, зависящая от угла профиля режущей части обрабатывающего инструмента, направления следов обработки, упругих свойств материалов, коэффициентов Пуассона, контактного давления при механообработке; вязкость среды  $\mu$ ,  $\Delta p$  - разность давлений  $p_1$  и  $p_2$ ,  $B$  – периметр уплотнения,  $l$  - длина уплотнения.

$$\Psi_x = 1/12 \sum^n \eta_i (\bar{B}_i / \bar{l}_i) \bar{\delta}_i^3 \quad (2)$$

Это выражение для коэффициента  $\Psi_x$  учитывает наличие микроканалов, образованных регулярными следами механической обработки ( $\Psi_p$ ) и влияние на проницаемость случайных дефектов поверхности – рисок,

раковин, пор, частиц загрязнений ( $\Psi_g$ ) см. [1]. В этом выражении  $\bar{B}_i$ ,  $\bar{l}_i$ ,  $\bar{\delta}_i$  – средние значения ширины, длины и высоты  $i$ -той щели (микроканала),  $\sum^n \eta_i$  суммарное количество щелей.

$$\Psi_x = \Psi_p + \Psi_g \quad (3)$$

Сближение контактирующих поверхностей под действием давления  $p_k$  при сборке конструкции происходит в три этапа:

- внедрение самых больших выступов в сопредельный материал;
- заполнение регулярных микровпадин;
- заполнение впадин дефектов.

Основное влияние на формирование микроканалов и герметичность соединения оказывает второй этап, для которого можно вычислить размеры сечений микроканалов  $B_i$  и  $\delta_i$  в зависимости от  $p_k$  для упрощённых моделей [1]. Сближение поверхностей контакта под действием давления  $p_k$  (без учёта дефектов) достаточно хорошо изучено Н.Б. Демкиным, Э.В. Рыжовым и др. [4]. По рекомендации этих авторов при установке уплотнений должно быть обеспечено давление  $p_k$ , при котором регулярные микроканалы полностью перекрыты и  $\Psi_p = 0$ . Для эластомерных колец и прокладок

$$\Psi_p = \Psi_o e^{-3P_k/(kE)} \quad (4),$$

где  $\Psi_o$  и  $k$  коэффициенты, зависящие от качества обработанной поверхности [2].

Из опыта эксплуатации уплотнений механизмов и корпусных конструкций известно, что для резин с модулем  $E = 7 \div 12$  МПа в конце срока службы необходимо иметь  $p_k \geq 0,25$  Мпа, поэтому при монтаже нового уплотнения следует обеспечить  $p_k = 1,5 \div 3$  МПа. Для металлических прокладок необходимы значительно большие давления в МПа: от  $50 \div 60$  (для свинца), до  $500 \div 600$  (для высоколегированных сталей).

Характерная высота микроканалов  $B_i$  имеет порядка долей микрона, ширина  $\delta_i$  – сотен микрон, длина имеет порядок ширины уплотнения  $l_i$  (для металлических прокладок – ширина прокладки, для эластомерных колец –

несколько меньше диаметра кольца). Если в уравнении (1) учесть зависимость размеров зазоров и ширины микроканалов от контактного давления, получим уравнение для расчёта утечки, м<sup>3</sup>/с,

$$Q = \Psi_0 \frac{B \Delta P}{l \mu} R_z^3 e^{-3P_k/kE} \quad (5)$$

где  $k = 0,1 \div 0,3$  ориентировочно.

Из этого уравнения следует, что при повышении  $p_k$  до  $kE$  утечки уменьшатся примерно на два порядка, т.к.  $e^{-3} = 5 \cdot 10^{-2}$ . Поэтому необходимо искать конструктивные решения, при которых с повышением давления среды  $p$  - соответственно повышается контактное давление  $p_k$ , т.е. обязательно использовать свойство конструкции самоуплотняться. Способность к самоуплотнению характерна для уплотнений с эластомерными кольцами, устанавливаемыми в замкнутые канавки, а также применительно к конструкциям токовводов и сальниковых уплотнений работающих с резиновым чехлом или уплотнителем конической формы.

При установке кольца диаметром  $d$  в канавку высотой  $H$  в результате сжатия на уплотняемых поверхностях шириной  $l_0$  возникает начальное давление  $p_k = p_{k0}$ . При давлении среды  $p$  материал кольца ведёт себя подобно очень вязкой жидкости передавая давление  $p$  на стенки. Уплотнение ведёт себя подобно системе с обратной связью по давлению, поэтому на уплотняемых поверхностях создаётся давление, близкое к сумме  $p_k = p_{k0} + Sp$ , где  $S$  – коэффициент передачи давления (для эластомерных колец  $S = 0,9 - 0,98$ ). Таким образом, при правильной установке кольца в закрытую канавку давление  $p_k$  автоматически увеличивается при увеличении давления среды  $p$ , причём  $p_k > p$ . При этом герметичность улучшается, так как множитель  $e^{-3P_k/(kE)}$  уменьшается, см. уравнение (5). Для пассивных уплотнений – неметаллических прокладок без канавок и лабиринта, поджимаемых резьбовыми элементами – способность к самоуплотнению не характерна, и согласно данным [1] при некотором критическом давлении среды происходит разуплотнение, т. е. прокладку выдавливает из зазора. Однако

для варианта, представленного в [3] на рис.1 с металлической прокладкой (в целом уплотнение такого вида называется комплексным), и для давлений среды, в которой применяются токовводы в судостроении, такой случай разгерметизации практически невозможен, тем более что по рассматриваемому рисунку действие сил давления направлено в сторону, замкнутую корпусом.

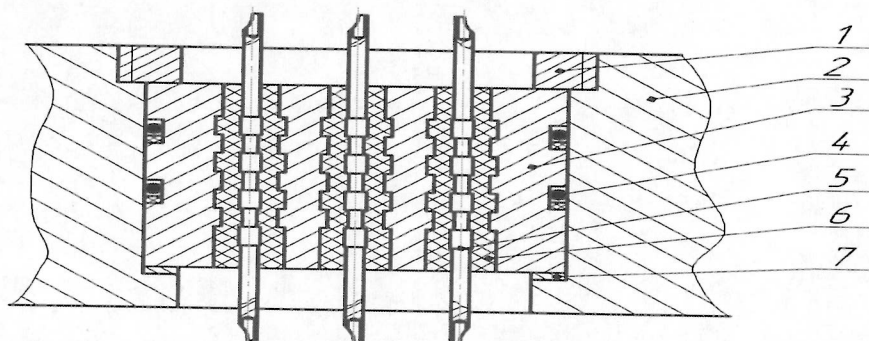


Рис. 2. 1 – прижимная гайка; 2 – корпус, оболочка; 3 – втулка токоввода; 4 – эластомерные кольца уплотнения; 5 – токопроводящие стержни; 6 – электроизоляционный герметизирующий материал; 7 – прокладка из мягкого металла.

Размеры дефектов превышают размеры регулярных микронеровностей, причём дефекты располагаются совершенно случайным образом. Для заполнения их уплотнителем необходимо большее контактное давление, однако и при этом они могут остаться незаполненными. Математическое описание процесса  $Q(p_k)$  по дефектам можно создать только на основе статистических данных. Частота появления дефектов, при прочих равных условиях, пропорциональна периметру уплотнения  $B$ , а их влияние на герметичность обратно пропорциональна ширине уплотнения  $l$ , поэтому роль дефектов малых размеров ( $\delta_i < 0,05$ ) можно учесть функцией  $\Psi_g$ . Роль более крупных дефектов (сквозных рисок с размерами  $B_0, \delta$ ) учитывают по вероятности их наличия на единице периметра уплотнения  $B$ . В уравнение (1) подставляют функцию  $\Psi_x = \Psi_0 e^{-3pk/kE} + \Psi_g$ , которая при  $P_k > kE$  стремится к величине

$$\Psi_{\sigma} = 1/12 \Sigma \frac{B_g}{B} \left( \frac{\delta_g}{R_z} \right)^3 \quad (6)$$

Например, при среднестатистическом наличии сквозных рисок на периметре  $B = 100$  мм;  $Z_1 = 1$  ( $\delta_1 = 0,05$  мм;  $B_1 = 0,1$  мм) и  $Z_2 = 10$  ( $\delta_2 = 0,02$  мм;  $B_2 = 0,01$  мм) для  $R_z = 0,01$  мм и  $l_i \approx l$  получим  $\Psi_g \approx 10^{-2}$ .

Дефекты являются основной причиной негерметичности уплотнений неподвижных соединений. Кроме рисок, раковин и подобных дефектов механического происхождения большую роль играют загрязнения на поверхностях уплотнителя и посадочных мест (волокна растительного происхождения, стружка – аналогичны крупным сквозным рискам). Однако на практике иногда применяют не комплексное уплотнение в неподвижном соединении, как это изображено на рис.2, а только один вид уплотнения – эластомерными кольцами, то в этом случае присутствуют ещё такие механизмы газопроницаемости как диффузионное проникновение через эластомер – кольца и проницаемость по контактным поверхностям уплотнения. Если в пассивном уплотнении применяют прокладку из неметаллического материала, допустим из полиамида, то следует учитывать и газопроницаемость этого конкретного материала. По границе оболочки и втулки токоввода в обеспечении герметизации участвуют наряду с прокладкой 7 эластомерные кольца 4 (см. рис.2). В этом случае в качестве ещё одного механизма проницаемости рассматривают проницаемость по контактной поверхности уплотнений.

Область контакта уплотнителя (эластомерные кольца, прокладки из эластомеров и металла) с уплотняемой поверхностью отличается неоднородностью структуры. В ней нет полной сплошности, свойственной материалам корпуса и втулки, и можно выделить участки контакта поверхностных плёнок, пустоты, участки контакта уплотнителя и уплотняемой поверхности.

Механизм контактной диффузии сложен и количественно не изучен. Однако практически при любых экспериментах по определению

коэффициента диффузии неявно находят контактную проницаемость по периметру уплотнителей.

Для расчёта контактной диффузии в основное уравнение расчёта диффузионного проникновения среды

$$Q_{ms} = \Psi_s \frac{dc}{dx} S \approx \Psi_s \frac{\Delta c}{l} S \quad (7)$$

введём поправки:

- высота зоны контакта примерно равна параметру шероховатости (чистота обработки)  $R_z$ , поэтому  $S = BR_z$ ;
- с учётом пустот в области контакта толщина её составит  $k_1 l$  ( $k_1 < 1$ );
- вследствие более рыхлой структуры поверхностных плёнок коэффициент  $\Psi_{sk} = k \Psi_s$ .

Тогда массовый расход и удельная проницаемость определяются по следующим выражениям

$$Q_{msk} = k \Psi_s \frac{\Delta c B R_z}{k_1 l};$$

$$\bar{Q}_{sk} = \frac{Q_{sk}}{\rho} = k \Psi_s \frac{q_p}{k_1 l} \quad (8)$$

то есть утечки вследствие контактной диффузии пропорциональны периметру уплотнения, что полностью соответствует теории Рейнольдса.

Проницаемость по зонам 2, 3 и 4 следует рассматривать в зависимости от технологии изготовления втулки с токовводами. Принципиально всё можно свести к двум схемам:

- обеспечение адгезионной составляющей, обеспечивающей герметичность на границах втулка – герметик и токопроводящий стержень – герметик;
- обеспечение герметичности по месту разъёма конструкции с помощью эластомерных колец (динамическое уплотнение).

Учитывая тот факт, что токопроводящие стержни, как правило, имеют небольшие диаметры, то подобрать кольца или другие эластомерные уплотнения, практически, невозможно и они не выпускаются промышленностью. Также чистовая обработка металлических изделий с канавками при малых диаметрах и большой длине отверстий чрезвычайно затруднительна. Поэтому вариант активного уплотнения в этих зонах специально не рассматривается. Дополнительные трудности для реализации динамического уплотнения токопроводящих стержней накладывает требование заказчиков по увеличению плотности контактов на единицу занимаемой площади.

Рассмотрим механизм газопроницаемости зоны 3 – электроизоляционного герметизирующего материала, находящегося между поверхностью электрического контакта и поверхностью отверстия во втулке, с учётом того, что механизм утечек по границам нами рассмотрен выше. Для этой зоны характерен механизм диффузионного проникновения среды. То есть негерметичность вследствие диффузии в той или иной степени присуща всем уплотнениям. Диффузия (взаимное проникновение двух или нескольких соприкасающихся веществ) обусловлена разностью концентраций  $C$  одного вещества в другом. Диффузию среды через диафрагму подразделяют на следующие стадии:

- поглощение газа (жидкости) уплотнителем – сорбция (коэффициент сорбции  $\alpha_1$ , м/с);
- диффузия среды через перегородку (коэффициент диффузии  $D_p$ , м<sup>2</sup>/с);
- выделение (десорбция среды с другой стороны уплотнителя (коэффициент  $\alpha_2$ , м/с).

При стационарном процессе, т.е. при установившейся разности давлений на основании первого закона Фика, определяющего пропорциональность диффузионного потока частиц градиенту их концентрации, через перегородку толщиной  $l$  и площадью  $S$ , массовый  $Q_{ms}$ ,

кг/с, и объёмный  $Q_s$ , м<sup>3</sup>/с, расходы среды пропорциональны градиенту концентрации  $dC/dx \approx \Delta C/l$ :

$$\text{массовый расход среды} \quad Q_{ms} = \Psi_s \frac{dc}{dx} s \approx \Psi_s \frac{\Delta c}{l} s \quad (9),$$

а объёмный расход среды учитывается в соответствии с выражением:

$$Q_s = \Psi_s \frac{q_p s}{l} \quad (10)$$

где  $\Psi_s = \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{D_p} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1}$  функция проницаемости, м<sup>2</sup>/с;  $q_p$  – степень набухания – относительное содержание среды в материале уплотнителя, определяемое по кинетическим кривым набухания  $q(t)$ . Расходы  $Q_{ms}$  и  $Q_s$  всегда присутствуют, но они чрезвычайно малы по сравнению с другими видами утечек.

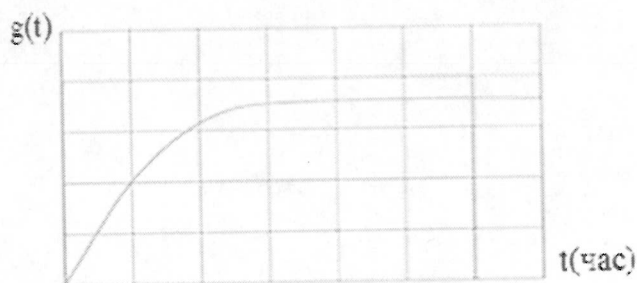


Рис. 3. Типовая кинетическая кривая набухания полимеров.

Степень набухания можно определить только у ограниченно набухающих полимеров, так как в противном случае полимер начинает растворяться, и масса образца уменьшается. Степень набухания меняется во времени и обычно выражается кривой, вид которой представлен на рис. 3.

Характер кривой показывает, что, начиная с определенного времени, степень набухания не изменяется и эта величина называется равновесной степенью набухания.

### Выводы

1. Наибольшая объёмная величина среды, проникающей из одной области в смежную через конструкцию токоввода, определяется дефектами и неровностями, связанными с механообработкой контактирующих

поверхностей, а также с технологическими приёмами сборки и монтажа конструкций;

2. Второе место по объёмным показателям в переходе среды обеспечивает механизм диффузионного проникновения. Диффузия (взаимное проникновение двух или нескольких соприкасающихся веществ) обусловлена разностью концентраций. Задержка во времени от начала воздействия давления среды до начала обнаружения среды на противоположной стороне оболочки, объясняется скоростью диффузии среды (сорбции и последующей десорбции составляющих среды). На практике это подтверждается периодическим выходом из строя токовводов в клапанах воздуха высокого давления и неоднократной за период службы конструкций заменой эластомерных колец.

#### Список литературы

1. Уплотнения и уплотнительная техника. Справочник. Под общей редакцией А.И.Голубева и Л.А.Кондакова. Москва «Машиностроение» 1996, с.32-116.
2. Bussemaker E.J., Hirs G.G. Viscoseals for free surface sodium pumps. 5-th International Conference on Fluid Sealing, BHRA, England, 1978. 37 p.
3. О механизмах проницаемости токовводов. Лазаревский Н.А., Тепляков М.В. Судостроение, 6, 2012
4. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхностей и контакт деталей машин. 1981 г., 224 с., Москва, Машиностроение.