

УДК 621.9.015

DOI:10.30987/2223-4608-2021-5-19-34

**И.В. Ерёманкова**, к.т.н.

(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1)

E-mail: kseo@list.ru

## **Технология обеспечения герметичности неподвижных разъёмных металлических соединений по двухступенчатой схеме конструкторско-технологической подготовки производства**

*Приведена технология решения задачи обеспечения герметичности неподвижных разъёмных металлических соединений при двухступенчатой схеме организации конструкторско-технологической подготовки производства. Технология обеспечения герметичности основывается на: установленных теоретических и эмпирических зависимостях герметичности от конструктивных факторов и качества герметизирующих поверхностей; полученных табличных данных по возможностям методов обработки в обеспечении параметров качества поверхностей герметизирующих соединений, изготавливаемых из коррозионностойкой стали марки 08Х18Н10Т, а также полученных эмпирических зависимостей параметров качества поверхностного слоя от режимов обработки.*

**Ключевые слова:** эксплуатационное свойство; конструкторско-технологическая подготовка производства; технология обеспечения герметичности; герметичность; технологическое обеспечение; качество поверхностного слоя деталей машин.

**I.V. Eryomenkova**, Can. Sc. Tech.

(Bauman State Technical University of Moscow, Building 1, 5, 2-d Baumanskaya Str., Moscow, 105005)

## **Technology to ensure impermeability in fixed split metal joints according to two-stage circuit of design-technological pre-production**

*A technology for the solution of the problem in ensuring impermeability of fixed split metal joints at two-stage circuit of the design-technological organization in pre-production is carried out. The technology for impermeability support is based on the defined theoretical and empirical dependences of impermeability upon design factors and quality of sealing surfaces; upon table data obtained on potentialities of the processing methods in quality parameter assurance of the surfaces in sealing joints made of corrosion-resistance 08H18H10T steel, and also obtained empirical dependences of surface layer quality parameters upon processing modes.*

**Keywords:** operation property; design-technological pre-production; technology for impermeability support; impermeability; technological support; surface layer quality in machinery.

На стадии конструкторско-технологической подготовки производства осуществляется обеспечение заданных служебным назначением эксплуатационных свойств изделий и их соединений. В зависимости от типа, структуры организации производства и профессиональной подготовки специалистов обеспечение эксплуатационных свойств организуется по двум схемам. Наиболее распространенной

схемой является двухступенчатая схема организации конструкторско-технологической подготовки производства (рис. 1, рис. 2), заключающаяся в условиях классического разделения функций и решаемых задач между разными специалистами (специализации). Основное распределение функций и решаемых задач при этой схеме осуществляется между конструктором и технологом.

При обеспечении герметичности соединений по двухступенчатой схеме организации подготовки производства [1 – 5], конструктор осуществляет выбор конструкторских и технических решений (материал; твёрдость; кон-

струкция; геометрическая форма; параметры точности; качество поверхностного слоя), обеспечивающих заданные служебным назначением величины необходимой и достаточной герметичности соединения.

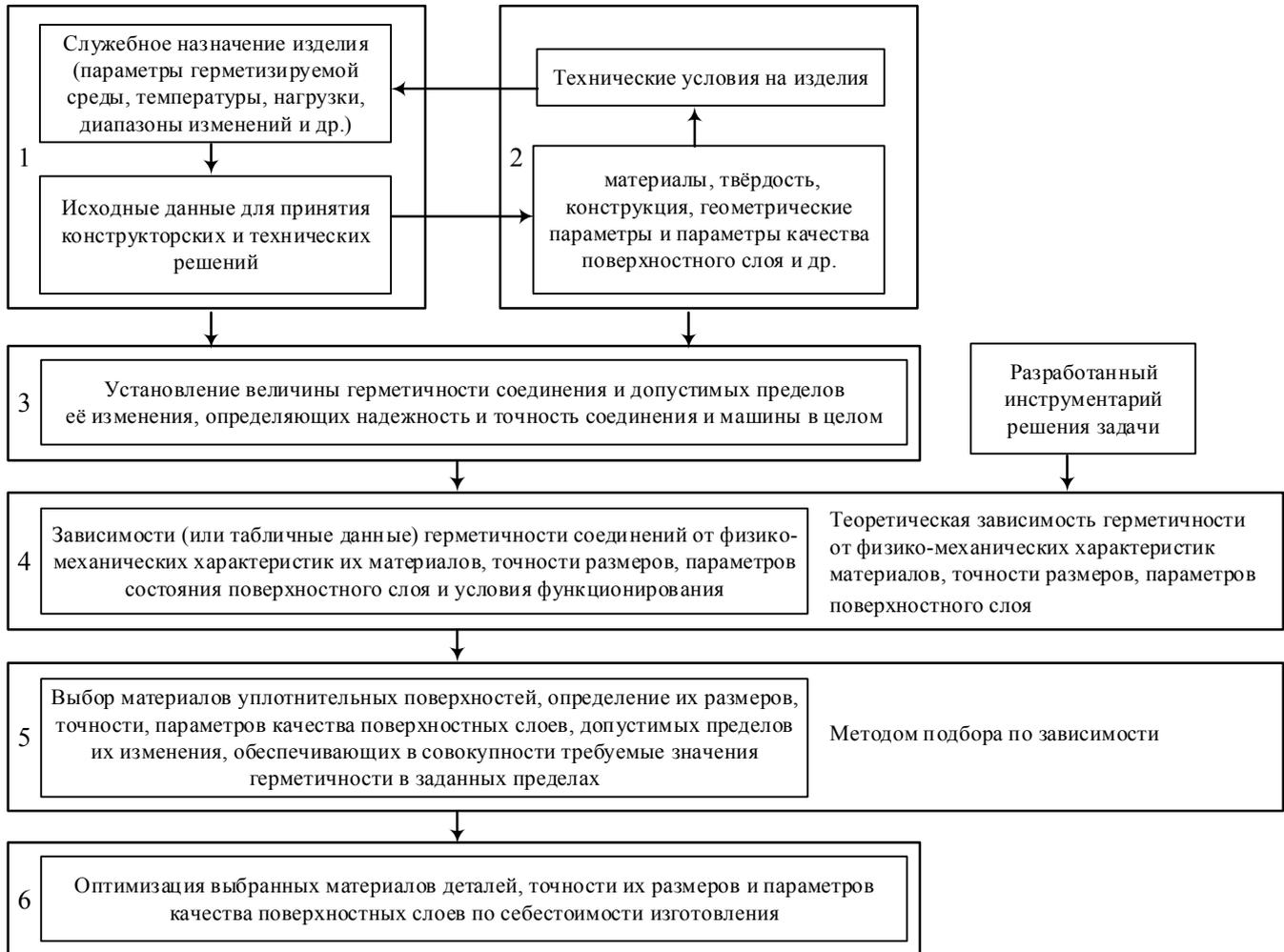


Рис. 1. Структурная схема конструкторских решений для обеспечения герметичности при конструкторско-технологической подготовке производства изделий

Рассмотрение технологии решения задач обеспечения герметичности неподвижных разъёмных металлических соединений осуществим на примере конструкции трубопроводного резьбового проходного соединения с шаровым ниппелем по ГОСТ 24485-80. Для определения герметичности соединения, характеризующееся величиной расхода потока герметизируемой среды через образуемое соединение, выделяют и учитывают все факторы, оказывающие влияние на его герметизирующую способность [6 – 8]. Для этого используем ориентировочный граф механизма герметизации, описывающего влияние основных факторов и их взаимодействие между собой (рис. 3, рис. 4) [8]. Наибольшее влияние на

герметичность соединения оказывают следующие группы факторов: силовая, конструктивная, физико-механическая, макро- и микрогеометрии, конструкторско-технологическая и эксплуатационная.

В качестве исходных данных для обеспечения герметичности конструктором задаются требования, обеспечение которых осуществляется использованием факторов из разных групп. Для рассматриваемого соединения задаются следующие требования:

1. Герметизировать разряженный воздух в состоянии вакуума с давлением 9,3 Па, что определяет параметры герметизируемого вещества (среды) (ПВ) необходимые для определения их влияния на: геометрические пара-

метры герметизирующего зазора (ГПЗ); механизм переноса герметизируемой среды через межповерхностный зазор (МПВ); физико-механические свойства контактирующих в

герметизирующем сопряжении поверхностей (ФМС); величину силового фактора (СФ), выражаемого герметизирующей нагрузкой на герметизирующие поверхности.

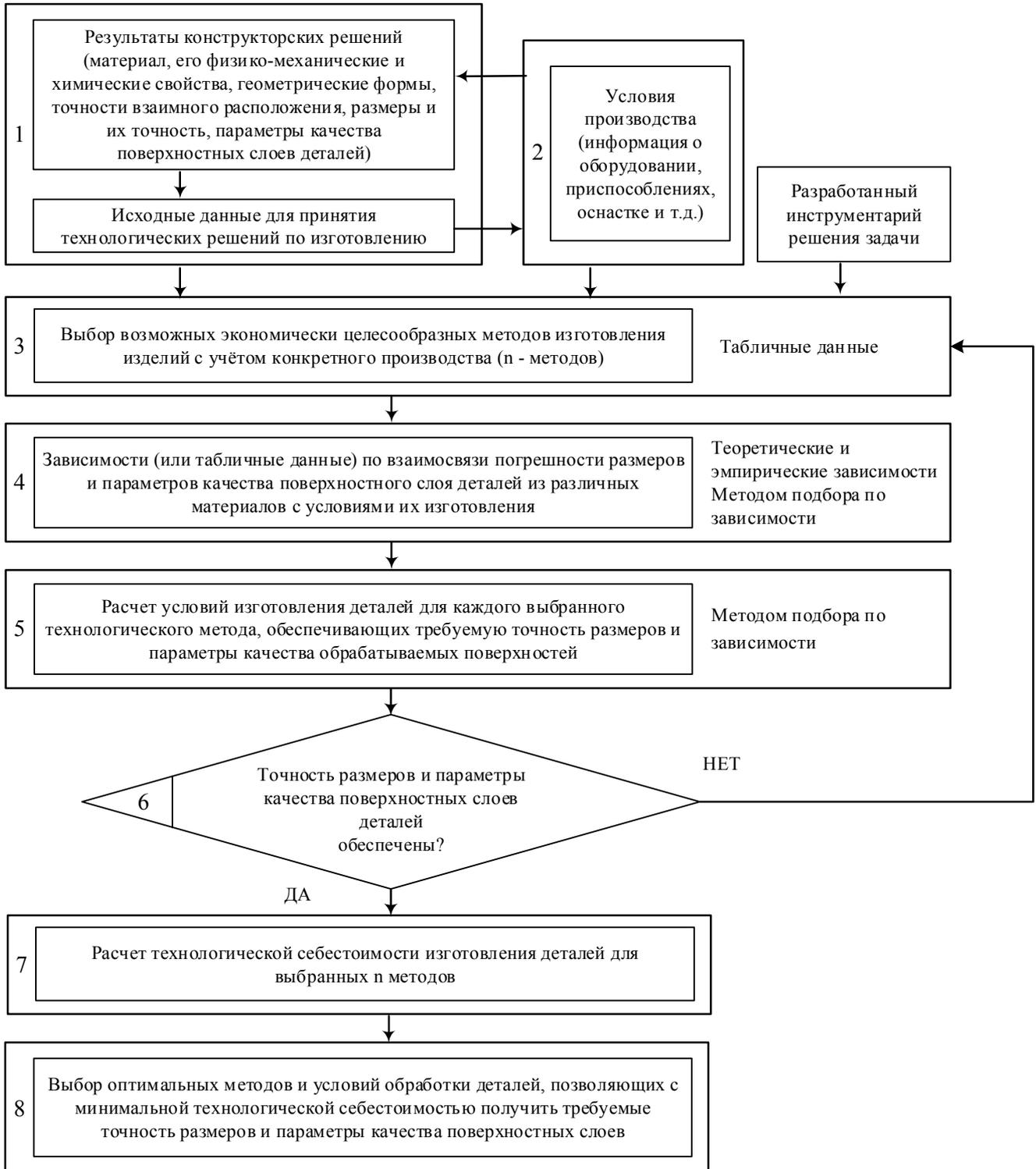


Рис. 2. Структурная схема технологических решений для обеспечения герметичности при конструкторско-технологической подготовке производства изделий

2. Обеспечить герметичность (натекание) свыше  $10^{-4} \text{ мм}^3 \cdot \text{МПа}/\text{с}$ , что определяет параметр утечки (У) с учётом влияния на неё ме-

ханизма переноса герметизируемой среды через межповерхностный герметизирующий зазор и его геометрических параметров. В рас-

смаатриваемом примере вместо понятия «утечка» корректно использовать понятие «натекание», так как при герметизации среды нахо-

дящейся под давлением происходит утечка потока, а при создании вакуума происходит натекание потока среды.

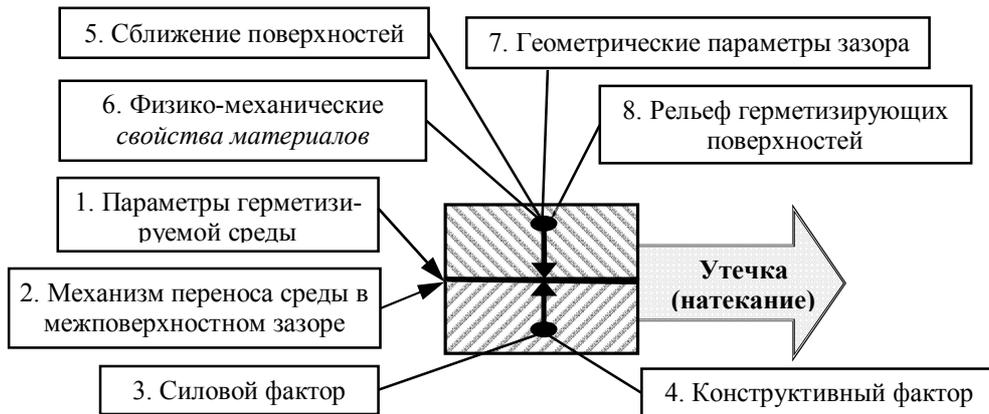


Рис. 3. Схема механизма герметизации

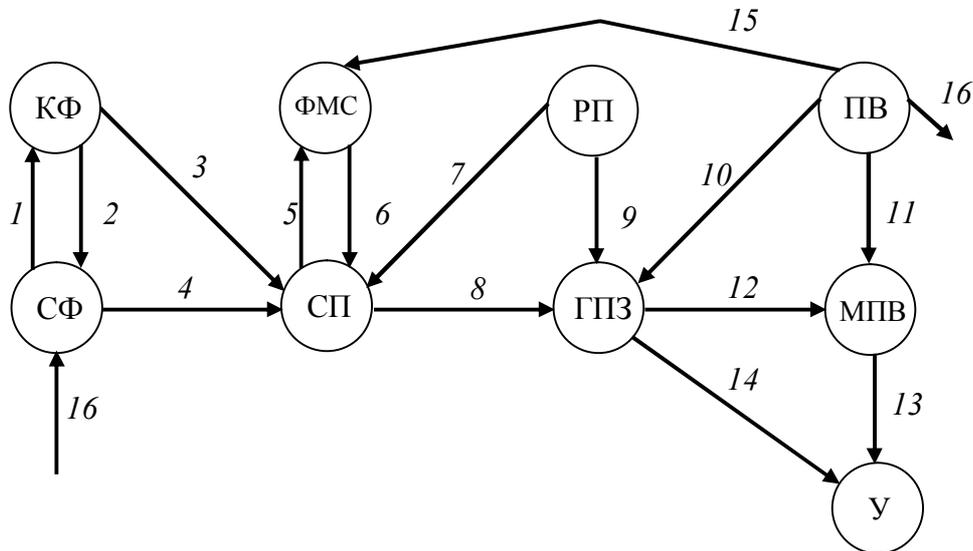


Рис. 4. Ориентировочный граф механизма герметизации:

ПВ – параметры герметизируемого вещества; МПВ – механизм переноса вещества в межповерхностных зазорах; СФ – силовой фактор; КФ – конструктивный фактор; РП – рельеф герметизирующих поверхностей; СП – сближение поверхностей; ГПЗ – геометрические параметры зазоров; ФМС – физико-механические свойства поверхностных слоев; У – утечка (натекание); 1 – влияние СФ на изменение КФ, например, на увеличение ширины контакта поверхностей; 2 – влияние КФ на эффективность СФ, например, за счет клинового эффекта; 3 – влияние КФ на СП за счет деформации элементов, например упругого обжатия; 4 – влияние СФ на СП; 5 – влияние ФМС на СП, например, наклеп поверхностного слоя; 6 – влияние параметров среды на ФМС, например, изменение свойств материала от температуры герметизируемой среды; 7 – влияние РП на СП; 8 – влияние СП на ГПЗ; 9 – влияние РП на ГПЗ; 10 – влияние ПВ на ГПЗ, например, зарастивание зазоров; 11 – влияние ПВ на МПВ, например, влияние температуры герметизируемой среды; 12 – влияние ГПЗ на МПВ; 13 – влияние МПВ на У; 14 – влияние ГПЗ на У; 15 – влияние ПВ на ФМС; 16 – влияние ПВ на величину СФ, например, влияние избыточного давления

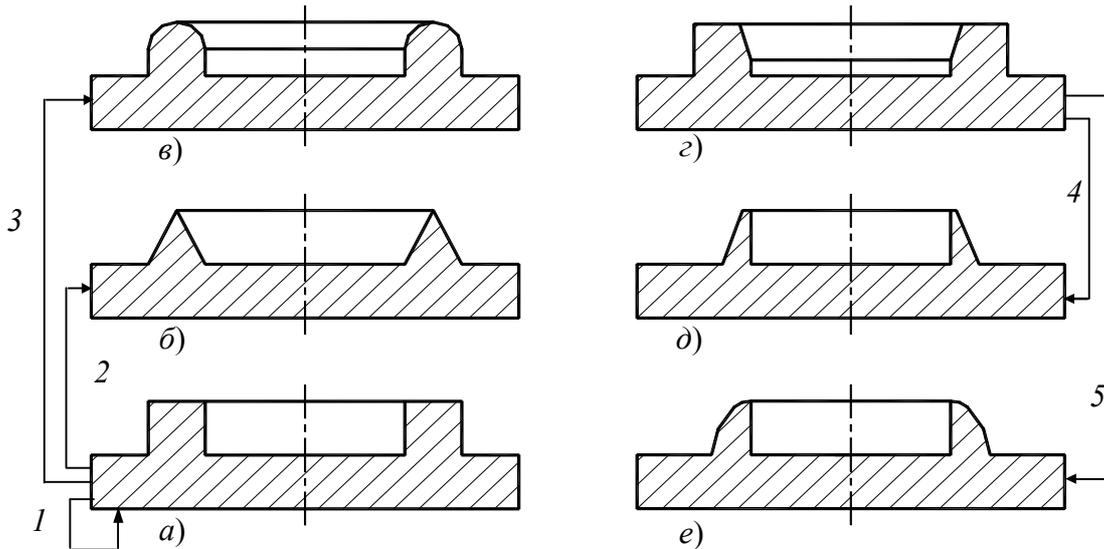
3. Конструктивные (геометрические) размеры соединения определяются по условному проходу трубопровода  $D_u = 32$  мм, а также определяется целый ряд конструктивных факторов герметизации (КФ), необходимых для определения их влияния на: силовой фактор (СФ) герметизации; сближение герметизируемых поверхностей (СП) и формируемый меж-

поверхностный зазор (МПВ).

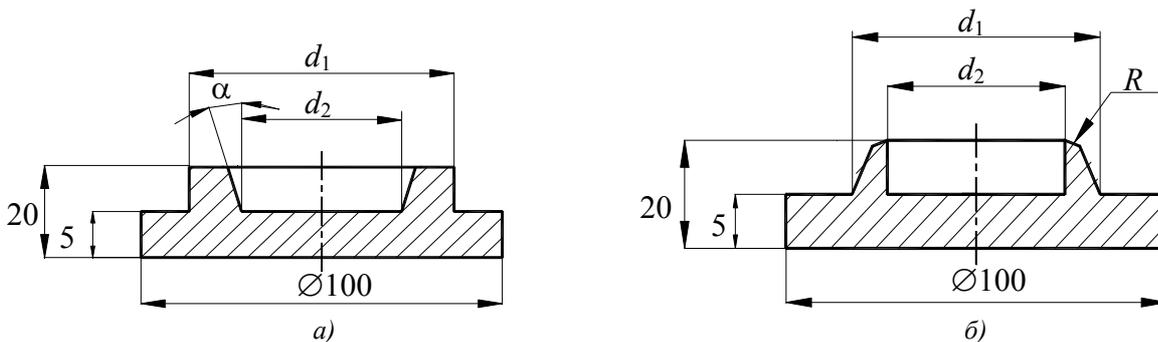
Для изготовления вакуумных систем используются материалы из коррозионностойких сталей, как обладающие необходимыми свойствами, например: фрикционными; адгезионными; диффузионными. В рассматриваемом примере используем коррозионностойкую сталь марки 08X18H10T. Конструкция

трубопроводного резьбового соединения проходного с шаровым ниппелем состоит из двух основных деталей: штуцер и ниппель. Конструкция штуцера определяется ГОСТ 21856-78, а ниппеля ГОСТ 23355-78. По унифицированной схеме геометрических форм контактирующих поверхностей герметизаторов и схем их контактов (рис. 5), нормализованного метода [9] определения влияния технологии на герметичность соединений, штуцер имеет конусную (см. рис. 5, *з*), ниппель – торцовую

(сферическую) (см. рис. 5, *е*) герметизирующие поверхности. При этом схема герметизирующего контакта соответствует соединению «конус-сфера» (5). Для формирования межповерхностной герметизируемой полости зазора в соединении штуцера и ниппеля необходимо выполнить теоретический расчёт прикладываемой нагрузки, для которого определяются геометрические значения конструкторских величин (размеров) (рис. 6).



**Рис. 5. Геометрические формы контактирующих поверхностей герметизаторов и схемы их контакта:** *a* – плоская поверхность; *б, з, д* – конусная поверхность; *е, е* – торцовая (сферическая) поверхность; *1* – контакт «плоскость-плоскость»; *2* – контакт «плоскость-конус»; *3* – контакт «плоскость-тор»; *4* – контакт «конус-конус»; *5* – контакт «конус-сфера»



**Рис. 6. Геометрические величины для определения нагрузки прикладываемой к герметизируемому контакту в соединении штуцера и ниппеля:**

*a* – конусная поверхность штуцера:  $\alpha = 30^\circ$ ;  $d_1 = 30$  мм;  $d_2 = 42$  мм; *б* – торцовая (сферическая) поверхность ниппеля:  $\alpha = 30^\circ$ ;  $d_1 = 40$  мм;  $d_2 = 32$  мм;  $R = 20$  мм

Совокупность процессов, приводящих к уменьшению потока герметизируемой среды через формируемый межповерхностный зазор (неплотность), относятся к механизму герметизации. Межповерхностный зазор формируется геометрическими отклонениями от пра-

вильной идеальной формы герметизирующих поверхностей и воздействия технологических методов её получения. Отклонения от идеальной (эталонной) поверхности определяет качество поверхностного слоя (РП). При этом величина межповерхностного зазора (неплот-

ности) образуется в результате воздействия силового фактора (СФ).

Силовой фактор герметизации определяется усилием, которое создается контактным давлением в сопрягаемых герметизируемых поверхностях за счёт сближения (СП) и контактирования их рельефов (РП). Причём, при одном и том же контактном давлении, но различном качестве поверхностных слоёв сопрягаемых герметизирующих поверхностей, значения герметичности будут различны.

Сближение герметизирующих поверхностей (СП) в рассматриваемой конструкции осуществляется за счёт резьбового соединения. Для того чтобы поверхности начали образовывать межповерхностный герметизирующий зазор в контакте необходимо создать герметизирующее (контактное) давление  $N_{min}$ , которое превышает предел текучести материала и вызывает начало пластических деформаций на вершинах выступов неровностей поверхности, вступивших в контакт. Данное контактное давление будет обеспечивать минимальное значение герметичности. После-

дующее увеличение контактного давления приводит к расширению зоны пластических деформаций. При достижении предела прочности выступы неровностей достигают своего пластического насыщения, в результате чего начинается их контактное разрушение на фактических площадках контакта. Контактные разрушения неровностей поверхностного слоя приводят к увеличению потока герметизируемой среды через соединение. Поэтому напряжения в зоне межповерхностного контакта необходимо ограничивать нагрузкой  $N_{max}$ .

Таким образом, деформации параметров качества поверхностного слоя при реализации механизма герметизации зависит не только от прикладываемой к герметизирующим поверхностям нагрузки и параметров их качества, но и от физико-механических свойств материала (ФМС). Теоретические расчётные уравнения нагрузок для определения герметичности схем контакта с различными геометрическими формами герметизирующих поверхностей соединений приведены в табл. 1.

**1. Расчётные уравнения нагрузок для определения герметичности неподвижного разъёмного соединения**

Схема контакта геометрических форм герметизаторов	Минимальная нагрузка (герметизирующее, контактное давление) $N_{min}$ , Н	Максимальная нагрузка (герметизирующее, контактное давление) $N_{max}$ , Н	$\frac{d_k}{A}$
Плоскость с плоскостью	$\sigma_{T\ min} \cdot A$	$\sigma_{B\ min} \cdot A$	$\frac{d_1^2 - d_2^2}{4}$
Плоскость с конусом	$\frac{\sigma_{T\ min}^2 \cdot \pi \cdot d_k \cdot R}{0,02 \cdot E_{pp}} \sin \psi$	$\frac{\sigma_{B\ min}^2 \cdot \pi \cdot d_k \cdot R}{0,02 \cdot E_{pp}} \sin \psi$	$d_2 + h \cdot \operatorname{tg} \beta$
Плоскость с тором	$\frac{\sigma_{T\ min}^2 \cdot \pi \cdot d_k \cdot R}{0,02 \cdot E_{pp}}$	$\frac{\sigma_{B\ min}^2 \cdot \pi \cdot d_k \cdot R}{0,02 \cdot E_{pp}}$	$d_2 + R$
Конус со сферой	$\frac{\sigma_{T\ min}^2 \cdot \pi \cdot d_k \cdot R}{0,02 \cdot E_{pp}} \sin \alpha$	$\frac{\sigma_{B\ min}^2 \cdot \pi \cdot d_k \cdot R}{0,02 \cdot E_{pp}} \sin \alpha$	$d_2 + 2 \cdot R \cdot \sin \alpha$
Конус с конусом	$\frac{\sigma_{T\ min}^2 \cdot \pi \cdot d_k \cdot R}{0,02 \cdot E_{pp}} \sin \alpha$	$\frac{\sigma_{B\ min}^2 \cdot \pi \cdot d_k \cdot R}{0,02 \cdot E_{pp}} \sin \alpha$	$d_2$

При использовании расчётных зависимостей из табл. 1. за предел текучести  $\sigma_T$  (Па) и предел прочности  $\sigma_B$  (Па) принимаются значения для материала одной из контактирующих поверхностей, имеющей наименьшие их значения. При этом приведенный модуль упругости определяется по выражению:

$$E_{pp} = \frac{2E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2}, \quad (1)$$

где  $E_1, E_2$  – модуль упругости первой и второй

контактирующих поверхностей соответственно, МПа.

Исходя из вышеизложенного, для рассматриваемого герметизирующего соединения диаметр его контакта определяется по формуле:

$$d_k = d_2 + 2 \cdot \frac{d_1 - d_2}{2} \sin \alpha, \quad (\text{мм}). \quad (2)$$

При этом геометрическая площадь контакта составит:

$$A = \pi \cdot d_k \cdot \frac{d_1 - d_2}{2} \sin \alpha, \text{ (мм}^2\text{)}. \quad (3)$$

Соответственно минимальная нагрузка, необходимая для начала формирования межповерхностной полости и герметизации:

$$N_{\min} = \frac{\sigma_T \cdot A}{0,02 \cdot E}, \text{ (Н)}. \quad (4)$$

Максимально допустимая нагрузка, обеспечивающая максимально достигаемое значение герметичности, определяется:

$$N_{\max} = \frac{\sigma_b \cdot A}{0,02 \cdot E}, \text{ (Н)}. \quad (5)$$

В результате деформирования неровностей поверхности в зоне контакта под действием нагрузки образуется межповерхностная полость зазора, состоящая из системы микроканалов (микрокапилляров), через которую осуществляется движение потока герметизируемой среды.

Кроме условно проходного диаметра и геометрии сечения герметизирующего профиля к конструктивным факторам, влияющим на герметичность соединения, относится ширина контакта уплотнения. При увеличении ширины контактного пояса герметизируемых поверхностей соединения увеличивается путь движения потока герметизируемой среды, следовательно, увеличивается сопротивление движения среды и вероятность создания мест закупорки ранее образованных микроканалов.

При конструировании и определении герметичности соединений рекомендуется принимать ширину контактного пояса в пределах 3...6 мм. Так как на основе расчётных и опытных значений определили [10], что с увеличением ширины контактного пояса в пределах 1...3 мм поток уменьшается, а при дальнейшем увеличении существенного изменения значений утечки не происходит. При определении ширины контактного пояса, следует различать понятия ширины контакта, длины контакта и ширины контактного пояса. Ширина контакта соединения рассматривается в направлении перпендикулярном потоку среды, а длина (во многих научных и исследовательских работах её называют шириной контактного пояса) в направлении движения потока.

Для рассматриваемого соединения при

приложении соответственно минимальной и максимальной нагрузки в зоне герметизируемого контакта, ширина контактного пояса определяется:

$$l_{\min} = 0,152 \cdot \sqrt{\frac{N_{\min} (d_1 - d_2) \sin \alpha}{\pi \cdot d_k \cdot E}}, \text{ (мм)}; \quad (6)$$

$$l_{\max} = 0,152 \cdot \sqrt{\frac{N_{\max} (d_1 - d_2) \sin \alpha}{\pi \cdot d_k \cdot E}}, \text{ (мм)}. \quad (7)$$

Существующие теоретические зависимости герметичности стыка между двумя реальными поверхностями опираются на различные модели описания поверхностей, которые можно разделить на две основные группы. Одни модели при описании рельефа поверхности (РП) используют топографические методы и не стандартизованные параметры качества поверхностного слоя, другие – профильные методы в сечении и стандартизованные параметры. Использование методов, не основанных на стандартизованных параметрах качества поверхности, затрудняет использование результатов исследований при конструкторско-технологической подготовке производства и изготовлении деталей соединений. Профильная оценка позволяет учитывать влияние различных стандартизованных параметров качества герметизирующих поверхностных слоев деталей соединений на их герметизирующую способность. Поэтому для рассмотрения влияния параметров качества поверхностного слоя в модели описания межповерхностного герметизируемого контакта, выбирается сечение в направлении перпендикулярном движению потока герметизируемой среды (рис. 7).

В результате деформации неровностей герметизирующих поверхностей, в зоне контакта образуется система впадин-капилляров произвольной формы и пятен касания неровностей поверхностей. Для дальнейшего определения герметичности образованного стыка между двумя поверхностями осуществляется выбор способа его моделирования для осуществления рассмотрения массопереноса герметизируемой среды через образованную систему капилляров.

В рассматриваемой технологии обеспечения герметичности, моделирование заключается в замене системы образованных в межповерхностном герметизирующем зазоре микрокапилляров пористым телом (см. рис. 7), имеющим некоторое соотношение общего

объёма тела и объёма пустот в этом теле. При этом учитывается возможности применения метода профильной оценки рельефа герметизирующих поверхностей, по которому осуществляется адекватная оценка величины утечки (натекания) через образованную неплотность.

Таким образом, пористый слой описывает образовавшееся в сопряжении герметизирующих поверхностей множество пересекающихся микроканалов, по которым происходит основное движение потока (утечки, натекания) герметизируемой среды.

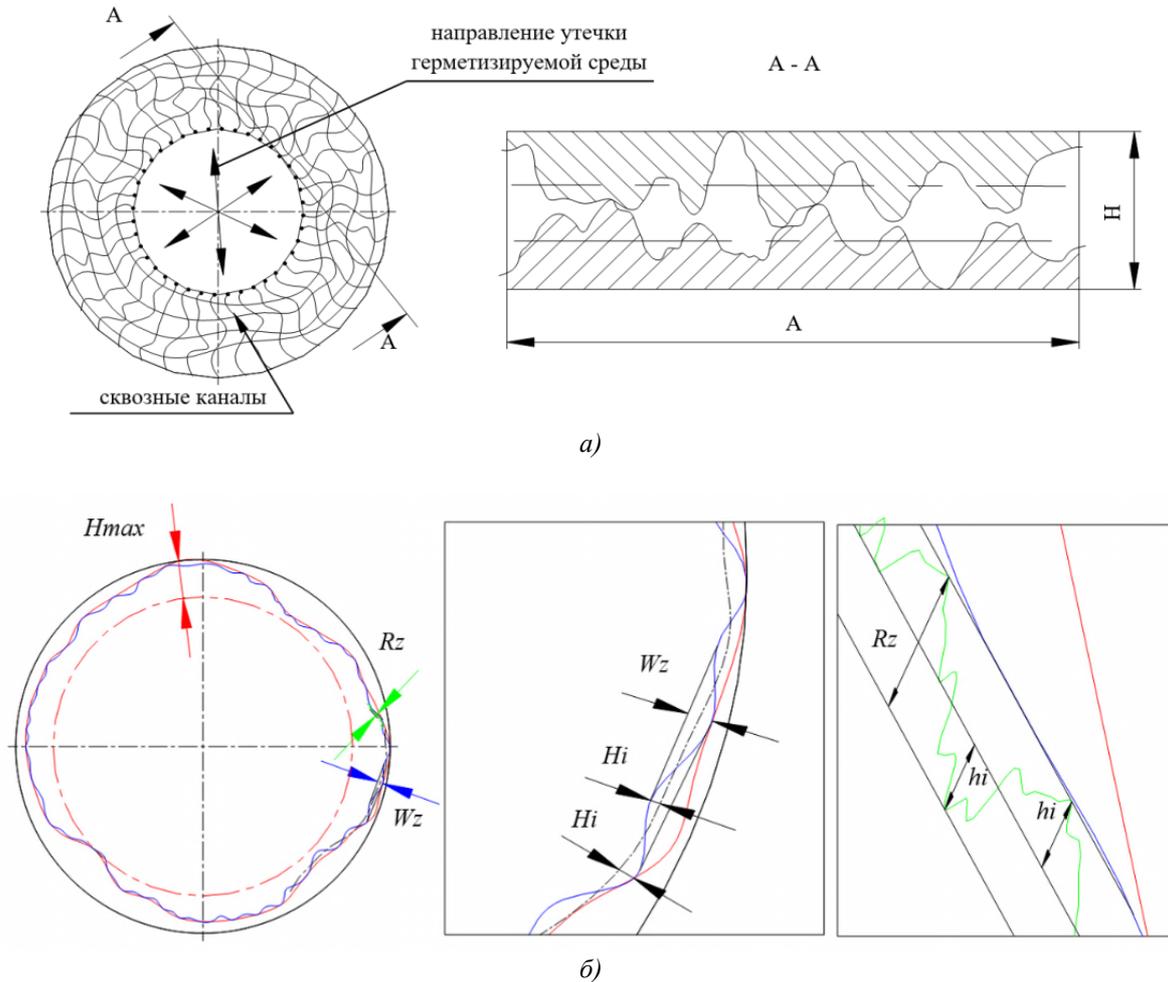


Рис. 7. Моделирование межповерхностного герметизирующего зазора пористым телом с сечением в направлении перпендикулярном движению потока герметизируемой среды:

*a* – модель межповерхностной полости для плоского герметизирования; *б* – модель межповерхностной полости для окружного герметизирования

Для определения параметров сближения поверхностей (СП) и геометрических параметров зазора (ГПЗ), с учётом влияния физико-механических свойств материалов (ФМС) и рельефа герметизирующих поверхностей (РП), применяется физическая картина образования плотности межконтактного простран-

ства разработанная для четырёх вариантов исполнения С-образных уплотнений при приложении к ним нагрузки [2]. В соответствии с которой толщина пористого слоя с учётом шероховатости, волнистости и макроотклонения сопрягаемых поверхностей определяется по выражению:

$$H = H_1 - y_k = (H_{\max_1} + H_{\max_2}) + (W_{z_1} + W_{z_2}) + (R_{z_1} + R_{z_2}) - y_k, \quad (8)$$

где  $H_1$  – высота пористого слоя в контакте без нагрузки, мм;  $H_{\max_1}$  и  $H_{\max_2}$  – макроотклонение, соответственно первой и второй герме-

тизирующей поверхности, мм;  $W_{z_1}$  и  $W_{z_2}$  – средняя высота волн, соответственно первой и второй герметизирующей поверхности, мм;

$Rz_1$  и  $Rz_2$  – высота неровностей профиля, соответственно первой и второй герметизирующих поверхности, мм;  $y_k$  – величина сближения поверхности в результате изменения (деформации) параметров поверхности, мм.

$$y_k = [y_{пл1} + y_{пл2}] + [y_{уп1} + y_{уп2}] = \left[ \pi \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot N \cdot 0,2 \cdot Rz_1 \cdot Wz_1 \cdot H \max_1}{A \cdot H_{\mu_1}} \right)^{1/3} + \pi \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot N \cdot 0,2 \cdot Rz_2 \cdot Wz_2 \cdot H \max_2}{A \cdot H_{\mu_2}} \right)^{1/3} \right] + \left[ 2\pi \frac{1 - \mu_1^{*2}}{E_1} H_{\mu_1} \cdot S_{m1} \frac{y_{пл1}}{0,2 \cdot Rz_1} + 2\pi \frac{1 - \mu_2^{*2}}{E_2} H_{\mu_2} \cdot S_{m2} \frac{y_{пл2}}{0,2 \cdot Rz_2} \right], \quad (9)$$

где  $y_{пл}$  – величина сближения поверхности в результате изменения (пластической деформации) параметров герметизирующей поверхности, мм;  $y_{уп}$  – величина сближения поверхности в результате изменения (упругой деформации) параметров герметизирующей поверхности, мм;  $N$  – нагрузка, прикладываемая к сопряжению поверхностей, МПа;  $H_{\mu}$  – поверхностная микротвердость, МПа;  $A$  – геометрическая площадь контакта, мм<sup>2</sup>;  $\mu^*$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости;  $S_m$  – средний шаг неровностей профиля шероховатости по средней линии, мм.

В случаях присутствия смещения в процессе образования межконтактного герметизирующего пространства будут участвовать новые выступы неровностей из-за разрушения пластически насыщенных площадок контакта. В результате происходит перераспределение фактической площади контакта и дополнительная пластическая деформация. Тогда, для расчёта сближения поверхностей необходимо применять зависимость:

$$y_{ск} = (2 \cdot \sqrt{1 + f^2} - 1) \cdot y_k, \quad (10)$$

где  $f$  – коэффициент трения скольжения.

Используя уравнение теории фильтрационного потока, возможно осуществить определение герметизирующей способности как одной поверхности, так и контакта двух герметизирующих поверхностей (соединения в целом) с учётом всех стандартизованных параметров качества поверхностного слоя [1, 11]:

$$Q = \frac{\pi \cdot d_k \cdot \Delta p \cdot H}{\mu \cdot \ell} \cdot K, \quad (11)$$

При этом нормальное контактное сближение, в соответствии с имеющейся теорией контактных перемещений, определяется по формуле [1, 11]:

где  $\Delta p$  – перепад давления, вызывающий движение среды, МПа;  $d_k$  и  $\ell$  – размеры контакта, мм;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости среды, характеризующий скорость движения среды, МПа·с;  $H$  – высота пористого слоя под нагрузкой, мм;  $K$  – коэффициент характеризующий проницаемость среды сквозь пористую структуру, мм<sup>2</sup>.

Коэффициент проницаемости, учитывающий способность пористого слоя пропускать через себя герметизируемую среду под действием перепада давления, определяется уравнением, установленным Козени-Карманом:

$$K = \frac{u \cdot m^3}{\Sigma^2}, \quad (12)$$

где  $u$  – постоянная Кармана (0,2...0,22);  $m$  – пористость;  $\Sigma$  – удельная поверхность соприкосновения материала с герметизируемой средой.

Пористость позволяет оценить степень неплотности контакта, образованной в результате приложения нагрузки к сопряжению, учитывая всю систему каналов равной длины и произвольного сечения пористого слоя, и определяется отношением объёма пор к общему пористому объёму:

$$m = \frac{V_{п}}{V_{о}} = \frac{H \cdot A_{п}}{H \cdot A} = \frac{A - A_{ф}}{A}, \quad (13)$$

где  $A$  – геометрическая площадь контакта, определяющаяся зависимостям установленным Герцем при определении контактного давления, мм<sup>2</sup>;  $A_{ф}$  – фактическая площадь контакта, мм<sup>2</sup>;  $A_{п}$  – площадь пор, мм<sup>2</sup>;  $V_{п}$  – объём пор, мм<sup>3</sup>;  $V_{о}$  – общий объём пористого слоя, мм<sup>3</sup>.

Удельная поверхность соприкосновения материала с герметизируемой средой определяется отношением площади материала, со-

прикасающегося с герметизируемой средой, к объёму металла в пористом слое:

$$\Sigma = \frac{A_{\text{п}}}{V_{\text{м}}} = \frac{Fr - A\phi}{H \cdot A\phi}, \quad (14)$$

где  $Fr$  – поверхность соприкосновения материала с окружающей средой в пределах геометрической площади контакта,  $\text{мм}^2$ ;  $V_{\text{м}}$  – объём металла в пористом слое,  $\text{мм}^3$ .

Принимая во внимание только площадь соприкосновения окружающей среды с шероховатостью поверхности, и учитывая, что величина шаговых параметров шероховатости и волнистости поверхностей обычно на порядок выше, чем высотные характеристики, получим  $Fr = 5,44 \cdot A$  [4].

Анализ полученной зависимости утечки (11) показал недостаточность принятого допущения при определении объёма металла в пористом теле (13). По данному допущению принят коэффициент заполнения металла в пористом теле, равный половине высоты пористого тела до приложения нагрузки. На основании вышеизложенных выводов принимаем, что объём металла в пористом слое определяется разностью между общим объёмом пористого слоя и объёмом пор в рассматриваемом пористом теле.

Выполнив подстановку уравнений (13) и (14) в (12) получаем новый коэффициент проницаемости:

$$K = u \cdot (5,44 \cdot A - A\phi) \cdot \frac{(H \cdot A\phi)^2}{A^3}. \quad (15)$$

Для удобства дальнейшего рассмотрения зависимости (11), введем коэффициент:

$$K' = (5,44 \cdot A - A\phi) \cdot \frac{A\phi^2}{A^3}. \quad (16)$$

Фактическая площадь контакта герметизаторов с учётом параметров качества поверхностных слоёв определяется соотношением [1, 11]:

$$A\phi = \frac{N}{H_{\text{уп}}}. \quad (17)$$

Для рассматриваемого примера, фактическая площадь контакта, полученная подставкой в уравнение (17) значений нагрузки, определённых в уравнениях (4), (5):

$$A\phi_{\text{min}} = \frac{N_{\text{min}}}{H_{\text{уп}}}, \quad (\text{мм}^2); \quad (18)$$

$$A\phi_{\text{max}} = \frac{N_{\text{max}}}{H_{\text{уп}}}, \quad (\text{мм}^2). \quad (19)$$

Подставляя полученные значения фактической площади контакта в уравнение (11) определяем коэффициент, необходимый для определения герметичности:

$$K'_{\text{min}} = \frac{(5,44 \cdot A - A\phi_{\text{min}}) \cdot A\phi_{\text{min}}^2}{A^3}; \quad (20)$$

$$K'_{\text{max}} = \frac{(5,44 \cdot A - A\phi_{\text{max}}) \cdot A\phi_{\text{max}}^2}{A^3}. \quad (21)$$

Далее для уменьшения проводимых вычислений остановимся на рассмотрении контакта шероховатой и гладкой поверхностей, поскольку контакт двух шероховатых поверхностей можно представить в виде контакта эквивалентной шероховатой и гладкой поверхностей. Такой подход к рассмотрению позволяет определять герметизирующую способность одной поверхности, и при определении влияния методов и условий обработки на утечку (натекания) среды является необходимым. Тогда высота пористого слоя, определяемая по формуле (8), примет вид:

$$H = (H_{\text{max}} + W_z + R_z) - y_{\text{к}}. \quad (22)$$

Теоретические (расчётные) зависимости определения утечки (натекания) герметизируемой среды с учётом параметров качества поверхностного слоя для нормального контакта сближения герметизируемых поверхностей различны и определяются механизмами переноса герметизируемой среды (массоперенос). В зависимости от состояния герметизируемой среды и режима движения потока через образованное плотное межконтактное пространство (пористое тело) получены три расчётные зависимости.

Для жидкостей, движение которых соответствует ламинарному режиму движения потока, герметичность (утечка)  $Q_{\text{ж}}$ ,  $\text{мм}^3/\text{с}$ , рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{ж}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{к}} \cdot \Delta p \cdot u \cdot [(H_{\text{max}} + W_z + R_z) - y_{\text{к}}]^3}{12 \cdot \mu \cdot \ell} K', \quad (23)$$

где  $\Delta p$  – перепад давления, вызывающий движение среды, МПа;  $d_k, \ell$  – размеры контакта, мм;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости среды, характеризующий скорость движения среды, МПа·с;  $y_k$  – нормальное контактное сближение поверхности, мм;  $K'$  – коэффициент характеризующий проницаемость среды сквозь пористую структуру, мм<sup>2</sup>.

Для газов, находящихся под действием давления больше 0,1 МПа и соответствующим ламинарным режимам течения потока, герметичность (утечка)  $Q_{\Gamma}$ , г/с, определяется следующим выражением:

$$Q_{\Gamma} = \frac{\pi \cdot d_k \cdot M \cdot (p_1^2 - p_2^2) \cdot [(H_{\max} + W_z + R_z) - y_k]^3}{0,024 \cdot \mu \cdot \ell \cdot R \cdot T} K', \quad (24)$$

где  $M$  – молекулярная масса герметизируемого вещества;  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – температура газа.

Для газов, находящихся под действием давления меньше 0,1 МПа, имеет место молекулярный режим течения потока, в соответствии с которым герметичность (натекание)  $Q_{\Gamma\text{н}}$ , мм<sup>3</sup>·МПа/с, будет определяться выражением:

$$Q_{\Gamma\text{н}} = 0,042 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot M}} \frac{\Delta p \cdot u \cdot [(H_{\max} + W_z + R_z) - y_k]^3}{\ell} K'. \quad (25)$$

Равенство массовой утечки жидкости и газа очевидно, следовательно, зависимости (23) и (24) эквиваленты и могут использоваться для расчёта утечки жидких и газовых сред, движение потока у которых соответствуют ламинарному режиму движения.

Таким образом, к показателям качества поверхностного слоя, предопределяющим герметизирующую способность поверхности, можно отнести: макроотклонения –  $H_{\max}$ ; волнистость –  $W_z$ ; шероховатость:  $R_z, R_a, S_m$  и физико-механические. Кроме того, представленные толщины пористого слоя для нормального контактного сближения и определении площадей контакта выражают формируемые значения параметров:  $H_p, W_p, R_p, t_p$ .

При решении конструкторских задач необходимо учитывать, что утечки среды выражаются массовыми  $Q_m$ , кг/с, и объёмными  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, единицами измерения. Перевод массовых в объёмные утечки, и наоборот, осуществляется с использованием выражения:

$$Q_m = \rho \cdot Q, \quad (26)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости, г/мм<sup>3</sup>.

Учитывая, что объёмный расход  $Q$ , м<sup>3</sup>/с пропорционален периметру уплотнения, удельные утечки  $\bar{Q}$ , м<sup>3</sup>/(м·с) представляются как утечки за единицу времени отнесённые к единице периметра при прочих равных условиях. Такой подход к оценке герметичности позволяет распространять получаемые результаты для одного типоразмера уплотнения на уплотнения остальных видов.

Из полученных теоретических зависимо-

стей, очевидна необходимость точного определения комплекса параметров качества поверхности, по сравнению с использованием вероятностно-статистического подхода обеспечения герметичности соединений. Вероятностно-статистический подход обладает повышенными затратами ресурсов (себестоимостью) и ограничивается определением конструктором лишь влияния шероховатости поверхности, причём только её высотного значения и без учёта влияния на герметизирующую способность других параметров качества поверхностного слоя.

Выполненные выше теоретические расчёты и описание физической модели герметизации возможно осуществлять другими менее затратными способами [12], а именно: использованием табличных данных (табл. 2, табл. 3) и эмпирических зависимостей, получаемых в ходе проведения реальных экспериментов.

Для конической сопрягаемой поверхности на основе табличных данных назначены параметры качества поверхностного слоя  $H_{\max} = 0,006$  мм;  $W_z = 0,0005$  мм;  $R_z = 0,001$  мм;  $S_m = 0,02$  мм, которые обладают герметизирующей способностью при минимальном значении приложения нагрузки обеспечивать натекание не более  $Q_{\Gamma\text{н min}} = 1,7 \cdot 10^{-5}$  мм<sup>3</sup>·МПа/с.

Для сферической сопрягаемой поверхности назначены параметры качества поверхностного слоя  $H_{\max} = 0,04$  мм;  $W_z = 0,0016$  мм;  $R_z = 0,004$  мм;  $S_m = 0,08$  мм, обладающие герметизирующей способностью при минимальном значении приложения нагрузки  $N_{\text{min}} = 2260,79$  Н обеспечивать натекание не более  $Q_{\Gamma\text{н min}} = 1,1 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>·МПа/с.

**2. Установленные экспериментальные значения параметров качества поверхностного слоя цилиндрических стыков соединения (наружные тела вращения) сталь 08X18H10T и их герметичности под действием давления меньше 0,1 МПа (вакуум)**

Методы обработки	Параметры качества поверхностного слоя				$N_{\min}$ , Н	$N_{\max}$ , Н
	$H_{\max}$ , мкм	$Wz$ , мкм	$Rz$ , мкм	$Sm$ , мм	$Q_{\text{гн min}}$ , мм <sup>3</sup> ·МПа/с	$Q_{\text{гн max}}$ , мм <sup>3</sup> ·МПа/с
Обтачивание:						
получистовое	80...200	3,2...10	10...80	0,16...0,40	0,1682...4,6708	3,1712...78,8153
чистовое	40...100	1,6...4,0	4,0...12,5	0,08...0,16	0,11·10 <sup>-3</sup> ...0,1608	0,1651...0,8099
Шлифование:						
чистовое	10...40	0,5...4,0	1,0...6,25	0,025...0,100	9,14·10 <sup>-6</sup> ...1,45·10 <sup>-2</sup>	*
тонкое	6...20	0,16...0,8	0,25...1,25	0,008...0,025	*	*
плосковершинное	10...100	0,5...10	1,6...12,5	0,063...1,250	1,53·10 <sup>-5</sup> ...0,198	*÷1,1516
Притирка:						
обычная	4...15	0,08...0,10	0,05...0,50	0,006...0,040	*	*
плосковершинная	15...60	0,4...0,8	0,5...4,0	0,032...0,200	3,18·10 <sup>-3</sup> ...0,1028	1,85·10 <sup>-2</sup> ...0,3546
* – неопределяемые значения						

**3. Установленные экспериментальные значения параметров качества поверхностного слоя цилиндрических стыков соединения (внутренние тела вращения) сталь 08X18H10T и их герметичности под действием давления меньше 0,1 МПа (вакуум)**

Методы обработки	Параметры качества поверхностного слоя				$N_{\min}$ , Н	$N_{\max}$ , Н
	$H_{\max}$ , мкм	$Wz$ , мкм	$Rz$ , мкм	$Sm$ , мм	$Q_{\text{гн min}}$ , мм <sup>3</sup> ·МПа/с	$Q_{\text{гн max}}$ , мм <sup>3</sup> ·МПа/с
Растачивание:						
чистовое	20...80	2,5...6,25	4...10	0,08...0,16	0,33·10 <sup>-2</sup> ...0,1740	0,0506...3,0162
тонкое	6...40	0,5...4	1...4	0,02...0,1	1,7·10 <sup>-5</sup> ...1,47·10 <sup>-2</sup>	1,61·10 <sup>-8</sup> ...0,134
Шлифование:						
чистовое	10...40	1,25...6,25	1,6...8	0,025...0,1	2,21·10 <sup>-4</sup> ...2,33·10 <sup>-2</sup>	1,19·10 <sup>-3</sup> ...0,2543
тонкое	6...20	0,32...1,6	0,4...1,6	0,008...0,025	8,55·10 <sup>-5</sup> ...5,82·10 <sup>-4</sup>	1,86·10 <sup>-4</sup> ...3,31·10 <sup>-5</sup>
плосковершинное	15...90	0,5...10	1,6...12,5	0,063...1,0	6,84·10 <sup>-4</sup> ...0,2927	6,64·10 <sup>-3</sup> ...5,4435
Притирка:						
обычная	2...10	0,125...0,63	0,1...0,8	0,005...0,04	* ÷3,41·10 <sup>-7</sup>	0,125...0,63
плосковершинная	5...50	0,4...1,25	0,5...4	0,032...0,2	3,6·10 <sup>-6</sup> ...2,49·10 <sup>-2</sup>	* ÷0,2771

Суммарное натекание через соединение при минимальной нагрузке составит  $1,27 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>·МПа/с. Повышение герметичности возможно за счёт уменьшения значений назначаемых параметров качества поверхностных слоев или увеличения прилагаемой нагрузки на соединение до  $N_{\max} = 20347,12$  Н.

Технология решения задач герметизации технологом, на основе данных получаемых от конструктора, зависит от выбранного конструктором способа решения. При теоретическом расчётном способе технолог применяет

установленные взаимосвязи поверхностного слоя с условиями обработки [13, 14]. Подстановкой соответствующих теоретических описаний параметров качества поверхностного слоя в соответствующую зависимость (23) – (25) с учётом рассмотрения неровностей герметизируемых поверхностей в продольном и поперечном сечении. Например, для торцового точения теоретическая расчётная зависимость определения величины натекания герметизируемой среды будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{гн}} = & 0,042 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{8R \cdot T}{\pi \cdot M}} \cdot \frac{\Delta p \cdot u}{\ell} K' \times \\
 & \times \left[ \left( \left( C \pm \frac{10C_p \cdot t^x \cdot S_o^y \cdot L_p^3}{3E \cdot J} K_{\text{мп}} \cdot K_{\text{оп}} \cdot K_{\text{гп}} \cdot K_{\lambda, \text{п}} \cdot K_{\text{гр}} \cdot \left[ \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{нар}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^n - \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{отв}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^n \right] \right) + \right. \\
 & + \left( 1,2 \left[ \left( \frac{C_p \cdot S_o^y \cdot [\text{HB}_{\text{max}}^n \cdot t^x - \text{HB}_{\text{min}}^n (t - Wz_{\text{исх}} - Rz_{\text{исх}})^x]}{j_{\text{тс}}} \right) \cdot \left[ \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{нар}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^z - \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{отв}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^z \right] \right)^2 + \right. \\
 & + \left. \left( \frac{C_p \cdot S_o^y \cdot [\text{HB}_{\text{max}}^n \cdot t^x - \text{HB}_{\text{min}}^n (t - Wz_{\text{исх}} - Rz_{\text{исх}})^x]}{j_{\text{тс}}} \right) \cdot \left[ \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{нар}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^z - \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{отв}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^z \right] \times \right. \\
 & \times \left. \left( 1 + \cos \left[ (m-1) - \frac{180}{m} \right] \right) \right]^{1/2} \left. \right) + \left( h_1 + \frac{C_y \cdot S^y \cdot v^z [\text{HB}_{\text{max}}^n \cdot t^x - \text{HB}_{\text{min}}^n (t - Rz_{\text{исх}})^x]}{j_{\text{тс}}} + h_3 + R_{z_{\text{вп}}} \right) \right) - \\
 & - \left( \pi \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot N \cdot 0,2}{A \cdot H_{\text{ш}}} \right)^{1/3} \right) \times \\
 & \times \left( \left( C \pm \frac{10C_p \cdot t^x \cdot S_o^y \cdot L_p^3}{3E \cdot J} K_{\text{мп}} \cdot K_{\text{оп}} \cdot K_{\text{гп}} \cdot K_{\lambda, \text{п}} \cdot K_{\text{гр}} \cdot \left[ \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{нар}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^n - \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{отв}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^n \right] \right) \times \right. \\
 & \times \left. \left( 1,2 \left[ \left( \frac{C_p \cdot S_o^y \cdot [\text{HB}_{\text{max}}^n \cdot t^x - \text{HB}_{\text{min}}^n (t - Wz_{\text{исх}} - Rz_{\text{исх}})^x]}{j_{\text{тс}}} \right) \cdot \left[ \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{нар}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^z - \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{отв}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^z \right] \right)^2 + \right. \\
 & + \left. \left( \frac{C_p \cdot S_o^y \cdot [\text{HB}_{\text{max}}^n \cdot t^x - \text{HB}_{\text{min}}^n (t - Wz_{\text{исх}} - Rz_{\text{исх}})^x]}{j_{\text{тс}}} \right) \cdot \left[ \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{нар}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^z - \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{отв}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^z \right] \times \right. \\
 & \times \left. \left( 1 + \cos \left[ (m-1) - \frac{180}{m} \right] \right) \right]^{1/2} \left. \right) \times \left( h_1 + \frac{C_y \cdot S^y \cdot v^z [\text{HB}_{\text{max}}^n \cdot t^x - \text{HB}_{\text{min}}^n (t - Rz_{\text{исх}})^x]}{j_{\text{тс}}} + h_3 + R_{z_{\text{вп}}} \right) \right)^{1/3} + \\
 & + 2\pi \frac{1-\mu^*}{0,2 \cdot E} H_{\text{ш}} \cdot S \cdot \pi \cdot \left( \frac{2\pi \cdot N \cdot 0,2}{A \cdot H_{\text{ш}}} \right)^{1/3} \times \\
 & \times \left( \left( C \pm \frac{10C_p \cdot t^x \cdot S_o^y \cdot L_p^3}{3E \cdot J} K_{\text{мп}} \cdot K_{\text{оп}} \cdot K_{\text{гп}} \cdot K_{\lambda, \text{п}} \cdot K_{\text{гр}} \cdot \left[ \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{нар}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^n - \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{отв}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^n \right] \right) \times \right. \\
 & \times \left. \left( 1,2 \left[ \left( \frac{C_p \cdot S_o^y \cdot [\text{HB}_{\text{max}}^n \cdot t^x - \text{HB}_{\text{min}}^n (t - Wz_{\text{исх}} - Rz_{\text{исх}})^x]}{j_{\text{тс}}} \right) \cdot \left[ \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{нар}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^z - \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{отв}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^z \right] \right)^2 + \right. \\
 & + \left. \left( \frac{C_p \cdot S_o^y \cdot [\text{HB}_{\text{max}}^n \cdot t^x - \text{HB}_{\text{min}}^n (t - Wz_{\text{исх}} - Rz_{\text{исх}})^x]}{j_{\text{тс}}} \right) \cdot \left[ \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{нар}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^z - \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{отв}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^z \right] \times \right. \\
 & \times \left. \left( 1 + \cos \left[ (m-1) - \frac{180}{m} \right] \right) \right]^{1/2} \left. \right) \times \left( h_1 + \frac{C_y \cdot S^y \cdot v^z [\text{HB}_{\text{max}}^n \cdot t^x - \text{HB}_{\text{min}}^n (t - Rz_{\text{исх}})^x]}{j_{\text{тс}}} + h_3 + R_{z_{\text{вп}}} \right) \right)^{1/3} \\
 & / \left( h_1 + \frac{C_y \cdot S^y \cdot v^z [\text{HB}_{\text{max}}^n \cdot t^x - \text{HB}_{\text{min}}^n (t - Rz_{\text{исх}})^x]}{j_{\text{тс}}} + h_3 + R_{z_{\text{вп}}} \right) \right)^3.
 \end{aligned} \tag{27}$$

При этом возможно подставлять имеющиеся эмпирические зависимости для герметизирующих соединений, изготавливаемых из коррозионностойкой стали марки 08Х18Н10Т. В результате проведения серии экспериментов получены следующие эмпирические зависимости параметров качества поверхностного слоя от режимов обработки:

Для метода обработки: торцовое точение (подача на оборот –  $S = 0,05 \dots 0,3$  мм/об; скорость резания –  $v = 100 \dots 150$  м/мин; глубина резания –  $t = 0,1 \dots 0,3$  мм):

$$Wz_{\text{ноп}} = 0,79 \cdot \frac{S^{0,22} \cdot v^{0,57}}{t^{0,002}}; \quad (28)$$

$$Rz_{\text{ноп}} = 2,92 \cdot S^{0,22} \cdot v^{0,09} \cdot t^{0,02}. \quad (29)$$

Для метода обработки: торцовое точение ( $S = 0,05 \dots 0,3$  мм/об;  $v = 100 \dots 150$  м/мин;  $t = 0,5 \dots 2$  мм):

$$Wz_{\text{ноп}} = 0,4 \cdot S^{0,59} \cdot v^{0,77} \cdot t^{0,01}; \quad (30)$$

$$Rz_{\text{ноп}} = 0,99 \cdot S^{0,39} \cdot v^{0,41} \cdot t^{0,05}. \quad (31)$$

Для метода обработки: растачивание ( $S = 0,05 \dots 0,1$  мм/об;  $v = 40 \dots 100$  м/мин;  $t = 0,05 \dots 0,1$  мм):

$$Wz_{\text{ноп}} = 29,78 \cdot \frac{S^{0,12} \cdot t^{0,07}}{v^{0,03}}; \quad (32)$$

$$Rz_{\text{ноп}} = 0,04 \cdot \frac{S^{0,31} \cdot v^{0,93}}{t^{0,02}}. \quad (33)$$

Для метода обработки: обтачивание ( $S = 0,05 \dots 0,1$  мм/об;  $v = 40 \dots 100$  м/мин;  $t = 0,05 \dots 0,1$  мм):

$$Wz_{\text{ноп}} = 9,81 \cdot S^{0,12} \cdot v^{0,28} \cdot t^{0,02}; \quad (34)$$

$$Rz_{\text{ноп}} = 0,84 \cdot S^{0,60} \cdot v^{0,54} \cdot t^{0,13}. \quad (35)$$

Для определения метода обработки герметизируемых поверхностей рассматриваемого соединения применяем табличный способ. Выбираем из табл. 2, для обработки конусной поверхности детали штуцера с заданными

конструктором параметрами качества герметизирующего поверхностного слоя, метод обработки – растачивание. Из табл. 3, для обработки торцовой (сферической) герметизирующей поверхности детали ниппеля с учётом определённых конструктором параметрами качества, определяем метод обработки – обтачивание.

Обобщённые результаты экспериментальных данных взаимосвязи герметичности с режимами обработки при механических методах обработки герметизирующих металлических поверхностей (рис. 8) позволяют выявить общие закономерности. При этом наибольшее влияние на герметизирующую способность поверхности оказывает подача режущего инструмента. Увеличение подачи приводит к уменьшению герметичности. Увеличение скорости приводит к улучшению герметизирующей способности поверхности.

Таким образом, разработанная технология обеспечения герметичности разъёмных металлических соединений позволяет реализовать конструкторско-технологическую подготовку по двухступенчатой схеме. При этом возможно использование различных способов, обладающих своими преимуществами и недостатками.

Расчётный (теоретический) – обеспечивает самую высокую точность обеспечения герметичности по сравнению с другими способами. При его использовании необходимо учитывать следующие факты: он является трудоёмким в реализации и, соответственно, затратным, а также требует высокой квалификации и подготовки конструкторов и технологов.

Эмпирический – обеспечивает достаточную точность обеспечения герметичности при меньшей трудоёмкости, затратах, квалификации. Однако требует дополнительных затрат для его обеспечения, так как требует проведения реальных экспериментов и обработки их результатов для определения взаимосвязей при большом существующем разнообразии условий обработки.

Табличный – обеспечивает самую низкую трудоёмкость его применения. Однако для получения данных требует тех же самых затрат, как и для создания эмпирических зависимостей. Кроме того, допускается использование комбинации этих способов в зависимости от имеющихся исходных данных и для повышения производительности решения задач.

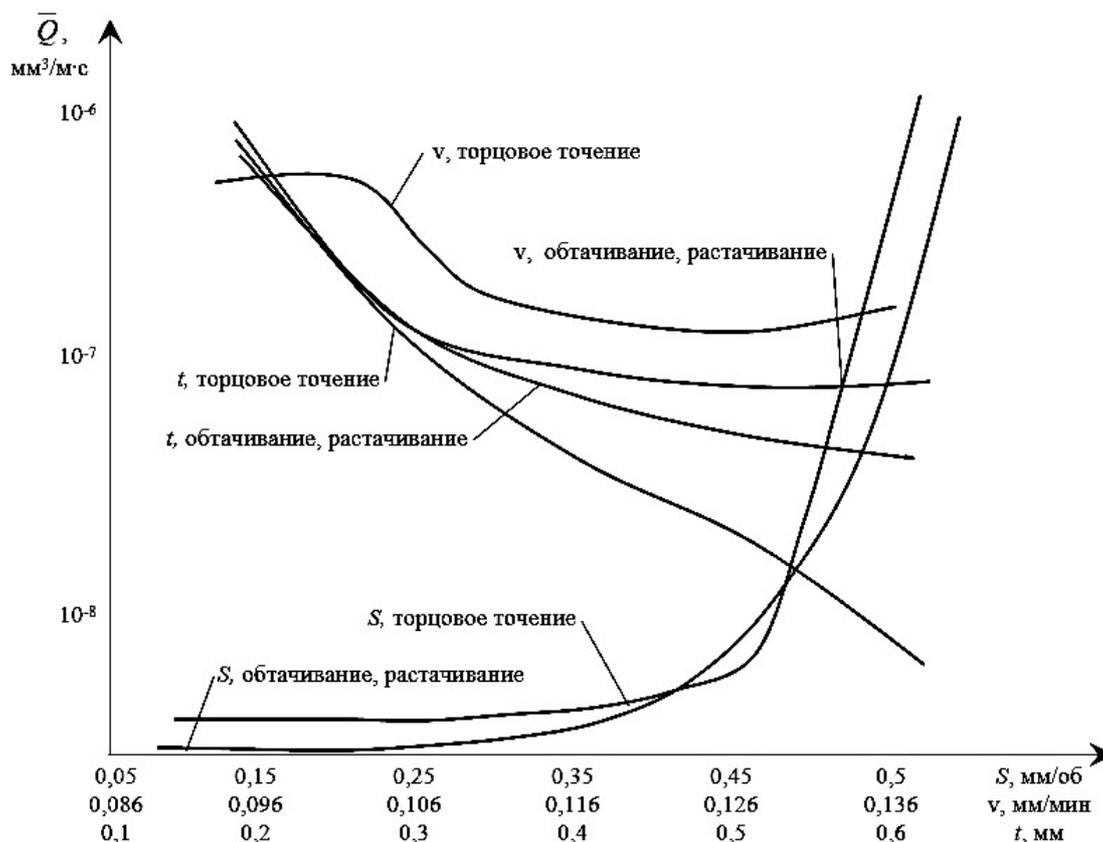


Рис. 8. Зависимость герметичности от режимов обработки при механических методах обработки герметизирующих металлических поверхностей деталей машин

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Качество машин:** Справочник. В 2 т. Т. 1 / Под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 1995. – 253 с.
2. **Рыжов, Э.В., Сулов, А.Г., Федоров, В.П.** Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. – М.: Машиностроение, 1979. – 173 с.
3. **Сулов, А.Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 203 с.
4. **Сулов, А.Г., Дальский, А.М.** Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
5. **Дальский, А.М., Сулов, А.Г., Назаров, Ю.Ф.** Технология изготовления деталей машин. Т. 3 / Под общ. ред. А.Г. Сулова. – 2000. – 840 с.
6. **Угинчус, А.А.** Гидравлика и гидравлические машины: 4-е изд. перераб. и допол. – Харьков: Харьковский университет, 1970. – 394 с.
7. **Пинчук, Л.С.** Герметология. Минск: Навука і тэхніка, 1992. – 216 с.
8. **Кармугин, Б.В., Стратиневский, Г.Г., Мендельсон, Д.А.** Клапанные уплотнения пневмо-гидроагрегатов – М.: Машиностроение, 1983. – 151 с.
9. **Сулов, А.Г., Ерёманкова, И.В.** Нормализованный метод определения герметичности неподвижных соединений // Контроль. Диагностика. – 2006. – № 2. – С. 12-16.

10. **Голуб, В.М.** Повышение износостойкости и герметичности контактных колец пар трения торцовых уплотнений / Автореф. канд. тех. наук – Гомель: ГНУ «Института механики металлополимерных систем им. В.А. Белого», 2000. – 22 с.

11. **Сулов, А.Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.

12. **Сулов, А.Г., Горленко, О.А.** Экспериментально-статистический метод обеспечения качества поверхности деталей машин. – М.: Машиностроение -1, 2003. – 302 с.

13. **Ерёманкова, И.В.** Технологическое обеспечение герметичности неподвижных разъёмных соединений по двухступенчатой схеме организации производства // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2021. – №1 (115). – С. 24-33

14. **Сулов, А.Г.** Технологическое обеспечение контактной жесткости соединений. – М.: Наука, 1977. – 100 с.

## REFERENCES

1. *Machine Quality*: Reference Book. In 2 Vol., Vol1. /under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 1995. – pp. 253.

2. Ryzhov, E.V., Suslov, A.G., Fyodorov, V.P. *Technological Support of Machinery Operation Properties*. – M.: Mechanical Engineering, 1979. – pp. 173.

3. Suslov, A.G. *Technological Support of State Parameters in Parts Surface Layer*. – M.: Mechanical Engineering, 1987. – pp. 203.

4. Suslov, A.G., Dalsky, A.M. *Scientific Fundamentals of Engineering Techniques*. – M.: Mechanical Engineering, 2002. – pp. 684.

5. Dalsky, A.M., Suslov, A.G., Nazarov, Yu.F. *Technology of Machinery Manufacturing*. Vol.3 / under the general editorship of A.G. Suslov. – 2000. – pp. 840.

6. Uginchus, A.A. *Hydraulics and Hydraulic Machines*: 4-th edition revised and supplemented. – Kharkov: Kharkov University, 1970. – pp. 394.

7. Pinchuk, L.S. *Hermetology*. Minsk: Science and Engineering, 1992. – pp. 216.

8. Karmugin, B.V., Stratinevsky, G.G., Mendelson, D.A. *Valve Sealing of Pneumatic Hydro-units* – M.: Mechanical Engineering, 1983. – pp. 151.

9. Suslov, A.G., Yeryomenkova, I.V. Normalized method for impermeability definition in fixed joints // *Control. Diagnostics*. – 2006. – No. 2. – pp. 12-16.

10. Golub, V.M. Increase of wear-resistance and impermeability in contact rings of friction couples of face sealing / *Author's Abstract for Can. Sc. Tech. degree* – Gomel: GNU of “Bely Institute of Mechanics and Metal Polymeric Systems”, 2000. – pp. 22.

11. Suslov, A.G. *Machinery Surface Layer Quality*. – M.: Mechanical Engineering, 2000. – pp. 320.4. Bishutin, S.G. *Parts Surface Layer Structuring at Finish Abrasion*. – Bryansk: BSTU, 2009. – pp. 100.

12. Suslov, A.G., Gorlenko, O.A. *Experimental and Statistical Method to Ensure Machine Surface Quality*. – M.: Mechanical Engineering – 1, 2003. – pp. 302.

13. Yeryomenkova, I.V. Technological support of impermeability in fixed split joints through two-stage circuit of production organization // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2012. – No. 1(115). – pp. 24-33.

14. Suslov, A.G. *Technological Support of Contact Stiffness in Joints*. – M.: Science, 1977. – pp. 100.

Рецензент д.т.н.  
Михаил Геннадьевич Шалыгин

