

УДК 62.408.8

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.49.2.039](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.49.2.039)

Исследование взаимосвязи между углом смачивания и параметрами микропрофиля поверхности

А.Д. Анисимов✉, Д.А. Мастеренко

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация

Резюме. В работе дан краткий обзор новых подходов к характеристике качества поверхностей, обладающих гидрофобными свойствами. Эти подходы основаны на математических процедурах, связанных с большим объемом вычислений, в том числе на фрактальных методах. Изучена взаимосвязь между углом смачивания гидрофобной поверхности и параметрами поверхности, такими как шероховатость и фрактальная размерность профиля. Разработана модель супергидрофобной поверхности, описаны ее параметры, такие как эффективный гидрофобный угол смачивания, доля твердой фазы поверхности в контакте с жидкостью, параметры иерархической структуры. Установлено, что использование наноструктурных колонн при формировании супергидрофобной поверхности с учетом иерархической структуры дает возможность существенно увеличить значения краевого угла смачивания. Определены зависимость краевого угла смачивания от доли контакта «жидкость-твердое» на межфазной границе, которая объясняется усложнением структуры поверхности, и взаимосвязь доли твердой фазы с фрактальной размерностью. Установлено, что при оценивании краевого угла смачивания взаимосвязь фрактальной размерности значительно выше, в сравнении с параметрами шероховатости R_a и R_z . При помощи регрессионного анализа определены коэффициенты корреляции между углом смачивания и другими параметрами гидрофобной поверхности. Полученные результаты могут быть использованы при обработке измерительной информации в соответствии с современными стандартами в области геометрических характеристик поверхностей, в том числе при разработке программного обеспечения для средств измерений параметров гидрофобных поверхностей.

Ключевые слова: гидрофобность, шероховатость, геометрические характеристики поверхности, фрактальная размерность, микропрофиль поверхности, масштаб.

Благодарности: Благодарим за предоставленное технологическое и измерительное оборудование Федеральный центр коллективного пользования Государственного инженерингового центра МГТУ «СТАНКИН».

Для цитирования: Анисимов А.Д., Мастеренко Д.А. Исследование взаимосвязи между углом смачивания и параметрами микропрофиля поверхности. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(2). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1933> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.49.2.039

Investigation of the relationship between the wetting angle and the surface microprofile parameters

A.D. Anisimov✉, D.A. Masterenko

Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, the Russian Federation

Abstract. A brief overview of new approaches to characterizing the quality of surfaces with hydrophobic properties is given. These approaches are based on mathematical procedures involving a large amount of computation, including fractal methods. The relationship between the wetting angle of a hydrophobic surface and surface parameters such as roughness and fractal dimension of the profile has been studied. A model of a superhydrophobic surface is developed, its parameters are described, such as the effective

hydrophobic wetting angle, the proportion of the solid phase of the surface in contact with the liquid, and the parameters of the hierarchical structure. It has been established that the use of nanostructured columns in the formation of a superhydrophobic surface, taking into account the hierarchical structure, makes it possible to significantly increase the values of the wetting edge angle. The dependence of the wetting edge angle on the fraction of the liquid-solid contact at the interface is determined, which is explained by the complication of the surface structure, and the relationship between the fraction of the solid phase and the fractal dimension is determined. It was found that when estimating the wetting edge angle, the relationship of the fractal dimension is significantly higher in comparison with the roughness parameters Ra and Rz . The correlation coefficients between the wetting angle and other parameters of the hydrophobic surface were determined using regression analysis. The results obtained can be used in the processing of measurement information in accordance with modern standards in the field of geometric characteristics of surfaces, including in the development of software for measuring parameters of hydrophobic surfaces.

Keywords: hydrophobicity, roughness, geometric characteristics of the surface, fractal dimension, surface microprofile, scale.

Acknowledgements: Thank you for the technological and measuring equipment provided by the Federal Center for Collective Use of the State Engineering Center of MSTU "STANKIN".

For citation: Anisimov A.D. Masterenko D.A. Investigation of the relationship between the wetting angle and the surface microprofile parameters. *Modeling, optimization, and information technology*. 2025;13(2). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1933> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.49.2.039

Введение

Одно из перспективных направлений современного материаловедения – создание супергидрофобных (сверхгидрофобных) материалов [1], практически не взаимодействующих с водой, способных к самоочищению по вертикали. Гидрофобность – свойство молекул (или их частей) химических веществ, заключающееся в отсутствии у них склонности к взаимодействию с водной средой. Сами вещества, составленные из таких молекул, а также образуемые ими поверхности материалов в этом случае называются гидрофобными¹. Материал относится к супергидрофобным, если угол смачивания капли воды превышает 150 градусов и мал гидрофобный угол смачивания (менее 3 градусов), соответствующий углу наклона поверхности, необходимому для скатывания капли [2]. Краевой угол смачивания – угол, который образуется между касательной, проведенной к поверхности фазы жидкость – газ и твердой поверхностью с вершиной, располагающейся в точке контакта трёх фаз, и условно измеряемый всегда внутри жидкой фазы [3]. Гидрофобность и гидрофильность также определяются по поведению капли воды на гладкой поверхности: на гидрофильной поверхности капля полностью растекается, в то время как на гидрофобной она образует более выраженную форму, и угол, образуемый каплей и смачиваемой поверхностью, зависит от степени гидрофобности данного объекта².

Помимо свойств молекул вещества, на смачивание поверхности жидкостью влияет совокупность неровностей микропрофиля поверхности, которую принято описывать в терминах шероховатости и пористости. Для этой цели в последние десятилетия все чаще применяются математические методы, базирующиеся на понятиях фрактальной геометрии.

¹ Яминский В.В. Гидрофобное взаимодействие. В книге: *Химическая энциклопедия: Том 1*. Москва: Советская энциклопедия; 1988. С. 568.

² Фролов Ю.Г. *Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы*. Москва: Химия; 1982. 400 с.

Фрактальная размерность – это мощный инструмент для количественной оценки текстур и микроструктур, позволяющий анализировать сложные поверхности, где размеры и формы структур могут меняться на разных масштабах [4]. Оценка фрактальных свойств этих поверхностей позволяет не только лучше понять механизмы взаимодействия воды с различными покрытиями, но и предсказывать их поведение в различных условиях. Применение фрактальных методов, описанных в ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014³, может выявить и анализировать фрактальные структуры, что, в свою очередь, может привести к разработке новых материалов с заданными свойствами.

Таким образом, тщательное исследование фрактальных свойств супергидрофобных поверхностей открывает перспективы для создания инновационных покрытий с различными функциональными характеристиками [5, 6]. Исследования в данном направлении могут значительно повлиять на множество разработок, включая самоочищающиеся поверхности⁴ [7], водоотталкивающие текстильные материалы и эффективные системы управления жидкостями [8].

В исследованиях [9, 10] авторы заключают, что фрактальная размерность позволяет точнее оценивать влияние микроструктурных неровностей поверхности на угол смачивания, чем шероховатость или пористость. Дело в том, что такие характеристики, как частота возникновения отверстий, их глубина и диаметр, представляют собой ключевые параметры, которые не могут быть адекватно описаны лишь с помощью традиционных показателей шероховатости поверхности.

Целью настоящей статьи является исследование взаимосвязи между такими параметрами поверхности, как шероховатость и фрактальная размерность и микроструктурными характеристиками, которые влияют на краевой угол смачивания гидрофобных поверхностей. Исследования проведены по двум направлениям:

- 1) путем моделирования супергидрофобной поверхности с учетом иерархической структуры и расчета эффективного краевого угла;
- 2) оценкой параметра фрактальной размерности, вычисленной методом построения функции «площадь – масштаб», и параметров шероховатости полученной модели на основе профиля центрального поперечного среза как характеристик структурных свойств поверхности, влияющих на краевой угол смачивания.

Первое направление исследований дает возможность говорить об использовании наноструктурных колонн при моделировании супергидрофобной поверхности с учетом иерархической структуры. Второе направление позволяет понять, каковы различия в информативности указанных параметров при их применении к микропрофилям моделированных поверхностей.

Описание модели и расчет эффективного краевого угла

Гидрофобные свойства обычно ассоциируются с высокой шероховатостью и пористостью поверхности [11]. Шероховатая поверхность часто характеризуется наличием «пиков и впадин» определенной высоты или амплитуды, а ее количественная оценка осуществляется с помощью среднеквадратичного значения шероховатости. К основным методам, используемым для создания супергидрофобных поверхностей, относят фотолитографию и мягкую литографию. Для формирования супергидрофобной поверхности часто используются микро- или наноструктуры, например, круговые колонны, волокна или страйп-текстуры [12, 13]. Подобные физические и

³ ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Ареал. Часть 2. Термины, определения и параметры структуры поверхности. Москва: Стандартинформ; 2015. 46 с.

⁴ Fortin G. Super-Hydrophobic Coatings as a Part of the Aircraft Ice Protection System. SAE Technical Paper. URL: <https://doi.org/10.4271/2017-01-2139> (дата обращения: 03.03.2025).

математические модели описывались во многих работах и исследованиях [14, 15]. В работе [13] при различных значениях размера столба и интервала между ними с помощью моделирования было описано, как поверхность ведет себя при конкретной комбинации параметров. В работе [16] изучен гистерезис угла контакта и взаимодействие жидкой фазы с вершинами столбов. В исследовании [17] авторы заключают, что иерархическая поверхность с микрополусферическим или микростолбчатым массивом демонстрирует превосходную гидрофобность. Из результатов вышеупомянутых исследований следует, что разработку модели стоит начать с создания поверхности с определенной гидрофобной текстурой, как, например, у пород доманика или перми, т. к. краевой угол смачивания этих пород более 100 градусов. Для этого создается массив цилиндрических столбиков с заданными значениями высоты, радиуса и шага между ними. Далее рассчитывается эффективный контактный угол по модели Касси-Бакстера, которая учитывает шероховатость и химические свойства поверхности [18, 19]. Оцененный угол эффективен в том смысле, что это угол, который нам требуется для расчетов конфигурации жидкости и порогового давления в масштабе пор. Хотя «истинный» контактный угол, определенный в атомном масштабе, дает ценную информацию о балансе поверхностных сил, это не то значение, которое нам требуется для моделирования и интерпретации в масштабе пор: необходимо найти эффективный угол, который включает эффекты шероховатости и геометрии пор. Кроме того, учитывается, что поверхность материала при рассмотрении ее в микро- и наномасштабах выражается не в простой (гладкой), а иерархической структуре [20], что подразумевает наличие вторичных нановыступов на каждом из основных столбиков. Пример модели представлен на Рисунке 1.

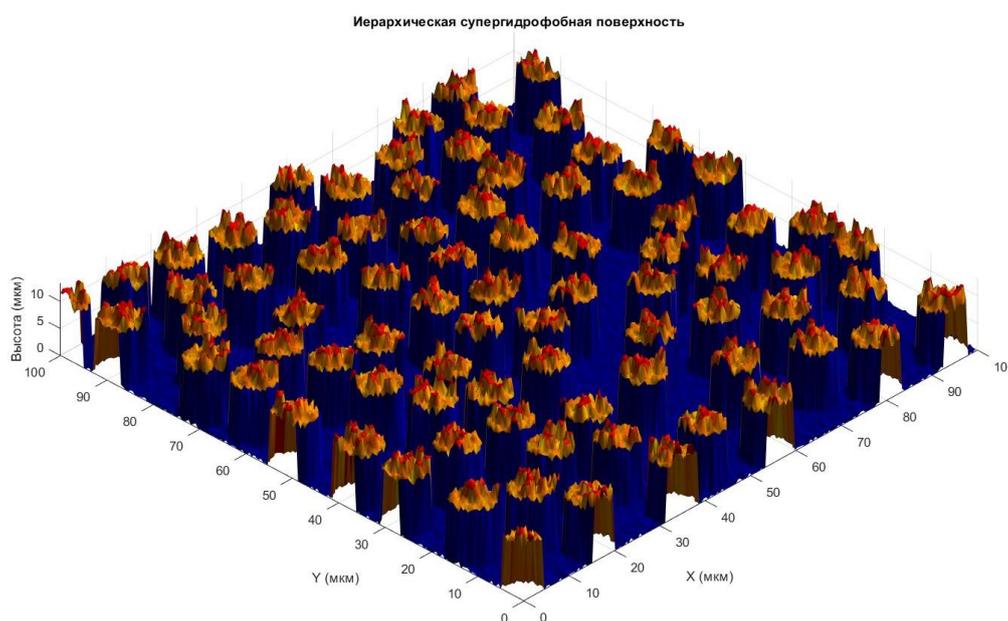


Рисунок 1 – 3D-модель иерархической супергидрофобной поверхности
 Figure 1 – 3D model of hierarchical superhydrophobic surface

В приведенном примере формируется гидрофобная плоская поверхность с краевым углом, равным 120 градусам. Уравнение нахождения эффективного краевого угла модели Касси-Бакстера описано следующей формулой:

$$\cos \theta_{\text{eff}} = f_s(1 + \cos \theta_{\text{flat}}) - 1, \quad (1)$$

где θ_{eff} – эффективный краевой угол, θ_{flat} – краевой угол на плоской гидрофобной поверхности, f_s – доля твердой фазы в контакте с жидкостью.

Из формулы (1) выводится уравнение эффективного краевого угла

$$\theta_{\text{eff}} = \arccos(f_s(1 + \cos \theta_{\text{flat}}) - 1). \quad (2)$$

Для иерархической структуры гидрофобной поверхности с учетом условий моделирования доля твердой фазы рассчитывается следующим соотношением:

$$f_s = f_{s1} + f_{s2} = \frac{N_{\text{main}}\pi r_{\text{main}}^2}{S} + \frac{N_{\text{main}}N_{\text{sec}}\pi r_{\text{sec}}^2}{S}, \quad (3)$$

где N – количество столбиков в основной и вторичной структуре, r – радиус столбиков, а S – площадь поверхности.

Параметры, выбранные для вышеупомянутой модели, представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Исходные параметры модели

Table 1 – Initial parameters of the model

Параметр	Значение
Размер области (S)	100×100 мкм ²
Основные столбики (N)	37 шт.
Радиус основного столбика (r_1)	5 мкм
Высота основного столбика	10 мкм
Вторичные выступы	6 на столбик
Радиус вторичных выступов (r_2)	0,8 мкм
Высота вторичного выступа	2 мкм
Исходный краевой угол	120°

Подставляя исходные параметры в формулы (1)–(3), получим значения доли твердой фазы и эффективный краевой угол:

$$f_{s1} = \frac{N \cdot \pi r_1^2}{S} = \frac{37 \cdot \pi \cdot 5^2}{100^2} = \frac{37 \cdot 78,54}{10,000} = 0,290,$$

$$f_{s2} = \frac{N_{\text{sec}} \cdot \pi r_2^2}{S} = \frac{241 \cdot \pi \cdot 0,8^2}{100^2} = \frac{241 \cdot 2,01}{10,000} = 0,048,$$

$$f_s = 0,290 + 0,048 = 0,338,$$

$$\cos \theta_{\text{eff}} = 0,338(1 + \cos 120^\circ) - 1 = 0,338(1 - 0,5) - 1 = -0,831,$$

$$\theta_{\text{eff}} = \arccos(-0,831) = 146,2^\circ.$$

По результатам вычислений можно сделать вывод, что использование наноструктурных столбиков при формировании супергидрофобной поверхности с учетом иерархической структуры, вследствие уменьшения доли твердой фазы дает возможность существенно увеличить значения краевого угла (с 120° до 146,2°), что означает усиление гидрофобных свойств поверхности.

Взаимосвязь между углом смачивания и параметрами микропрофиля поверхности

Как было сказано ранее, гидрофобность напрямую связана с понятиями шероховатости и пористости поверхности. Однако при оценке гидрофобных и супергидрофобных свойств более применимо описание морфологической сложности, поскольку шероховатость дает лишь понимание «гладкости» поверхности, но не ее структурных свойств. Из формулы (1) видно, что эффективный краевой угол смачивания

напрямую зависит от доли контакта «жидкость-твердое» на межфазной границе. Физически это объясняется тем, что по мере усложнения структуры появляются шероховатости и микропоры, в которых остается воздух, что согласуется с моделью Касси и напрямую влияет на гидрофобные свойства поверхности. Однако стандартными параметрами шероховатости описать сложность структуры поверхности довольно проблематично. При этом из определения фрактальной размерности можно сделать вывод, что данный параметр возможно использовать как инструмент анализа сложности микронеровностей, в том числе от которых зависит доля твердой фазы.

В качестве исследуемой поверхности рассматривается двумерный профиль описанной выше модели, а именно центральный поперечный срез по оси Y , который представлен на Рисунке 2.

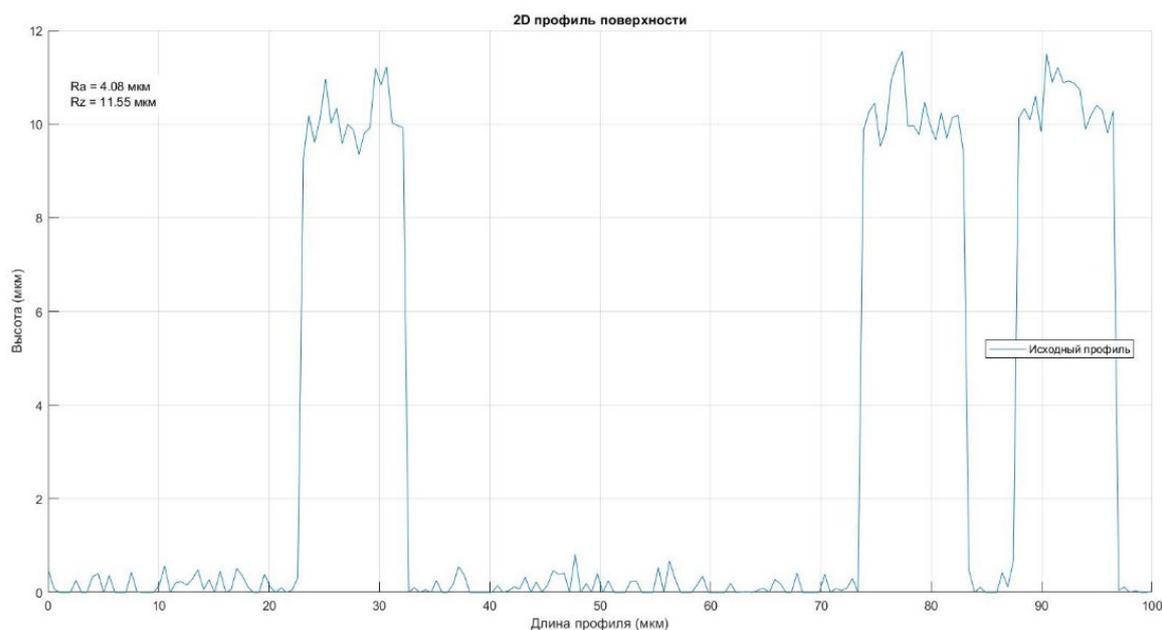


Рисунок 2 – Двумерный профиль поверхности
 Figure 2 – 2D surface profile

После нахождения максимальных и минимальных значений профиля, а также средней высоты неровностей, по следующим формулам рассчитываются параметры шероховатости R_a и R_z :

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i - \bar{z}|, \quad (4)$$

$$Rz = \max z_i - \min z_i. \quad (5)$$

При помощи метода построения функции «площадь – масштаб» находится фрактальная размерность данного профиля. Метод построение функции «площадь – масштаб» (или Area – Scale function method) является одним из распространенных подходов к оцениванию фрактальной размерности профиля [21, 22]. Этот метод позволяет исследовать как поверхность объекта, так и ее структуру, анализируя, как площадь, покрывающая профиль, изменяется в зависимости от масштаба. Значение функции «площадь – масштаб» определяется как площадь, заключенная между верхней и нижней огибающими при данном значении c [21]:

$$Fas(c) = \int_0^l (UE(x, c) - LE(x, c)) dx. \quad (6)$$

График функции площадь – масштаб представлен на Рисунке 3.

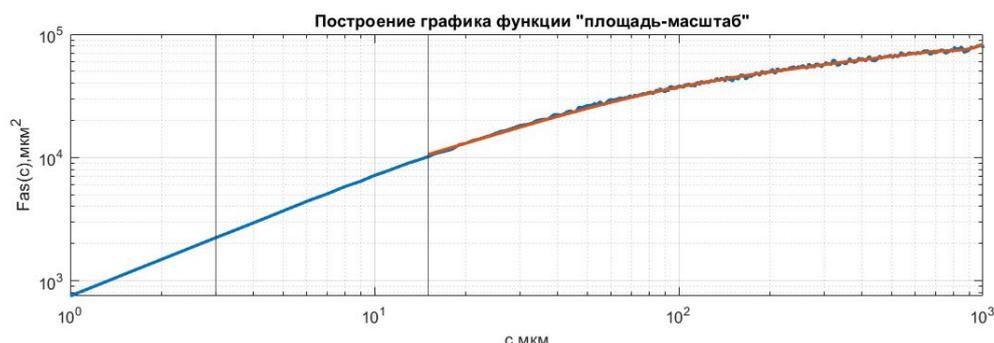


Рисунок 3 – График функции «площадь – масштаб»
Figure 3 – Graph of the area – scale function

После построения графика фрактальная размерность определяется по формуле

$$D_f = 2 - k, \quad (7)$$

где k – угловой коэффициент наклона графика функции «площадь – масштаб» в соответствующем диапазоне.

В результате вычислений было получено, что для данного профиля фрактальная размерность $D = 1,5925$.

Изменение параметров модели, например, плотности заполнения площади поверхности столбами их радиуса, а также параметров вторичных наноструктур напрямую влияют на супергидрофобные свойства поверхности. Изменение высоты столба приведет к значительному изменению параметров шероховатости, что исказит результаты. На основании этого имеется возможность сравнить, как изменяются высотные параметры и фрактальная размерность при изменении краевого угла. Результаты исследований параметров шероховатости и фрактальной размерности методом построения функции «площадь – масштаб» 10 двумерных центральных срезов поверхности представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Параметры шероховатости и фрактальной размерности двумерного профиля
Table 2 – Parameters of roughness and fractal dimension of a two-dimensional profile

№ профиля	Краевой угол, град	R_a , мкм	R_z , мкм	Фрактальная размерность, D
1	138,12	4,13	11,52	1,5423
2	139,86	4,07	11,26	1,5618
3	142,14	3,59	10,74	1,5747
4	145,62	3,86	11,03	1,5812
5	146,21	4,04	11,55	1,5925
6	148,90	3,52	11,83	1,6212
7	150,11	3,84	11,12	1,6322
8	151,92	4,11	11,37	1,6296
9	152,01	3,74	10,60	1,6274
10	152,43	3,87	10,81	1,6301

Чтобы более наглядно и обоснованно оценить взаимосвязь между краевым углом и исследуемыми параметрами поверхности применяются инструменты планирования и

анализа результатов эксперимента⁵ [23]. Строится регрессия между выходной величиной (в данном случае – краевой угол) и объясняющей переменной, сначала параметрами шероховатости, потом фрактальной размерностью. После этого сравниваются среднеквадратические остатки регрессионной зависимости и коэффициент корреляции r_x^y . Модель, в которой полученные остатки меньше, лучше объясняет выходную величину.

Линейное уравнение регрессии для зависимости краевого угла от параметра R_a имеет вид:

$$y = -0,0109 \cdot x + 5,483. \quad (8)$$

Линейный коэффициент корреляции определяется через коэффициент регрессии b :

$$r_x^y = b \cdot \frac{S(x)}{S(y)} = -0,0109 \cdot \frac{4,973}{0,203} = -0,268, \quad (9)$$

где $S(x)$ и $S(y)$ – среднеквадратичные отклонения.

Аналогично находятся значения и для остальных исследуемых параметров. Результаты регрессионного анализа отражены в Таблице 3.

Таблица 3 – Результаты регрессионного анализа краевого угла и исследуемых параметров поверхности

Table 3 – The results of the regression analysis of the marginal angle and the investigated surface parameters

Параметр поверхности	Среднеквадратичный остаток	r_x^y
R_a	5,483	-0,268
R_z	13,829	-0,239
Фрактальная размерность, D	0,695	0,977

На основании проведенного регрессионного анализа можно сделать вывод, что взаимосвязь между фрактальной размерностью и краевым углом смачивания намного выше, в сравнении с параметром шероховатости R_a и R_z . Теоретически, более высокая фрактальная размерность указывает на более высокую сложность поверхности, что влечет за собой образование множества наноскопических пор [24]. Воздух, попадающий в поры, не позволяет жидкости проникать в них, доля твердой фазы, взаимодействующая с жидкостью, уменьшается, что и ведет к увеличению эффективного краевого угла смачивания.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует, что фрактальная размерность является более точным инструментом оценивания микроструктурных характеристик, влияющих на краевой угол смачивания гидрофобных поверхностей, по сравнению с традиционными параметрами шероховатости. Это связано со способностью фрактального анализа учитывать сложность и иерархичность микроструктуры, что особенно важно для супергидрофобных материалов. Использование наноструктурных столбиков, организованных в иерархическую структуру, при формировании супергидрофобной поверхности позволило достичь значительного увеличения краевого угла (до 152°), что подтверждает эффективность такого подхода. Использование модели Касси-Бакстера для расчета эффективного угла смачивания, учитывающей долю твердой

⁵ Сидняев Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. Москва: Издательство Юрайт; 2020. 495 с.

фазы и геометрию пор, обеспечило теоретическую основу для интерпретации экспериментальных данных.

Регрессионный анализ влияния параметров шероховатости и фрактальной размерности на угол смачивания выявил, что фрактальная размерность менее подвержена вариациям при изменении масштаба измерений и лучше отражает структурную сложность профиля. Результаты Таблицы 3 подтвердили прямую корреляцию между ростом фрактальной размерности и увеличением угла смачивания, что объясняется уменьшением доли контакта жидкости с поверхностью благодаря нанопорам.

Таким образом, данные имеют практическое значение для разработки инновационных покрытий с заданными гидрофобными свойствами, таких как самоочищающиеся поверхности или водоотталкивающие материалы. Результаты также могут быть интегрированы в программное обеспечение для анализа геометрических характеристик поверхностей, что повысит точность измерений в соответствии с современными стандартами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение. *Успехи химии*. 2008;77(7):619–638. <https://doi.org/10.1070/RC2008v077n07ABEH003775>
Voinovich L.B., Emelyanenko A.M. Hydrophobic Materials and Coatings: Principles of Design, Properties and Applications. *Russian Chemical Reviews*. 2008;77(7):583–600. (In Russ.). <https://doi.org/10.1070/RC2008v077n07ABEH003775>
2. Бузник В.М. Сверхгидрофобные материалы на основе фторполимеров. *Авиационные материалы и технологии*. 2013;(1):29–34.
Buznik V.M. Superhydrophobic Materials Based on Fluoroplastics. *Aviacionnyye Materialy and Tehnologii*. 2013;(1):29–34. (In Russ.).
3. Шварц А., Перри Дж. *Поверхностноактивные вещества. Их химия и технические применения*. Москва: Издательство иностранной литературы; 1953. 544 с.
Schwartz A., Perry J.W. *Surface Active Agents. Their Chemistry and Technology*. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoi literatury; 1953. 544 p. (In Russ.).
4. Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. San Francisco: W.H. Freeman; 1982. 460 p.
5. Sethi S.K., Manik G. Recent Progress in Super Hydrophobic/Hydrophilic Self-Cleaning Surfaces for Various Industrial Applications: A Review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2018;57(18):1932–1952. <https://doi.org/10.1080/03602559.2018.1447128>
6. Chermahini S.H., Ostad-Ali-Askari K., Eslamian S., Singh V.P. Recent Progress in Self-Cleaning Materials with Different Suitable Applications. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018;11(2):560–573. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2018.560.573>
7. Lin Yu., Chen H., Wang G., Liu A. Recent Progress in Preparation and Anti-Icing Applications of Superhydrophobic Coatings. *Coatings*. 2018;8(6). <https://doi.org/10.3390/coatings8060208>
8. Гуляев И.П., Кузьмин В.И., Ковалев О.Б. Высокогидрофобные керамические покрытия, получаемые методом плазменного напыления порошковых материалов. *Теплофизика и аэромеханика*. 2020;27(4):615–625.

- Gulyaev I.P., Kuzmin V.I., Kovalev O.B. Highly Hydrophobic Ceramic Coatings Produced by Plasma Spraying of Powder Materials. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2020;27(4):585–594. <https://doi.org/10.1134/S0869864320040113>
9. Lee W.X., Farid A.A., Namazi H. Investigation of Anodised Surface Complexity and Its Correlation with Surface Hydrophilicity Using Fractal Analysis. *Results in Surfaces and Interfaces*. 2022;6. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2022.100046>
 10. Wu J., Jin X., Mi Sh., Tang J. An Effective Method to Compute the Box-Counting Dimension Based on the Mathematical Definition and Intervals. *Results in Engineering*. 2020;6. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100106>
 11. Нажипкызы М., Мансуров З.А. Супергидрофобные материалы и покрытия: обзор. *Горение и плазмохимия*. 2020;18(4):163–189. <https://doi.org/10.18321/cpc393>
Nazhipkyzy M., Mansurov Z. Super Hydrophobic Materials and Coatings: Overview. *Combustion and Plasma Chemistry*. 2020;18(4):163–189. (In Russ.). <https://doi.org/10.18321/cpc393>
 12. Yao Ch.-W., Tang S., Sebastian D., Tadmor R. Sliding of Water Droplets on Micropillar-Structured Superhydrophobic Surfaces. *Applied Surface Science*. 2020;504. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144493>
 13. Roy T., Sabharwal T.P., Kumar M., Ranjan P., Balasubramaniam R. Mathematical Modelling of Superhydrophobic Surfaces for Determining the Correlation Between Water Contact Angle and Geometrical Parameters. *Precision Engineering*. 2020;61:55–64. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.10.005>
 14. Hubert J., Mertens J., Dufour T., et al. Synthesis and Texturization Processes of (Super)-Hydrophobic Fluorinated Surfaces by Atmospheric Plasma. *Journal of Materials Research*. 2015;30(21):3177–3191. <https://doi.org/10.1557/jmr.2015.279>
 15. Dubov A.L., Teisseire J., Barthel E. Elastic Instability and Contact Angles on Hydrophobic Surfaces with Periodic Textures. *Europhysics Letters*. 2012;97(2). <https://doi.org/10.1209/0295-5075/97/26003>
 16. Reyssat M., Quéré D. Contact Angle Hysteresis Generated by Strong Dilute Defects. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2009;113(12):3906–3909. <https://doi.org/10.1021/jp8066876>
 17. Wang Ch., Shao R., Wang G., Sun Sh. Hierarchical Hydrophobic Surfaces with Controlled Dual Transition Between Rose Petal Effect and Lotus Effect Via Structure Tailoring or Chemical Modification. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2021;622. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126661>
 18. Зимон А.Д. *Адгезия жидкости и смачивание*. Москва: Химия; 1974. 416 с.
 19. Baxter S., Cassie A.B.D. 8–The Water Repellency of Fabrics and a New Water Repellency Test. *Journal of the Textile Institute Transactions*. 1945;36(4):T67–T90. <https://doi.org/10.1080/19447024508659707>
 20. Feng L., Li Sh., Li H., et al. Super-Hydrophobic Surface of Aligned Polyacrylonitrile Nanofibers. *Angewandte Chemie International Edition*. 2002;41(7):1221–1223. [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20020402\)41:7<1221::aid-anie1221>3.0.co;2-g](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20020402)41:7<1221::aid-anie1221>3.0.co;2-g)
 21. Григорьев С.Н., Мастеренко Д.А., Скопцов Э.С. Анализ профилей шероховатости стальных поверхностей после электроэрозионной обработки. *Измерительная техника*. 2023;(9):38–45. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-9-38-45>
Grigoriev S.N., Masterenko D.A., Skoptsov E.S. The Analysis of the Measurement Information on Electrical Discharge Machined Steel Surfaces. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2023;(9):38–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-9-38-45>
 22. Марков Б.Н., Мастеренко Д.А., Емельянов П.Н., Телешевский В.И. Алгоритмизация вычисления фрактальных параметров рельефа шероховатой

- поверхности по ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014. *Измерительная техника*. 2020;(8):20–27. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-8-20-27>
- Markov B.N., Masterenko D.A., Emelyanov P.N. Teleshevskiy V.I. Algorithmization for Calculating Fractal Parameters of the Relief of a Rough Surface According to GOST R ISO 25178-2-2014. *Measurement Techniques*. 2020;63(8):610–618. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01830-z>
23. Джонсон Н., Лион Ф. *Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Т. 2. Методы планирования эксперимента*. Москва: Мир; 1981. 516 с.
Johnson N.L., Leone F.C. *Statistics and Experimental Design in Enguneerubg and the Physical Sciences. Volume II*. Moscow: Mir; 1981. 516 p. (In Russ.).
24. Roach P., Shirtcliffe N.J., Newton M.I. Progress in Superhydrophobic Surface Development. *Soft Matter*. 2008;4(2):224–240. <https://doi.org/10.1039/b712575p>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Анисимов Александр Дмитриевич, аспирант, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация.

e-mail: sashka.anisimov.99@mail.ru,
ORCID: [0009-0002-0018-7824](https://orcid.org/0009-0002-0018-7824)

Alexandr D. Anisimov, Postgraduate, Moscow State Technological University "STANKIN", Moscow, the Russian Federation.

Мастеренко Дмитрий Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Информационно-измерительные и управляющие системы», Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация.

e-mail: d.masterenko@stankin.ru
ORCID: [0000-0003-1041-4218](https://orcid.org/0000-0003-1041-4218)

Dmitry A. Masterenko, Doctor of Engineering Sciences, Docent, Professor, Department of Information Measurement and Control Systems, Moscow State Technological University "STANKIN", Moscow, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 29.04.2025; одобрена после рецензирования 29.05.2025; принята к публикации 06.06.2025.

The article was submitted 29.04.2025; approved after reviewing 29.05.2025; accepted for publication 06.06.2025.