

УДК: 62-762: 621.818

DOI: 10.30987/1999-8775-2021-10-27-37

А.А. Татарканов, И.А. Александров, М.С. Михайлов, А.Н. Муранов

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ ГЕРМЕТИЧНОСТИ КОНТАКТНЫХ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ

Проанализированы перспективы прикладного применения математико-алгоритмического обеспечения для исследования герметизирующей способности контактных уплотнительных соединений запорной арматуры. Актуальность исследования связана с задачей уменьшения затрат временных и материальных ресурсов на стадии проектирования и экспериментальной отработки.

Приведен анализ методов определения герметичности, математический аппарат для опреде-

ления контактных давлений. Разработан алгоритм оценки данных параметров, который может быть реализован в виде программного обеспечения для ЭВМ.

Ключевые слова: герметизирующая способность, соединение, арматура, шаровой кран, трубопроводная система, математическое моделирование, модель, шероховатость.

A.A. Tatarkanov, I.A. Aleksandrov, M.S. Mikhailov, A.N. Muraniv

DEVELOPMENT OF ALGORITHM FOR AUTOMATED ASSESSMENT OF THE TIGHTNESS OF CONTACT SEALING CONNECTIONS OF ISOLATION VALVES

The paper analyzes the prospects for using applied mathematical and algorithmic support for the study of the sealing ability of contact sealing connections of isolation valves. To ensure the operability of the equipment, it is necessary to determine the required level of sealing forces (contact pressures) that affect the weight and size characteristics of the product. The relevance of the study is related to the task of reducing the amount of time and material resources at the stage of design and experimental testing of pipeline fittings. The purpose of this work is to develop methods for automated assessment of the tightness of contact sealing connections to develop proposals for reducing the required level of contact pressures and weight and size characteristics of isolation valves. The paper presents an overview and analytical study of methods for determining the tightness of contact sealing connections,

as well as a mathematical apparatus for modeling surface irregularities and defining sealing characteristics of isolation valve connections. An algorithm for evaluating these parameters has been developed, which modules can be further implemented as software for automating the assessment of the tightness of contact sealing connections at various stages of designing isolation valves. The developed algorithm makes it possible to filter out irrelevant sets of design parameters at the early stages of design without the need for their experimental verification, which will reduce the total amount of time and material resources in the development of isolation valves of pipelines.

Key words: sealing ability, connection, pipeline fitting, ball valve, pipeline system, mathematic simulation, model, roughness.

Введение

Обеспечение заданных показателей герметичности и долговечности, которая в свою очередь представляет собой способность конструкции длительно сохранять герметичность на протяжении срока эксплуатации при установленном техническом обслуживании, является одним из основных требований при проектировании запорной арматуры трубопроводов [1-3].

В общем случае образование утечки через уплотнительные соединения зависит от множества факторов, включающих: свойства материалов контактирующих поверхностей, режимы и виды технологической обработки, наличие и свойства покрытий, характеристики герметизируемой среды, размеры и разветвленность микроканалов, контактные усилия в стыке и т.д. Таким образом, задача определения меха-

низма утечки требует комплексного рассмотрения вопросов физико-химии поверхностных явлений и течения через каналы с произвольным поперечным сечением. При этом процесс проектирования можно рассматривать как определение основной концепции на основе требования технического задания и дальнейшую оптимизацию параметров конструкции на основе выбранного способа перекрытия потока рабочей среды, метода герметизации, типа привода и т.д. [3].

В этой связи стоит также отметить, что при проектировании к конструкции запорной арматуры предъявляются зачастую противоречивые требования, такие как: обеспечение минимальных массогабаритных характеристик при заданном уровне прочности и надежности, обеспечение минимальной скорости срабатывания при ограничении мощности привода и минимальных динамических нагрузках, минимально возможная себестоимость при обеспечении заданного функционала, долговечности, эстетичности и т.д.

Помимо этого, на практике зачастую достаточно затруднительно сформулировать корректную математическую задачу, учитывающую описанный выше комплекс противоречивых требований. Поэтому в условиях производства, как правило, ин-

женер-конструктор, ответственный за разработку, проводит анализ существующих решений и определяет ряд альтернативных вариантов, для которых проводятся соответствующие расчеты, и на основе результатов формируется эскизный проект изделия, который затем рассматривается коллективом экспертов предприятия и в дальнейшем прорабатывается детальнее на последующих стадиях проектирования. При этом значительные временные и материальные ресурсы закладываются на этап экспериментальной отработки, поскольку требуется проведение серии испытаний для определения влияния различных параметров на функционал прототипа изделия, в том числе в аварийных условиях.

Для уменьшения данных затрат целесообразно разработать методику автоматизированной оценки герметичности контактных уплотнительных соединений и выработки перечня предложений для уменьшения требуемого уровня контактных давлений и соответственно массогабаритных характеристик изделия. Изучение данных вопросов с формированием по итогу исследования алгоритма оценки герметичности и контактных давлений в запорной арматуре является целью настоящей работы.

Анализ методов оценки герметичности запорной арматуры

Все многообразие существующих методов определения герметичности контактных уплотнительных соединений можно разделить на: теоретические, которые опираются на построение физико-математических моделей на основе ряда допущений; эмпирические, соответственно основанные на экспериментальном определении характеристик герметичности конкретных конструкций уплотнительных соединений; и теоретико-эмпирические, использующие теоретически обоснованные зависимости, для которых ряд коэффициентов определяется экспериментально.

Основой теоретических методов является построение модели шероховатой поверхности. С этой точки зрения можно выделить следующие основные модели: на

основе теории случайных функций, дискретную, фрактальную и дискретно-фрактальную.

Областью применения модели в виде нормального случайного поля является описание поверхности после абразивной обработки, чистовой с использованием лезвийных инструментов, выглаживания и т.д. [4]. Среди недостатков модели можно выделить погрешности ввиду отсутствия учета взаимного влияния неровностей, которое особенно актуально при высокой плотности пятен контакта.

Также широкое распространение при оценке герметичности получила дискретная модель шероховатости, которая описывает неровность поверхности на основе параметров начального участка кривой опорной поверхности. Однако для тяжело-

нагруженных соединений данная модель дает погрешности, связанные как раз с применением только начального участка опорной поверхности. Также к недостаткам можно отнести зависимость метода от данных, полученных с использованием измерительных инструментов, которые могут варьироваться при изменении длины выборки и разрешающей способности используемого оборудования [5].

Фрактальная модель, основанная на применении функции Вейерштрасса-Мандельброта, фильтрации Фурье и среднего смещения для моделирования микрогеометрии поверхности, стала активно использоваться в последние десятилетия [6, 7]. Преимуществом данного метода является неизменность параметров на разных уровнях масштабирования. Однако некоторая сложность в данном случае заключается в нетривиальности аппарата определения фрактальной размерности, для чего необходимо использовать метод нормированного размаха, спектральной мощности, максимумов модулей вейвлет-преобразования или геометрический метод. Соответственно полученные результаты могут варьироваться в зависимости от точности определения параметров применяемыми методами.

Фрактально-дискретная модель, в свою очередь, была разработана для повышения точности классической дискретной модели [1]. Как и в классической дискретной модели неровности представляются в виде одинаковых сегментов сферической формы, которые распределяются по высоте в соответствии с кривой опорной поверхности, для описания которой, в свою очередь, и используется аппарат фрактальной модели. Данная модель обладает достаточной точностью и используется на этапе проектирования для генерации поверхностей с заданными параметрами и исследования их влияния на характеристики герметичности.

В целом к недостаткам теоретических методов можно отнести: сложность непосредственной связи исходных параметров проектирования и требуемой величины контактного давления, а также ограничение по точности оценки реальных па-

раметров изделия ввиду применяемых допущений. Тем не менее на основе теоретических методов возможно получение зависимостей утечки от параметров шероховатости и микрозазоров контактирующих поверхностей [8].

С другой стороны, несмотря на то, что результаты, полученные экспериментальными методами, однозначно подтверждают работоспособность конструкций, для которых были проведены соответствующие испытания, их применение для других типов конструкций, также, как и использование полученных результатов при проектировании новых конструкций уплотнительных соединений, весьма ограничено. Помимо этого, стоит учитывать зависимость результатов от конкретных методов контроля герметичности, применяемых при экспериментальной обработке изделий, и сложность получения зависимостей влияния различных факторов на параметры утечки и контактное давление ввиду высокой стоимости требуемой для этого серии испытаний, а также, как следствие предыдущего фактора, изменение фактических результатов при условиях, отличных от испытанных, и соответственно сложность прогнозирования работы устройств в аномальных условиях.

К теоретическо-эмпирическим методам определения герметичности контактных уплотнительных соединений относятся: приведенный (средний) зазор, проницаемость пористого тела, набор капилляров, перколяционные и конечно-элементные модели.

Метод среднего зазора основан на представлении стыка уплотнительных поверхностей в виде эквивалентного зазора и расчета утечки с использованием закона Пуазейля [9, 10], который связывает расход жидкости с перепадом давления для случая ламинарного течения жидкости в тонкой цилиндрической трубе. При этом задача сводится к определению параметров среднего зазора на основе параметров контактирующих поверхностей, макроотклонений и волнистости. Однако данный метод приводит к погрешностям при оценке герметичности в уплотнительных соединениях с высоким контактным давле-

нием поскольку в этом случае увеличивается извилистость микроканалов и соответственно требуется введение в модель течения в каналах, отличных от чисто радиальных.

При оценке герметичности стыка за счет определения проницаемости пористого тела используется уравнение Козени-Кармана, связывающее параметры проницаемости, пористости, извилистости и удельной площади поверхности. При этом используется ряд допущений соответствующих простой модели идеальной пористой среды в виде пучка капилляров и вводится дополнительный параметр, зависящий от структуры среды и называемый постоянной Козени-Кармана. Принятые в данной модели допущения ограничивают область ее применения, так, например, значительные погрешности имеют место при наличии структурных трещин. Также, стоит отметить, что для определения параметра извилистости зачастую необходимо проведение дополнительных экспериментов [11].

Одной из первых отечественных работ в области определения герметичности уплотнительных соединений в арматуре высоких давлений принято считать монографию [12] Киселева П.И., опубликованную в 1950 г. издательством «Госэнергоиздат», в которой утечка через зазоры между затвором и седлом определялась как расход среды через радиально расположенные капиллярные трубки. Тем не менее при определении зависимости утечки от контактного давления данным методом возможны погрешности, так как при вычислениях не рассматриваются доля тупиковых капилляров, изолированные объемы и распределение размеров капилляров.

Суть метода перколяционных моделей заключается в определении значения

контактного давления, обеспечивающего гарантированную герметичность за счет перекрытия всех микроканалов и образования замкнутого контура в стыке. Однако на основе данного подхода невозможно проводить количественную оценку герметичности при меньших значениях контактного давления. Таким образом, за исключением особо ответственных агрегатов, применение метода весьма ограничено. Помимо этого, для проведения вычислений необходимо знать зависимость контактного давления от относительной площади контакта [13].

В конечно-элементной модели профиль шероховатости получают с реальных изделий путем сканирования поверхности профилографами-профилометрами и последующей математической обработки результатов с помощью специального программного обеспечения на ЭВМ, кроме того для этих целей могут быть использованы другие специализированные приборы для оценки микротопографии представительных элементов поверхности детали, такие, например, как сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ). Полученные таким образом данные о профилях шероховатости в дальнейшем могут быть использованы для расчета характеристик контактирующих поверхностей. Таким образом, данный метод может давать достаточно точные результаты при наличии базы образцов и данных об условиях эксплуатации. К преимуществам данного метода можно отнести возможность учета как волнистости, так и шероховатости поверхности. Однако для получения обоснованного результата необходимо знание топографии сопрягаемых поверхностей, которое может быть получено путем экспериментальных измерений [14-16].

Математический аппарат оценки значений контактного давления, для обеспечения заданных показателей герметичности

Как показано в работах исследователей Братского государственного университета [1, 3, 5] условие обеспечения заданной

интенсивности утечки трубопроводной арматуры можно представить в следующем виде:

$$Q_l = \frac{R_{max}^3 p^2 C_{u0}}{4\mu l \int_{-1}^1 \exp(2,3(k_{0i} k_r \theta q_n(X) - b_{0i})) dX}, \quad (1)$$

где Q_l – интенсивность утечки через уплотнительный стык; R_{max} – максимальная высота неровностей; p – давление герметизируемой среды; μ – вязкость герметизируемой среды; C_{u0} – значение C_u при $F_q = 0$; в свою очередь, C_u – безразмерный вязкостный функционал проницаемости; F_q – безразмерный комплексный упругогеометрический силовой параметр; l – ширина зоны уплотнения; $k_r = a_c / (\omega R_{max})$; $a_c = \sqrt{A_{ci} / \pi}$; A_{ci} – площадь, приходящаяся на отдельную неровность; ω – относительная высота неровностей; θ – упругая характеристика; $q_n(X)$ – распределение контактного давления; ось X – перпендикулярна нормали в зоне контакта; k_{0i}, b_{0i} – параметры аппроксимации зависимости $lg(C_u / C_{u0}) - F_q$ для стыка двух шероховатых поверхностей $lg(C_u / C_{u0}) = b_{0i} - k_{0i} F_q$, $i = 1; 2$.

При этом герметизирующая способность уплотнительного стыка характеризуется безразмерным вязкостным функционалом проницаемости, который зависит от контактного давления, параметров микрогеометрии контактирующих поверхностей и определяется следующим образом:

$$C_u = \frac{\Lambda^3 K_f v_k}{4(1 - \eta)^2}, \quad (2)$$

где Λ – плотность зазоров в стыке; K_f – коэффициент учета потерь, связанных с конструктивными особенностями (при расчете для обеспечения запаса приравнивается к единице); v_k – доля эффективных микроканалов; η – относительная площадь контакта.

В свою очередь степень нагружения уплотнительного стыка характеризуется безразмерным комплексным упругогеометрическим силовым параметром, который определяется следующим образом:

$$F_q = \frac{\theta q_c a_c}{\omega R_{max}}, \quad (3)$$

где $\theta = 1/E^*$ – упругая характеристика; $E^* = E_1 / (1 - \mu_1^2) + E_2 / (1 - \mu_2^2)$; а E_1, E_2, μ_1, μ_2 в свою очередь характери-

сти упругости (модули упругости и коэффициенты Пуассона) материалов контактирующих поверхностей; q_c – контурное давление в стыке.

Анализируя вид зависимости $lg(C_u / C_{u0}) - F_q$ становится наглядным наличие нескольких уровней герметизации: начальной (F_q от 0 до 0,06), когда изменение значения F_q приводит к изменению C_u на порядок; стабильной (F_q от 0,06 до 0,427), при которой значение C_u изменяется уже на два порядка; и эффективной ($F_q > 0,427$), когда соответственно C_u изменяется на несколько порядков.

Точность расчетов возможно повысить при использовании интегрального показателя следующего вида:

$$K = \int_0^{\epsilon_s} \frac{\Lambda_i^3(u) v_{0i}(u)}{4(1 - \eta_i(u))^2} \varphi'_n(u) du, \quad (4)$$

где Λ_i – плотность зазоров, а η_i – относительная площадь контакта отдельной неровности; $\varphi'_n(u)$ – плотность распределения неровностей по высоте; $v_{0i}(u) = 1$, если $\eta_i(u) < \eta_c$, $v_{0i}(u) = 0$, если $\eta_i(u) \geq \eta_c$, где η_c – критическое значение $\eta_i(u)$.

За счет введения вспомогательной функции $v_{0i}(u)$ удается исключить из расчета неровности, через площадки A_{ci} которых не происходит утечка среды.

Соответственно для определения доли эффективных микроканалов стык представляют в виде плоской перколяционной модели:

$$v_{0i} = \begin{cases} 0, \eta_i < \eta_c; \\ 1, \eta_i > \eta_c; \end{cases} \quad (5)$$

$$v_k = \int_0^{\epsilon_s} v_{0i} \varphi'_n(u) du$$

Далее необходимо рассмотреть варианты в зависимости от отношения размера единичной неровности S к размеру перколяционной модели $l = nS$.

В случае, если $l \gg S$ вероятность утечки через решетку плоской перколяционной модели под действием разности давлений выражается как:

$$x_i = 1 - 2v_k^2. \quad (6)$$

В случае, если l соразмерен S вероятность утечки определяется из следующей

$$x_n = \begin{cases} (1 - v_k), v_k < \frac{1}{3}; \\ 0,5(1 - v_k)(1 + 3^{n-1}(1 - v_k)^{n-1}), \frac{1}{3} \leq v_k < \frac{1}{2}; \\ 0,5(1 - v_k)^n(2^{n-1} + 3^{n-1}), v_k \geq \frac{1}{2}. \end{cases} \quad (7)$$

Объем межконтактного пространства стыка в целом определяется путем суммирования объемов пространства между от-

$$V_c = \sum_{i=1}^{n_r} V_{ri} + \sum_{i=1}^{n_c-n_r} V_{oi}, \quad (8)$$

где V_{ri} , V_{oi} – объем пространства между отдельными контактирующими и не контактирующими неровностями соответственно, а n_c и n_r – количество неровно-

го выражения:

дельными неровностями, которые могут как находиться в контакте, так и не контактировать:

стей соответственно общее и только контактирующих.

Тогда, учитывая что $V_{ri} = A_{ci}R_{max}\Lambda_{ri}$ и $V_{oi} = A_{ci}R_{max}\Lambda_{oi}$, имеем:

$$\begin{aligned} \Lambda(\varepsilon) &= \frac{V_c}{A_c R_{max}} = \frac{1}{A_{ci} R_{max}} \left[\int_0^{\min(\varepsilon, \varepsilon_s)} V_{ri} \varphi'_n(u) du + \int_{\min(\varepsilon, \varepsilon_s)}^{\varepsilon_s} V_{oi} \varphi'_n(u) du \right] = \\ &= \int_0^{\min(\varepsilon, \varepsilon_s)} \Lambda_{ri} \varphi'_n(u) du + \int_{\min(\varepsilon, \varepsilon_s)}^{\varepsilon_s} \Lambda_{oi} \varphi'_n(u) du, \end{aligned}$$

где ε_s относительное сближение при котором $\varphi_n(\varepsilon_s) = 1$.

При использовании уравнения неровности и уравнения деформации полупространства от давления $q_r(p)$ получаем:

$$\Lambda_{oi} = \omega \left(\frac{1}{2} - \frac{\varepsilon - u}{\omega} \right); \quad (9)$$

$$\Lambda_{ri} = \omega \left[(1 - \eta_i) \left(\frac{1 + \eta_i}{2} - \frac{\varepsilon - u}{\omega} \right) + \frac{8\eta_i^{1,5}}{3\pi} \left({}_2F_1 \left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; \frac{5}{2}; \eta_i \right) - \frac{9\pi}{16} \eta_i^{0,5} \right) \right]. \quad (10)$$

Исключив параметр ε из выражений для $\Lambda(\varepsilon)$ и $F_q(\varepsilon)$ можно получить зависимость $\Lambda(F_q)$.

Средние значения площади и периметра сечения микроканала на единицу длины профиля определяются следующим образом:

$$F = V_c / A_c = R_{max} \Lambda, \quad \Pi = 2(1 - \eta)$$

Разработка алгоритма оценки усилий, необходимых для обеспечения заданной герметичности контактных уплотнительных соединений запорной арматуры

На основе проведенного анализа методов оценки герметичности запорной арматуры и приведенного математического аппарата был разработан алгоритм оценки усилий, необходимых для обеспечения заданного уровня герметичности контактных уплотнительных соединений (рисунок 1), отдельные модули которого могут быть в дальнейшем реализованы в виде программного обеспечения для ЭВМ.

Предлагаемый алгоритм включает следующие этапы: анализ имеющейся тех-

нической документации на изделие – технического задания, конструкторской и технологической документации, паспорта изделия и т.д.; формирование на основе имеющихся данных перечня требуемых параметров изделия – класса герметичности, условий эксплуатации, включая параметры рабочей и окружающей сред, конструктивные параметры и т.д.; далее в случае наличия прототипа конструкции или реального изделия проводится экспериментальное измерение параметров шеро-

ховатости сопрягаемых поверхностей запорной арматуры профилографом/профилометром, которые в последствии используются при вычислении искомых параметров герметичности и контактных давлений; в случае отсутствия прототипа используются имеющиеся данные о геометрических параметрах конструкции и планируемом технологическом процессе изготовления изделия, включая конструкционные материалы, а также тип и параметры инструментальной обработки рабочих поверхностей, на основе которых определяются параметры шероховатости и вычисляются искомые параметры герметичности и контактных давлений; в случае отсутствия и этих данных, что может быть на ранних этапах проектирования, для вычисления параметров шероховатости могут использоваться теоретические модели, рассмотренные в выше, либо могут быть использованы справочные данные по имеющимся аналогам разрабатываемой конструкции; для вычисления значения контактного давления, необходимого для обеспечения заданных норм герметичности, предварительно вычисляются безразмерный коэффициент проницаемости C_u и комплексный силовой упругогеометрический параметр F_q на основе математической представленной модели; далее формируется перечень рекомендаций по уменьшению необходимой величины контактных давлений за счет изменения технологического процесса, например, типа или параметров инструментальной обработки, использования покрытий, в частности полимерных, с определением требуемой толщины покрытия, изменения конструкционных материалов или параметров самой конструкции с оценкой значений проектных характеристик, которая может быть осуществлена либо экспертной комиссией предприятия либо программным обеспечением с выбором точек в многомерном пространстве проектных параметров с помощью равномерно распределенных ЛПт-последовательностей, обеспечивающих достаточную равномерность исследования пространства параметров при сравнительно небольшом числе испытаний.

Подробнее в данном контексте следует рассмотреть последний модуль алгоритма. Для определения оптимальных параметров конструкции необходимо провести математическое моделирование контактирования шероховатых поверхностей, напряженно-деформированного состояния в области контакта, массопереноса через стык сопрягаемых поверхностей и т.д. Исходными параметрами для проектирования являются: требуемый номинальный диаметр, нормы утечки, параметры рабочей среды (давление, вязкость, температура), параметры окружающей среды (давление и температура), другие требования к характеристикам изделия. Задача формулируется как определение набора конструктивных параметров изделия, при которых обеспечиваются требуемые значения герметичности, прочности и долговечности за счет минимальных контактных давлений, что в свою очередь позволяет уменьшить общие массогабаритные характеристики изделия. Для этого производится выбор набора значений проектных параметров в многомерном пространстве на основе равномерно распределенных ЛПт-последовательностей. При выборе определенного количества (n) пробных точек, в пространстве возможных комбинаций параметров каждому придается соответствующее количество (n) отличных друг от друга значений, которые расположены квазиравномерно. Перед этим необходимо ввести ограничения на возможные значения параметров, которые определяются на основе анализа технических требований и производственных возможностей предприятия-изготовителя. При этом необходимо проводить проверку решаемости задачи с учетом принятых ограничений и в случае необходимости корректировать условия задачи. Для каждого набора исходных параметров определяются усилия герметизации, требуемые для обеспечения заданных норм утечки. В качестве целевой функции выступает удельное усилие герметизации, которое необходимо минимизировать. На основе проведенного анализа составляются таблицы значений параметров, которые удовлетворяют основным требованиям. При этом ранжирование наборов параметров в

таблицах значений осуществляется по величине интенсивности нагрузки. Далее для данных наборов параметров вычисляются критерии качества по показателям долговечности и минимальной стоимости.

Окончательное решение о выборе конструкции осуществляется ответственными за проект сотрудниками предприятия-изготовителя на основе представленного анализа.

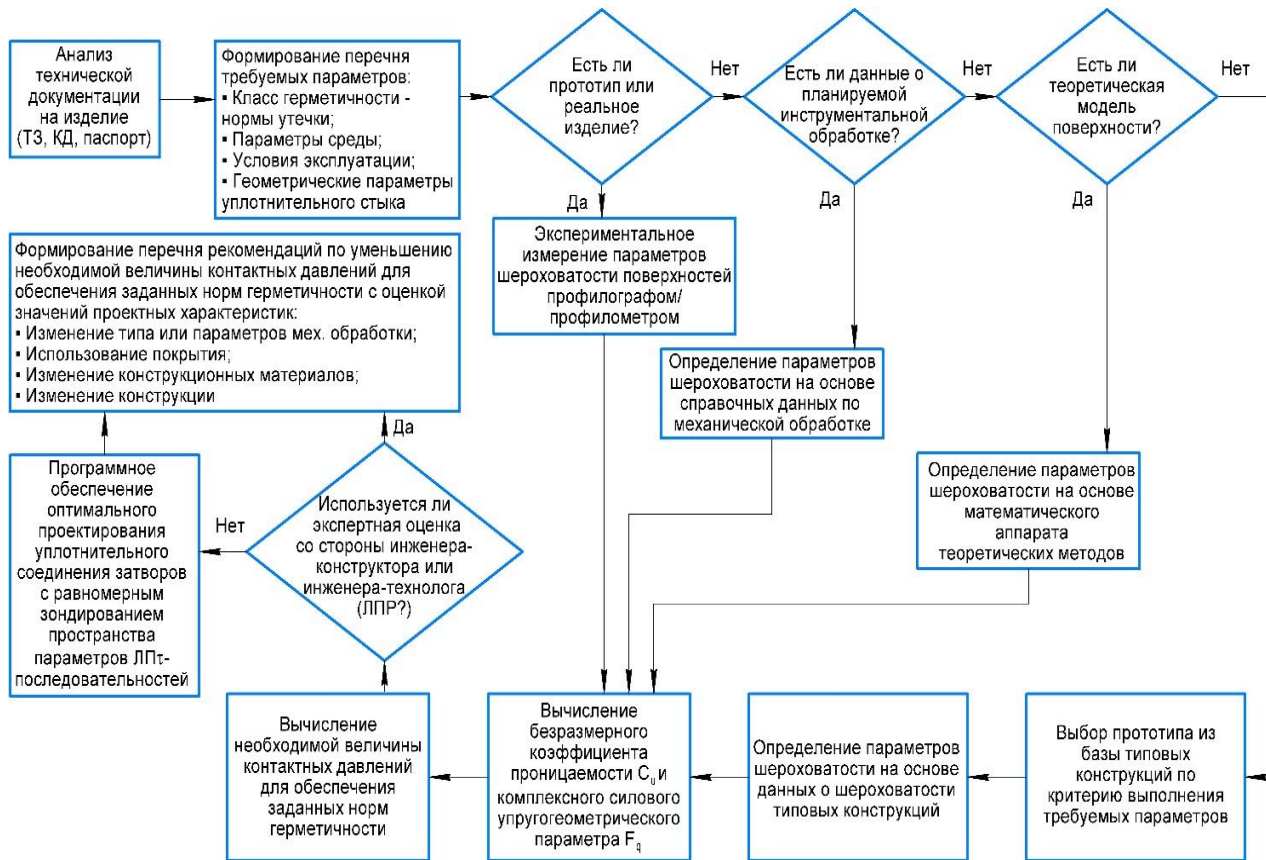


Рисунок. Схема алгоритма оценки герметичности заполной арматуры

Заключение

В рамках данной работы проведено обзорно-аналитическое исследование существующих методов оценки герметичности контактных уплотнительных соединений запорной арматуры трубопроводов. Указано, что экспериментальные методы хотя и подтверждают однозначно работоспособность конкретных конструкций имеют ограниченное приложение на ранних стадиях проектирования новых конструкций уплотнительных соединений, поскольку имеется зависимость результатов от конкретных методов контроля герметичности, применяемых при экспериментальной отработке изделий. Также сложность представляет получение зависимостей влияния различных факторов на параметры утечки и требуемое контактное давление ввиду высокой стоимости испы-

таний и, как следствие предыдущего фактора, изменение фактических результатов при условиях, отличных от испытанных, и соответственно сложность прогнозирования работы устройств в аномальных условиях. В тоже время теоретические методы, основой которых является построение модели шероховатой поверхности, ограничены по точности оценки реальных параметров изделия ввиду применяемых допущений. В данном случае сложность представляет установление связи исходных параметров проектирования и требуемой величины контактного давления. Однако на основе данных методов возможно определить зависимость величины утечки от параметров шероховатости и микрозоров контактирующих поверхностей. Проведен анализ моделей на основе теории случай-

ных функций, дискретной, фрактальной и фрактально-дискретной с указанием преимуществ и недостатков данных методов. Аналогично проведен анализ существующих теоретико-эмпирических методов, включающих приведенный (средний) зазор, проницаемость пористого тела, набор капилляров, перколяционные и конечно-элементные модели. Показано применение данных методов в рамках математико-алгоритмическое обеспечение моделирования неровностей поверхностей и определение герметизирующей способности

уплотнительных соединений. Разработан алгоритм оценки данных параметров, отдельные модули которого могут быть в дальнейшем реализованы в виде программного обеспечения для ЭВМ с целью автоматизации оценки герметичности контактных уплотнительных соединений на различных стадиях проектирования запорной арматуры и выработки перечня предложений для уменьшения требуемого уровня контактных давлений и соответственно массогабаритных характеристик изделия.

Отдельные результаты настоящей работы получены в рамках работ по Соглашению о предоставлении субсидии от 14 декабря 2020 года № 075-11-2020-032 (идентификатор государственного контракта – 000000S207520RNU0002) по теме: «Разработка и организация высокотехнологичного производства запорной арматуры для нужд специальной и медицинской техники с повышенной надежностью и долговечностью на основе применения многокомпонентных нанокompозитных материалов» с Министерством науки и высшего образования РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горохов, Д. Б.** Программный комплекс для оптимального проектирования затворов трубопроводной арматуры / Д. Б. Горохов, В. К. Елсуков, С. В. Герасимов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2017. – Т.2. – С. 129-133.
2. **Yun, F.** Analysis of Sealing and Leakage Performance of the Subsea Collet Connector with Lens-Type Sealing Structure / F. Yun, G. Wang, Z. Yan, P. Jia, X. Xu, L. Wang, H. Sun, W. Liu // Journal of Marine Science and Engineering. – 2020. – V. 8(6). – № 444. – 21 p. - DOI: 10.3390/jmse8060444.
3. **Огар, П. М.** Системный подход к проблеме оптимального проектирования герметизирующих устройств / П. М. Огар, В. А. Тарасов, И. И. Корсак // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – №. 4(16). – С. 86-92.
4. **Остапчук, А. К.** Оценка профиля шероховатости поверхности при выглаживании термупроченных сталей / А. К. Остапчук // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2016. – №1(29). – С. 30-39. - DOI: 10.20291/2079-0392-2016-1-30-39.
5. **Горохов, Д. Б.** Контактные характеристики при разгрузке предварительно нагруженного неподвижного уплотнительного соединения / Д. Б. Горохов, А. С. Ступин // Механика XXI века. – 2015. – №. 14. – С. 68-81.
6. **Feng, X.** Prediction of Leakage Rates Through Sealing Connections with Metallic Gaskets / X. Feng, B. Gu, P. Zhang // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing. – 2018. – V. 199. – №. 3. – Article No. 032090. – 7 p. - DOI: 10.1088/1755-1315/199/3/032090.
7. **Тихомиров, В. П.** Протекание через торцовое уплотнение с учетом волнистости и шероховатости / В. П. Тихомиров, М. А. Измеров // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – №4 (52). – С. 83-93. - DOI: 10.12737/23169.
8. **Xu, Y.** Statistical models of nearly complete elastic rough surface contact-comparison with numerical solutions / Y. Xu, R. L. Jackson // Tribology International. – 2017. – V. 105. – Pp. 274-291. - DOI: 10.1016/j.triboint.2016.10.003.
9. **Шатинский, В. Ф.** Исследование герметичности металлических уплотнений арматуры для жидких и газообразных сред / В. Ф. Шатинский, М. С. Гойхман, Р. Н. Гарлинский // Химическое и нефтяное машиностроение. - 1975. - №8. - С. 33-34.
10. **Казеев, В. Г.** Герметичность транспортных упаковочных комплектов / В. Г. Казеев, Г. С. Рубан, Р. Х. Сулейманов, В. Ш. Хакимзянов // Атомная энергия. – 2006. – Т. 100. – №. 6. – С. 432-437.
11. **Шишкин, С. В.** Расчет на герметичность фланцевых соединений / С. В. Шишкин, С. С. Шишкин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – №. 3. – С. 75-82.
12. **Киселев, П. И.** Основы уплотнений в арматуре высоких давлений / П. И. Киселев. – М.-Л.: Госэнергоиздат. – 1950. – 124 с.
13. **Jianjun, S.** A leakage channel model for sealing interface of mechanical face seals based on percolation theory / S. Jianjun, M. Chenbo, L. Jianhua, Yu. Qiuping // Tribology International. – 2018. – V. 118. – Pp. 108-119. - DOI: 10.1016/j.triboint.2017.09.013.

14. **Порошин, В. В.** Программный модуль для расчета герметичности торцевых осесимметричных уплотнений на основе конечноэлементной модели / В. В. Порошин, Д. Ю. Богомолов, В. Ю. Радыгин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2008. – №.3(19). – С. 76-84.
15. **Jiang, J.** Numerical investigation on sealing performance of drainage pipeline inspection gauge crossing pipeline elbows / J. Jiang, H. Zhang, B. Ji, F. Yi, F. Yan, X. Liu // Energy Science & Engineering. – 2021. – V.00. - №1– 14 p. - DOI: 10.1002/ese3.955.
16. **Krishna, M. M.** A study on the sealing performance of bolted flange joints with gaskets using finite element analysis / M. M. Krishna, M. S. Shunmugam, N. S. Prasad // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2007. – V. 84. – №. 6. – Pp. 349-357. - DOI: 10.1016/j.ijpvp.2007.02.001.
1. **Gorokhov, D.B., Elsukov, V.K., Gerasimov, S.V.** Software Package for Optimal Design of Pipeline Valves. *Trudi Bratskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Proceedings of the Bratsk State University], 2017, vol. 2, pp. 129-133.
2. **Yun, F., Wang, G., Yan, Z., Jia, P., Xu, X., Wang, L., Sun, H., Liu, W.** Analysis of Sealing and Leakage Performance of the Subsea Collet Connector with Lens-Type Sealing Structure. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, vol. 8(6), no. 444. 21 p.
3. **Ogar, P.M., Tarasov, V.A., Korsak, I.I.** A Systematic Approach to the Problem of Optimal Design of Sealing Devices. *Systems. Methods. Technologies*, 2012, no. 4(16), pp. 86-92.
4. **Ostapchuk, A.K.** Evaluation of the Roughness Profile of the Surface When Smoothing Hardened Steels. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*, 2016, no. 1(29), pp. 30-39.
5. **Gorokhov, D.B., Stupin, A.S.** Contact Characteristics for Unloading a Preloaded Fixed Sealing Connection. *Mechanical Engineers to XXI Century*, 2015, no. 14, pp. 68-81.
6. **Feng, X., Gu, B., Zhang, P.** Prediction of Leakage Rates Through Sealing Connections with Metallic Gaskets. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2018, vol. 199, no. 3., Article No. 032090. 7 p.
7. **Tikhomirov, V.P., Izmerov, M.A.** Leakage Through Face Seal Taking into Account Corrugation and Roughness. *Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2016, no. 4 (52), pp. 83-93.
8. **Xu, Y., Jackson, R. L.** Statistical Models of Nearly Complete Elastic Rough Surface Contact-comparison with Numerical Solutions. *Tribology International*, 2017, vol. 105, pp. 274-291.
9. **Shatinskiy, V.F., Goikhman, M.S., Garlinskiy, R.N.** Investigation of the Tightness of Metal Valve Seals for Liquid and Gaseous Media. *Chemical and Petroleum Engineering*, 1975, no.8, pp. 33-34.
10. **Kazeev, V.G., Ruban, G.S., Suleimanov, R.Kh., Khakimzyanov, V.Sh.** Tightness of Transport Packaging Sets. *Atomic Energy*, 2006, vol. 100, no. 6, pp. 432-437.
11. **Shishkin, S.V., Shishkin, S.S.** Calculation of the Tightness of Flange Connections. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2010, no. 3, pp. 75-82.
12. **Kiselev, P.I.** Basics of Seals in High-pressure Fittings. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat, 1950. 124 p.
13. **Jianjun, S., Chenbo, M., Jianhua, L., Qiuping, Yu.** A Leakage Channel Model for Sealing Interface of Mechanical Face Seals Based on Percolation Theory. *Tribology International*, 2018, vol. 118, pp. 108-119.
14. **Poroshin, V.V., Bogomolov, D.Yu., Radigin, V.Yu.** Software Module for Calculating the Tightness of End Axisymmetric Seals Based on a Finite Element Model. *Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2008, no. 3(19), pp. 76-84.
15. **Jiang, J., Zhang, H., Ji, B., Yi, F., Yan, F., Liu, X.** Numerical Investigation on Sealing Performance of Drainage Pipeline Inspection Gauge Crossing Pipeline Elbows. *Energy Science & Engineering*, 2021, vol.00, no. 1. 14 p.
16. **Krishna, M. M., Shunmugam, M. S., Prasad, N.S.** A Study on the Sealing Performance of Bolted Flange Joints with Gaskets Using Finite Element Analysis. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2007, vol. 84, no. 6, pp. 349-357.

Ссылка для цитирования:

Татарканов, А.А. Разработка алгоритма автоматизированной оценки герметичности контактных уплотнительных соединений запорной арматуры / А.А. Татарканов, И.А. Александров, М.С. Михайлов, А.Н. Муранов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. - № 10. – С. 27 - 37 . DOI: 10.30987/1999-8775-2021-10-27-37.

Статья поступила в редакцию 02.09.21.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета
Киричек А.В.,
член редсовета журнала «Вестник БГТУ».
Статья принята к публикации 27.09.21.

Сведения об авторах:

Татарканов Аслан Адальбиевич, науч. сотрудник Института конструкторско-технологической информатики РАН, e-mail: tatarkanov@ikti.ru.

Александров Ислам Александрович, ст. науч. сотрудник Института конструкторско-технологической информатики РАН, e-mail: alexandrov@ikti.ru.

Tatarkanov Aslan Adalbievich, Scientific Researcher at the Institute of Design and Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences. E mail: tatarkanov@ikti.ru.

Aleksandrov Islam Aleksandrovich, Senior Scientific Researcher at the Institute of Design and Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences. E mail: alexandrov@ikti.ru.

Михайлов Максим Сергеевич, науч. сотрудник Института конструкторско-технологической информатики РАН, e-mail: mikhailov@ikti.ru.

Муранов Александр Николаевич, ст. науч. сотрудник Института конструкторско-технологической информатики РАН, e-mail: muranov@ikti.ru.

Mikhailov Maksim Sergeevich, Scientific Researcher at the Institute of Design and Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences. E mail: mikhailov@ikti.ru.

Muranov Aleksandr Nikolaevich, Senior Scientific Researcher at the Institute of Design and Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences. E mail: muranov@ikti.ru.