

УДК 621.818+001.57

Методика оценки герметичности затворов трубопроводной арматуры по результатам моделирования шероховатых поверхностей

О.С. Бучнев, С.Н. Гайсин, С.А. Зайдес

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Methodology for assessing tightness of the pipeline fitting valves based on results of the rough surfaces simulation

O.S. Buchnev, S.N. Gaisin, S.A. Zaides

Irkutsk National Research Technical University

Рассмотрен подход к оценке герметичности шероховатых металлических поверхностей затворных узлов трубопроводной арматуры. Техническая идея основана на использовании профилограммы уплотнительной поверхности и параметров шероховатости и волнистости, полученных экспериментальным путем, для создания модели шероховатости, отражающей статистические свойства обработанных поверхностей. Для моделирования шероховатых поверхностей предложен оригинальный подход, основанный на генерировании колебаний высокой частоты, а для моделирования волнистости — колебаний низкой частоты с амплитудой большей, чем амплитуда шероховатости. Для доказательства статистического подобия полученного случайного поля и микрогеометрических параметров использован закон распределения вероятностей, автокорреляционные функции и спектральные плотности. Установлено, что, имея профилограммы уплотнительных поверхностей, можно не используя натурный эксперимент, оценить герметичность затворных узлов трубопроводной арматуры.

EDN: SFBMMJ, <https://elibrary/sfbmmj>

Ключевые слова: трубопроводная арматура, уплотнительная поверхность, модель поверхности, герметичность затвора, оценка герметичности

The paper considers an approach to assessing tightness of the rough metal surfaces of the pipeline fitting valves. The technical idea is based on using a profilogram of the sealing surface and the experimentally obtained roughness and waviness parameters to create a roughness model reflecting statistical properties of the machined surfaces. An original approach is proposed to simulate the rough surfaces based on generation of the high-frequency oscillations, and to simulate waviness – the low-frequency oscillations with an amplitude higher than the roughness amplitude. The law of probability distribution, autocorrelation functions and spectral densities are used to prove statistical similarity in the resulting random field and the microgeometric parameters. The paper shows that it becomes possible having the sealing surfaces profilograms and without using a full-scale experiment to assess tightness of the pipeline fitting valve assemblies.

EDN: SFBMMJ, <https://elibrary/sfbmmj>

Keywords: pipeline fittings, sealing surface, surface model, valve tightness, tightness assessment

Запорную трубопроводную арматуру, предназначенную для перекрытия потока воды, пара, нефти, бензина, керосина и других жидких рабочих сред (РС), широко применяют в технологических процессах нефтехимических производств, транспортных трубопроводах различного назначения, на энергетических предприятиях (ТЭЦ, ГЭС), в жилищно-коммунальном хозяйстве, судовых установках и других технических системах. Как правило, утечки РС через узлы и детали являются недопустимыми, вследствие их негативного влияния на безопасность эксплуатации трубопроводной арматуры [1–3].

Задачи исследования уплотнительной способности соединения металл — металл в затворном узле трубопроводной арматуры рассмотрены во многих работах, в частности [4–6]. При контакте двух металлических уплотнительных поверхностей (УП) появляется пространство сложной конфигурации. Это указывает на то, что абсолютно закрытое состояние возможно только в идеальном случае. На практике же между двумя УП образуются микрощели и микроканалы, допускающие протечку РС.

При исследовании герметичности соединения металл — металл оценивают такие параметры обработки поверхностей, как волнистость W_z и шероховатость Ra . Как правило, допускаемые значения волнистости и шероховатости достигаются финишными технологическими операциями — шлифованием и доводкой — притиркой УП трубопроводной арматуры [7, 8].

В работах [9–15] приведены примеры статистического моделирования поверхностей с помощью случайных процессов и полей. Главным требованием к модели поверхности является способность отражать в достаточной мере такие существенные характеристики поверхности, как макроотклонения, волнистость и шероховатость. Моделирование поверхностей показывает высокую эффективность метода при исследовании свойств шероховатых УП и требований к качеству обработки при изучении герметичности их соединения.

При теоретическом исследовании герметичности выделяют как минимум два вида плотного состояния, и, соответственно, запирающие: статическое и динамическое [16]. При статическом запирающем процессе обеспечения плотного состояния является геометрическое рассмотрение внешней границы РС, при динамическом — установление стационарного

состояния (динамического равновесия сил). Физические явления при динамическом и статическом запирающем различаются. Рассмотрим только последние.

Статическое запирающее запорной арматуры происходит путем формирования новой геометрической границы РС. Место пересечения границ РС по определению представляет собой УП. Размерность пересечения на единицу меньше, чем у пересекающихся границ. В случае трехмерной РС и двумерных границ пересечение будет иметь одно измерение. Таким образом, в трехмерной РС уплотнительной поверхностью является одномерная линия.

Процесс уплотнения при контакте двух УП запорной арматуры теоретически сводится к образованию замкнутой линии уплотнения, когда геометрические границы пятен контакта сливаются в одну линию. Для трехмерного потока две УП с произвольной топологией будут соприкасаться во многих областях, составляющих так называемые пятна контакта. Они будут представлять собой хаотически разбросанные участки контакта.

Доказано [17], что статическое запирающее зависит не от площади затвора, а от критической доли сливающихся в одну узкую полосу пятен контакта, задаваемого деформацией макро- и микроотклонений при запирающем [16, 17].

Как показано в работах [16, 17], для идеальной жидкости порог запирающего РС определяется критическим отношением пятен контакта к площади уплотнения. При этом не требуется полный контакт двух поверхностей.

Цель работы — создание методики оценки герметичности соединения металл — металл с помощью компьютерного моделирования.

Для нахождения критической доли пятен контакта использованы образцы-свидетели из стали 20Х13 (ГОСТ 5632–2014), имитирующие уплотнительные элементы затворного узла — седло и золотник клапана низкого давления (рис. 1).

Качество сканируемой УП контролировали по максимальной высоте волнистости W_z , мкм, и средним значениям высотных параметров шероховатости Ra , мкм.

Волнистость УП по окружности определяли на координатно-измерительной машине Contura G2 Aktiv компании Carl Zeiss AG (Германия) методом автоматического сканирования в трехстах шестидесяти равномерно расположенных точках, т. е. через 1° . Машина имеет

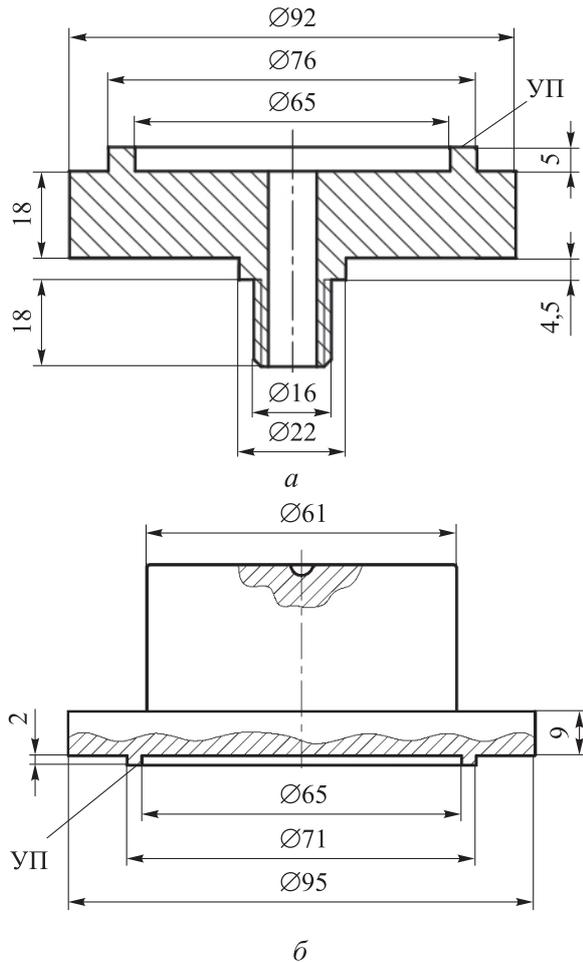


Рис. 1. Схемы образцов-свидетелей, имитирующих седло (а) и золотник клапана низкого давления (б)

активную сканирующую измерительную головку VAST XT, которая позволяет проверять форму с максимальной скоростью при высоком качестве результатов измерения. Погрешность измерения при сканировании — 2,5 мкм.

Характеристики шероховатости измеряли профилометром Form Talysurf i200 компании Taylor Hobson Ltd. (Англия) на трех радиально ориентированных отрезках прямых линий, отстоящих друг от друга в угловом направлении на 120°.

Моделирование УП и оценка ее адекватности.

По сути, обработанные УП являются случайными полями, зависящими от трех пространственных координат: точки на УП и ее высоты. Статистические свойства таких полей можно оценить, используя закон распределения вероятностей и его числовые характеристики, автокорреляционные функции (АКФ) и/или спектральные плотности.

Экспериментальные данные о волнистости и шероховатости УП образца-свидетеля и его статистических свойствах позволили смоделировать площадки контакта, сливающиеся в статическую полосу запираия РС. При моделировании шероховатых поверхностей с отклонениями колебаний низкой (волнистости) и высокой (шероховатости) частот руководствовались техническими требованиями [4].

Для моделирования распространения РС использовали алгоритм FloodFill, имеющийся в библиотеке EImage языка R. На кольцевой УП исследовали площадку размером 5,5×221,5 мм.

Профилограмма обработанной УП образца-свидетеля показана на рис. 2, где L — порядковый номер измеренной высоты профиля; h — высота возвышенностей и глубин впадин, мкм; l — исследуемый стационарный участок, $l = 5000 \dots 7000$.

Для определения статистических свойств шероховатости УП использованы экспериментальные микрогеометрические параметры на стационарном участке (5000...7000) измеренных значений. Результаты экспериментального исследования профиля поверхности образца-свидетеля на стационарном участке приведены на рис. 3, а и б, где N — число высот, попавших в соответствующий интервал.

Профилограмма (см. рис. 3, а) позволяет предположить, что значения высот профиля изменяются стационарно, структура поверхности представляет собой сумму колебаний высоких и низких частот. Гистограмма (см. рис. 3, б) позволяет выдвинуть гипотезу о нормальном законе распределения высот профиля.

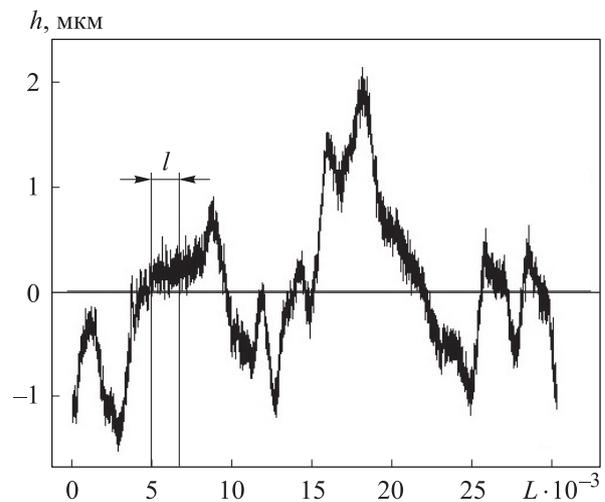


Рис. 2. Профилограмма обработанной УП образца-свидетеля

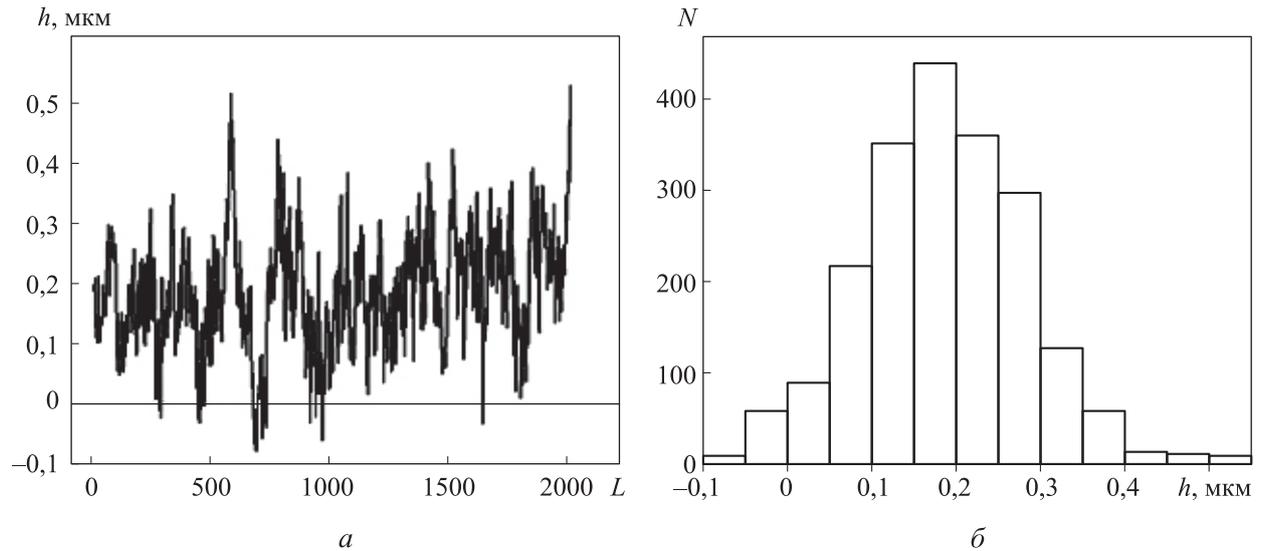


Рис. 3. Результаты экспериментального исследования профиля УП на стационарном участке $l = 5000...7000$: а — профилограмма УП; б — гистограмма частот высот УП

При моделировании УП для подтверждения гипотезы о нормальном законе распределения вероятностей высот профиля формирующихся площадок по исходным показателям шероховатости определены критерий Хи-квадрат = 2,87 и величина P-value = 0,57, что подтверждает предположение о нормальном законе распределения высот профиля.

При моделировании обработанных УП использовали функции пакета RandomFields языка R, с помощью которого получали реализации случайных полей, моделирующих УП размером $5,5 \times 88,0$ мм. Для моделирования шероховатости генерировали колебания высокой частоты и малой амплитуды, а для моделирования волни-

стости — колебания низкой частоты и амплитуды большей, чем амплитуда шероховатости. Сложение полученных полей дает модель шероховатой УП.

Для доказательства статистического подобия случайного поля и микрогеометрических параметров использовали критерии: равенство дисперсий величин высокочастотных колебаний (шероховатости) на стационарном участке и близость значений АКФ имеющейся профилограммы обработанной УП образца-свидетеля и произвольного сечения случайного поля, моделирующего УП.

Результаты моделирования профиля УП на стационарном участке показаны на рис. 4, а и б.

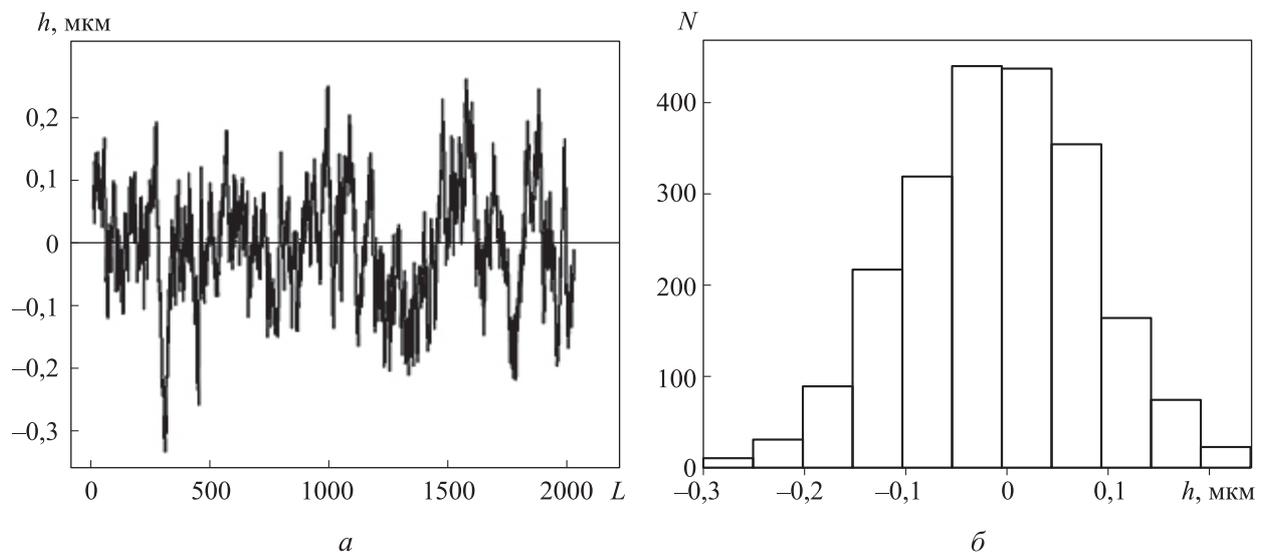


Рис. 4. Результаты моделирования профиля УП на стационарном участке $l = 5000...7000$: а — профилограмма УП; б — гистограмма частот высот УП

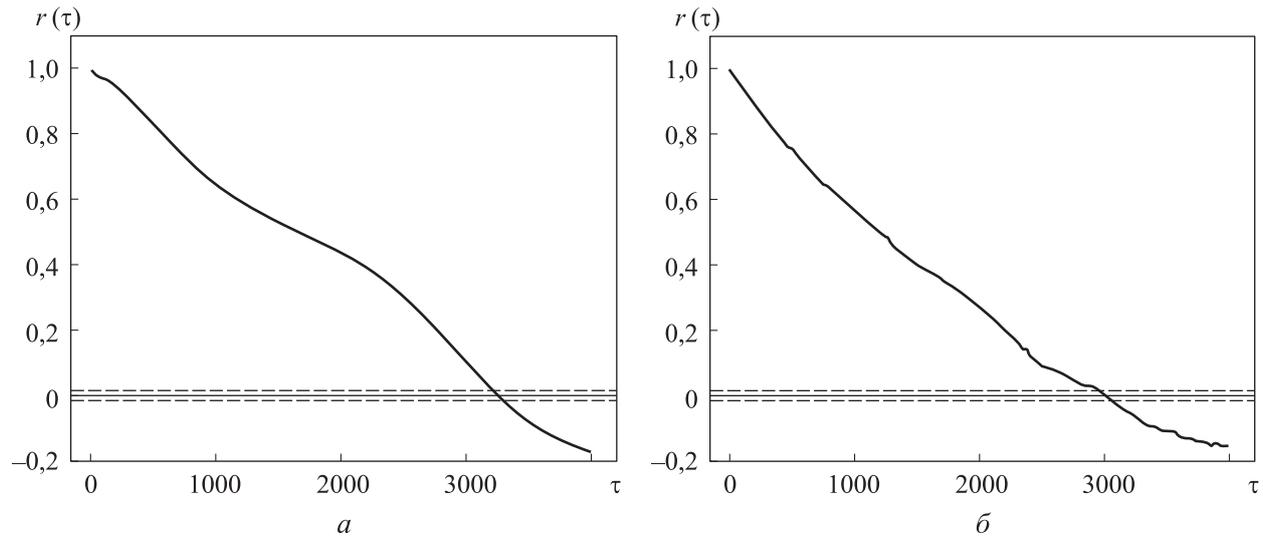


Рис. 5. Графики АКФ:
 а — для профилограммы обработанной УП образца-свидетеля;
 б — для произвольного сечения случайного поля, моделирующего УП

После сравнения профилограмм, приведенных на рис. 4, а и рис. 2, а, можно заключить, что частотные свойства профиля микронеровностей изменились незначительно. Гистограмма, показанная на рис. 4, б, позволяет предположить нормальный закон распределения значений случайного поля, моделирующего УП.

С помощью критерия Хи-квадрат проверена гипотеза о нормальном законе распределения значений профиля микронеровностей. Значение критерия U составило 4,38, величина $P\text{-value} = 0,355$. Значение критерия отражает расхождение между теоретическими частотами нормального закона распределения и эмпирическими частотами, определенными по выборочным данным.

Это значение критерия подставляют в функцию распределения закона Хи-квадрат и вычисляют функцию для данного критерия $F(U)$. Если величина $P\text{-value} = 1 - F(U)$ окажется больше уровня значимости $\alpha = 0,05$, то гипотеза о нормальном законе распределения значений случайного поля, моделирующего УП, окажется верной. В рассматриваемом случае $P\text{-value} = 0,355$, что значительно превышает уровень значимости α .

Для доказательства равенства дисперсий моделируемой и получаемой реализаций использован F-критерий. F-критерий составил 1,06, $P\text{-value} = 0,165$, что значительно больше уровня значимости. Значения критериев оказались статистически устойчивыми с несущественными отклонениями в большую или меньшую

сторону, что свидетельствует о статистическом подобии параметров шероховатости исходной и получаемой реализаций.

Далее выполнено моделирование поля с низкочастотными колебаниями, определяющее волнистость детали. Путем сложения двух случайных полей — с колебаниями высокой и низкой частот — получено случайное поле, которое, после доказательства статистического подобия, можно считать моделью УП. Графики АКФ для профилограммы обработанной УП образца-свидетеля и произвольного сечения получаемого поля, моделирующего УП, приведены на рис. 5, а и б, где r — значение АКФ; τ — аргумент АКФ.

График средней линии (среза) случайного поля, моделирующего УП, показан на рис. 6.

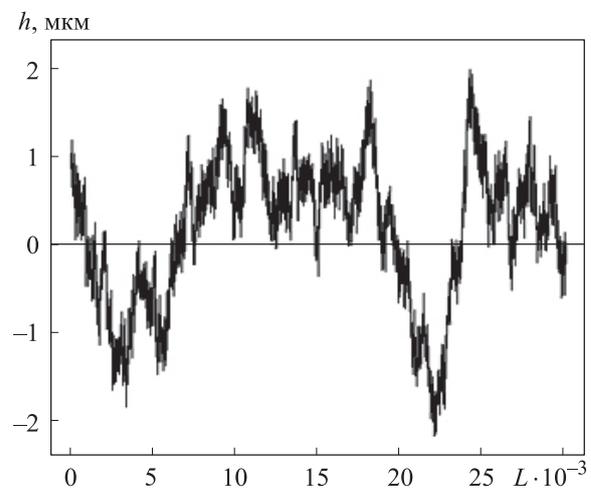


Рис. 6. График средней линии случайного поля, моделирующего УП

Статистические свойства случайного поля, полученного с помощью моделирования

АКФ r		Граница доверительного интервала	
исходная	полученная	нижняя	верхняя
1,000	1,000	–	–
0,999	0,999	0,998	0,999
0,997	0,997	0,996	0,997
0,995	0,995	0,994	0,995
0,994	0,994	0,993	0,994
0,993	0,993	0,992	0,993
0,993	0,993	0,992	0,993
0,992	0,992	0,991	0,992
0,991	0,991	0,990	0,991
0,991	0,991	0,990	0,991

Чтобы доказать статистическое подобие реализации АКФ, сравним первые десять значений исходной и получаемой АКФ, а также найдем доверительные интервалы для исходной АКФ при $\alpha = 0,95$ (см. таблицу).

Для получения значений АКФ воспользуемся функцией языка R `acf()`, а для нахождения границ доверительных интервалов — функцией `CIg` пакета `psychometric` языка R.

Полученные значения АКФ и графики (см. рис. 5, а и б) свидетельствуют о совпадении статистических свойств высот профиля образца-свидетеля и случайного поля, моделирующего УП, что подтверждает адекватность моделей обработанных поверхностей.

Методика оценки герметичности. Оценка герметичности на моделях предполагает наличие случайных полей, статистические свойства которых (пространственные корреляции, описывающие частотные свойства и закон распределения вероятностей) совпадают со статистическими свойствами УП образцов-свидетелей.

Следующим этапом после нахождения полей и доказательства их подобия является моделирование прижатия и оценка герметичности полученного соединения металл — металл.

Одним из ключевых параметров, влияющих на герметичность соединения, является сила прижатия поверхностей. При их прижатии происходит деформация микронеровностей, вследствие чего увеличивается площадь контакта. При проведении экспериментов по моделированию прижатия деталей вычисляли зазор между случайными полями — моделями двух

УП, для чего определяли максимальное значение зазора между случайными полями.

Далее все значения, меньшие, чем половина максимального значения зазора, заменяли нулем (участки герметичного соединения), а остальные — единицей (участки негерметичного соединения).

Для проведения машинных экспериментов моделировали поверхности металлических деталей размером 5,5×88,0 мм. Случайное поле, имитирующее одну из двух УП, приведено на рис. 7, а.

Моделирование прижатия и площадок контакта проводили методом среза 50 % максимальной высоты исследуемой поверхности. Поле, образующее зазор между деталями после прижатия, показано на рис. 7, б, где светлые области соответствуют меньшему зазору.

Так как жидкость принята идеальной, не имеющей массы и вязкости, зазор, если он был больше нуля, заменяли единицей, а области, где нет зазора, оставались равными нулю. Полученное поле, где площадь контакта составляет 52 %, приведено на рис. 7, в.

Герметичность (распространение РС) оценивали с использованием алгоритма `floodfill` и закрасиванием зазора в межплотнительном пространстве черным цветом. Таким образом, определяли наличие соединения отдельных участков контакта в статическую полосу запираения РС.

Как видно из рис. 7, в, при площади контакта более 52 % соединение является негерметичным. С помощью моделирования установлено, что волнистость поверхности влияет на герме-

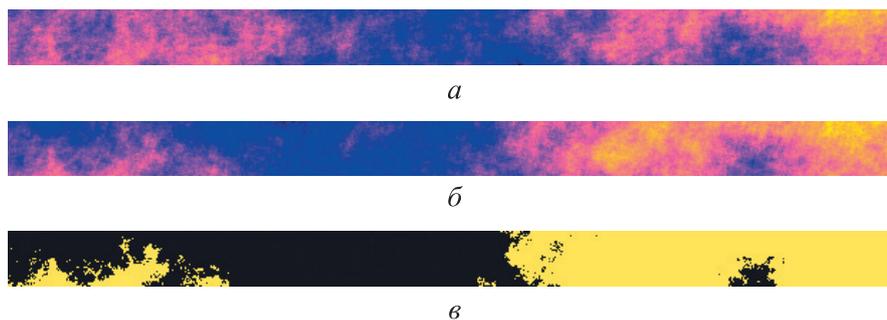


Рис. 7. Результаты моделирования твердых шероховатых УП металл — металл на геометрической поверхности размером 5,5×85,0 мм:
 а — случайное поле, моделирующее УП;
 б — случайное поле между УП после сжатия двух деталей;
 в — поле негерметичного соединения (жидкость проходит по ширине исследуемой УП)

тичность соединения больше, чем ее шероховатость.

Выводы

1. Получены модели шероховатости, отражающие статистические свойства обработанных поверхностей. Предложен и реализован алгоритм моделирования сдавливания поверхностей. Созданный алгоритм можно использо-

вать для моделирования поверхностей с другими статистическими данными и для исследования герметичности запираания.

2. Результаты моделирования показали, что, имея профилограмму УП, а также значения параметров шероховатости, волнистости и силы прижатия УП (величину сжатия микронеровностей), можно оценить герметичность трубопроводной арматуры без натурального эксперимента.

Литература

- [1] Погодин В.К. Концепция обеспечения безопасной эксплуатации трубопроводной арматуры на промышленных предприятиях. *Арматуростроение*, 2006, № 1, с. 34–36.
- [2] Гайсин С.Н., Цвик Л.Б., Балакирев В.А. Формирование уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры однодисковыми и многодисковыми шлифовальными головками. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 5, с. 44–50.
- [3] Маджумдар А., Бхушан Б. Фрактальная модель упругопластического контакта шероховатых поверхностей. *Современное машиностроение. Сер. Б*, 1991, № 6, с. 11–23.
- [4] Калашников В.А. *Оборудование и технологии ремонта трубопроводной арматуры*. Москва, Машиностроение, 2001. 230 с.
- [5] Сейнов С.В. *Трубопроводная арматура. Исследования. Производство. Ремонт*. Москва, Машиностроение, 2002. 390 с.
- [6] Сейнов С.В., Сейнов Ю.С., Мартынов А.Н. *Технологии и оборудование для притирки уплотнений арматуры*. Москва, Прондо, 2013. 209 с.
- [7] Zaides S.A., Gaisin S.N. Mobile system for restoring the sealing surfaces of pipeline valves. *Russ. Engin. Res.*, 2018, vol. 38, no. 6, pp. 442–445, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X18060205>
- [8] Гайсин С.Н., Зайдес С.А., Цвик Л.Б. *Устройство для шлифования и притирки уплотнительных поверхностей запорной трубопроводной арматуры*. Патент РФ 159212. Заявл. 17.06.2015, опубл. 10.02.2016.
- [9] Тихомиров В.П., Измеров М.А., Тихомиров П.В. Фрактальные модели инженерных поверхностей. *Вестник БГТУ*, 2014, № 3, с. 72–80.
- [10] Lanaro F. A random field model for surface roughness and aperture of rock fractures. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2000, vol. 37, no. 8, pp. 1195–1210, doi: [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(00\)00052-6](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(00)00052-6)

- [11] Yu Y., Cui Y., Zhang H. et al. Evaluation analysis on leakage performance for beam seal with two sealing areas. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 29916–29924, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3158485>
- [12] Murtagian G.R., Fanelli V., Villasante J.A. et al. Sealability of stationary metal-to-metal seals. *J. Tribol.*, 2004, vol. 126, no. 3, pp. 591–596, doi: <https://doi.org/10.1115/1.1715103>
- [13] Marie C., Lasseux D. Experimental leak-rate measurement through a static metal seal. *J. Fluids Eng.*, 2007, vol. 129, no. 6, pp. 799–805, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2734250>
- [14] Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces. *Proc. Royal Soc. London. Ser. A.*, 1966, vol. 295, no. 1442, pp. 300–319, doi: <https://doi.org/10.1098/rspa.1966.0242>
- [15] Богомолов Д.Ю., Порошин В.В., Радыгин В.Ю. и др. *Математическое моделирование течения жидкости в щелевых каналах с учетом реальной микротопографии поверхности их стенок*. Москва, МГИУ, 2010. 159 с.
- [16] Гайсин С.Н., Зайдес С.А. Условие внутренней герметичности затворов трубопроводной арматуры. *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 2014, № 6, с. 45–49.
- [17] Zaides S.A., Gaisin S.N. Creating sealing surface of shutoff assembly of pipeline fittings. *Chem. Petrol. Eng.*, 2017, vol. 53, no. 1–2, с. 24–27, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0303-0>

References

- [1] Pogodin V.K. The concept of ensuring safe operation of pipeline valves at industrial enterprises. *Armaturostroenie*, 2006, no. 1, pp. 34–36. (In Russ.).
- [2] Gaysin S.N., Tsvik L.B., Balakirev V.A. Forming sealing areas of pipeline valves by single and multiple disk grinding heads. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2012, no. 5, pp. 44–50. (In Russ.).
- [3] Madzhumdar A., Bkhushan B. Fractal model of elastic-plastic contact of rough surfaces. *Sovremennoe mashinostroenie. Ser. B*, 1991, no. 6, pp. 11–23. (In Russ.).
- [4] Kalashnikov V.A. *Oborudovanie i tekhnologii remonta truboprovodnoy armatury* [Equipment and technologies of repair of pipeline armature]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 230 p. (In Russ.).
- [5] Seynov S.V. *Truboprovodnaya armatura. Issledovaniya. Proizvodstvo. Remont* [Truboprovodnaya armature. Study. Production. Repair]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 390 p. (In Russ.).
- [6] Seynov S.V., Seynov Yu.S., Martynov A.N. *Tekhnologii i oborudovanie dlya pritrirki uplotneniy armatury* [Technologies and equipment for lapping of valve seals]. Moscow, Prondo Publ., 2013. 209 p. (In Russ.).
- [7] Zaides S.A., Gaisin S.N. Mobile system for restoring the sealing surfaces of pipeline valves. *Russ. Engin. Res.*, 2018, vol. 38, no. 6, pp. 442–445, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X18060205>
- [8] Gaysin S.N., Zaydes S.A., Tsvik L.B. *Ustroystvo dlya shlifovaniya i pritrirki uplotnitelnykh poverkhnostey zapornoy truboprovodnoy armatury* [Device for grinding and grinding of sealing surfaces of blocking pipeline fittings]. Patent RU 159212. Appl. 17.06. 2015, publ. 10.02.2016. (In Russ.).
- [9] Tikhomirov V.P., Izmerov M.A., Tikhomirov P.V. Fractal model of engineering surfaces. *Vestnik BGTU* [Bulletin of Bryansk State Technical University], 2014, no. 3, pp. 72–80. (In Russ.).
- [10] Lanaro F. A random field model for surface roughness and aperture of rock fractures. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2000, vol. 37, no. 8, pp. 1195–1210, doi: [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(00\)00052-6](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(00)00052-6)
- [11] Yu Y., Cui Y., Zhang H. et al. Evaluation analysis on leakage performance for beam seal with two sealing areas. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 29916–29924, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3158485>
- [12] Murtagian G.R., Fanelli V., Villasante J.A. et al. Sealability of stationary metal-to-metal seals. *J. Tribol.*, 2004, vol. 126, no. 3, pp. 591–596, doi: <https://doi.org/10.1115/1.1715103>

- [13] Marie C., Lasseux D. Experimental leak-rate measurement through a static metal seal. *J. Fluids Eng.*, 2007, vol. 129, no. 6, pp. 799–805, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2734250>
- [14] Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces. *Proc. Royal Soc. London. Ser. A.*, 1966, vol. 295, no. 1442, pp. 300–319, doi: <https://doi.org/10.1098/rspa.1966.0242>
- [15] Bogomolov D.Yu., Poroshin V.V., Radygin V.Yu. et al. *Matematicheskoe modelirovanie techeniya zhidkosti v shchelevykh kanalakh s uchetom realnoy mikrotopografii poverkhnosti ikh stenok* [Mathematical modelling of fluid flow in slotted channels taking into account real microtopography of their wall surface]. Moscow, MGIU Publ., 2010. 159 p. (In Russ.).
- [16] Gaysin S.N., Zaydes S.A. Inner pressure-tight condition of pipeline valves. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2014, no. 6, pp. 45–49. (In Russ.).
- [17] Zaides S.A., Gaysin S.N. Creating sealing surface of shutoff assembly of pipeline fittings. *Chem. Petrol. Eng.*, 2017, vol. 53, no. 1–2, pp. 24–27, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0303-0>

Статья поступила в редакцию 26.01.2024

Информация об авторах

БУЧНЕВ Олег Сергеевич — кандидат технических наук, доцент института информационных технологий и анализа данных. Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, Лермонтова ул., д. 83, e-mail: buchnevo81@mail.ru).

ГАЙСИН Сергей Николаевич — инженер кафедры «Технологии и оборудования машиностроительных производств». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, Лермонтова ул., д. 83, e-mail: gaisinsn@mail.ru).

ЗАЙДЕС Семен Азикович — доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедения, сварочных и аддитивных технологий». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, Лермонтова ул., д. 83, e-mail: zsa@istu.edu).

Information about the authors

BUCHNEV Oleg Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor at the Institute of Information Technology and Data Analysis. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontova St., Bldg. 83, e-mail: buchnevo81@mail.ru).

GAISIN Sergey Nikolaevich — Engineer, Department of Technology and Equipment of Machine-building Industries. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontova St., Bldg. 83, e-mail: gaisinsn@mail.ru).

ZAIDES Semyon Azikovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontova St., Bldg. 83, e-mail: zsa@istu.edu).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бучнев О.С., Гайсин С.Н., Зайдес С.А. Методика оценки герметичности затворов трубопроводной арматуры по результатам моделирования шероховатых поверхностей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 5, с. 21–29.

Please cite this article in English as:

Buchnev O.S., Gaysin S.N., Zaides S.A. Methodology for assessing tightness of the pipeline fitting valves based on results of the rough surfaces simulation. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 5, pp. 21–29.