SOCAR Proceedings

Oil and gas structures and equipment

journal home page: http://proceedings.socar.az

ИНТЕНСИФИКАТОРЫ С ДИСКРЕТНО-ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В УСТАНОВКАХ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И БУДУЩИЙ ПОТЕНЦИАЛ

О. А. Коленчуков[1], Т. Н. Коленчукова[1], К. А. Башмур*[1], В. В. Бухтояров[1,2], Р. Б. Сергиенко[3]

[1]*Институт нефти и газа, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия;*

[2]*Центр НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;*

[3]*Gini Gmbh, Мюнхен, Германия*

Discrete rough surface intensifiers in the thermal decomposition plants: current status and future potential

O. A. Kolenchukov[1], T. N. Kolenchukova[1], K. A. Bashmur*[1], V. V. Bukhtoyarov[1,2], R. B. Sergienko[3]

[1]*Institute of Petroleum and Natural Gas Engineering, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;*

[2]*Digital Material Science: New Materials and Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;*

[3]*Gini Gmbh, Munich, Germany*

ABSTRACT

It is known that roughness affects the drop in hydraulic pressure, increasing the resistance force. The formation of a boundary layer on rough surfaces significantly affects fluid dynamics and the process of heat exchange in convective flows, causing disturbances in the velocity profile and affecting surface resistance, turbulent mixing and heat exchange. Despite the fact that there are a large number of experimental and CFD studies in the field of studying turbulent flow, there is no full-fledged review of this issue. In view of this, it is necessary to systematize studies related to the study of the influence of a rough surface during turbulent fluid flow. In most cases, roughness is quantified only using a single scaling parameter – the equivalent roughness height of a grain of sand, which can be expressed based on statistical parameters. This article presents an overview and generalization of data on the parameters and characteristics of rough surfaces. The correlation method is considered using the standard deviation in the slope of the roughness profile, as well as the effect of the secondary flow on the flow of the coolant in a closed space. The results of this study can be used in the intensification of heat transfer in thermal destruction reactors using intensifiers in the form of discretely rough surfaces.

Keywords: discrete-rough surfaces; thermal contact surface;и rough surface; turbulent flow; pyrolysis reactor; thermal destruction; heat exchanger.

© 2023 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

Введение

Дискретно-шероховатые поверхности могут существенно влиять на динамику флюида и процесс теплообмена в конвективных потоках, вызывая возмущения в профиле скорости, которые влияют на поверхностное сопротивление, турбулентное перемешивание и теплообмен. Хотя шероховатость поверхности часто может негативно влиять на производительность систем, она также может привести к повышению производительности, например, в конвективных потоках, где было доказано, что элементы шероховатости улучшают теплопередачу. Несмотря на то, что есть большое количество экспериментальных и CFD-исследований в области изучения турбулентного потока, полноценного обзора этой проблематики не существует. Поэтому в этом обзоре рассматриваются прошлые и недавние экспериментальные и численные исследования, посвященные основам и теориям, связанным со структурой турбулентных течений по шероховатым поверхностям. В этом исследовании в основном акцентируется внимание на структуре среднего профиля потока по шероховатым поверхностям и его корреляции со средним профилем потока на гладкой поверхности.

Цель данной работы заключается в систематизации известных исследований в области турбулентных течений по шероховатым поверхностям и формулировка метода корреляции с использованием среднеквадратичного отклонения по уклону профиля шероховатости. Полученные данные могут внести вклад в перспективные экспериментальные и численные исследования. А также послужат определением характеристик турбулентных потоков и теплопередачи на шероховатых поверхностях для различных научных и инженерных приложений в процессах термической деструкции (пиролиза) углеводородных материалов, в том числе в реакторах секционного типа [1].

E-mail: bashmur@bk.ru

http://dx.doi.org/10.5510/OGP2023SI100823

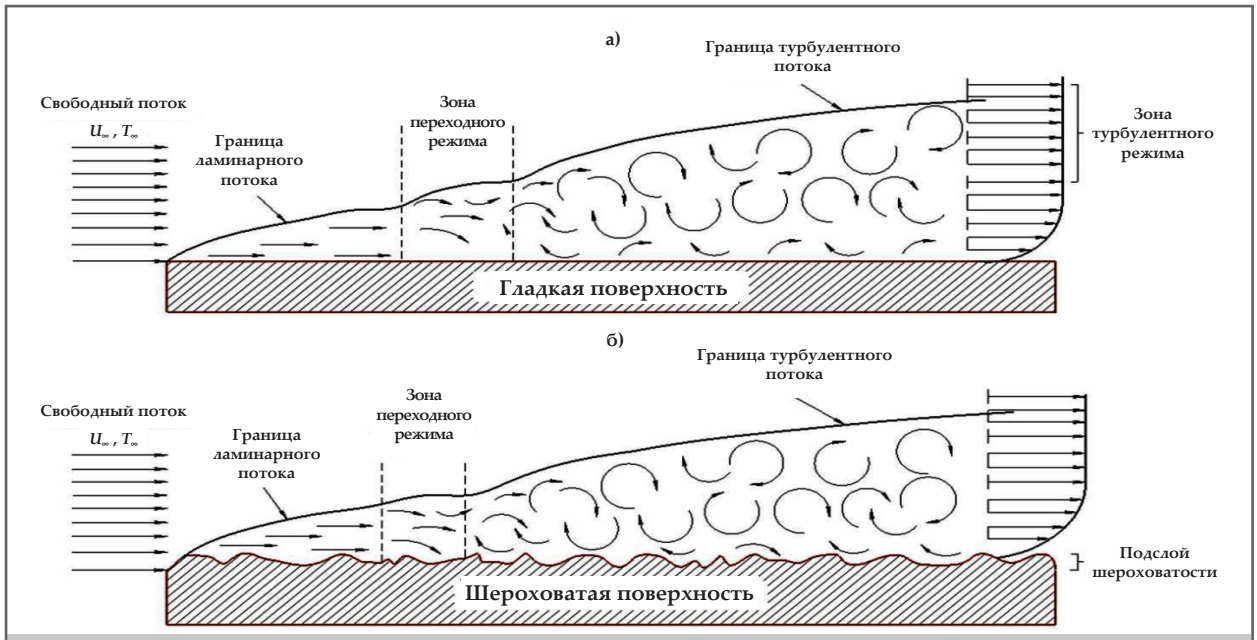

Рис.1. Течение потока по (а) гладкой и (б) шероховатой поверхностям

Эволюция исследований в области течения потока по шероховатой поверхности

Исследование шероховатости в турбулентных потоках впервые было начато Хагеном [2] и Дарси [3], которые обнаружили, что шероховатость влияет на падение давления, увеличивая силу сопротивления. Образование пограничного слоя на поверхности существенно влияет на передачу тепла и импульса. Шероховатость этих поверхностей оказывает значительное влияние на течение пограничного слоя и, таким образом, влияет на передачу тепла и импульса через границу раздела «жидкость-поверхность». Рисунок 1 иллюстрирует профиль пограничного слоя на гладких и шероховатых поверхностях.

На передней кромке пластины поток ламинарный до тех пор, пока в какой-то момент не возникнет нестабильность потока, инициирующая ламинарно-турбулентный переход.

Шероховатость поверхности может возникнуть в результате производственных процессов [4-5] или в результате усталостного разрушения металла. А также включая процессы эрозии, коррозии, осаждения в газовых турбинах и проточных частях реактора пиролиза [6-7], отложениях в камерах сгорания [8]. Эти типы неровностей могут поставить под угрозу безопасность, производительность и эффективность систем, главным образом из-за изменения турбулентной структуры, а также передачи импульса и энергии. Например, в обзорном исследовании газовых турбин компания Bons [9] сообщила, что процессы естественного разрушения и осаждения влияют на шероховатость поверхности в достаточной степени, чтобы снизить производительность как компрессора, так и турбины.

Шероховатость поверхности также может служить методом улучшения теплопередачи путем модифицирования теплоносителя с добавлением наночастиц. Было обнаружено, что «наножидкости» дополнительно улучшают производительность теплообменников [10] и как новое поколение теплоносителей они показали большие перспективы в улучшении теплопередачи [11-14]. Было доказано, что геометрические ограничения, такие как шероховатость поверхности, могут влиять на тепловые характеристики наножидкостей, в том числе за счет увеличения площади и вихревых эффектов [15-17].

Наряду с экспериментальными исследованиями, вычислительная гидродинамика (CFD) [18] получила широкое применение для изучения турбулентных потоков. Шероховатость поверхности может быть учтена в вычислительной гидродинамике либо путем включения элементов прямого численного моделирования (DNS) в модели турбулентного потока, либо путем моделирования вихревых потоков (LES) [19] и решения усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS). Принятие подходящего численного метода зависит от физики задачи (геометрии, числа Рейнольдса и т.д.) и, что более важно, от доступных вычислительных ресурсов. Современные вычислительные возможности позволили исследователям выполнять прямое численное моделирование (DNS) турбулентных течений по шероховатым поверхностям со сложной геометрией, включая нерегулярную/случайную шероховатость [20-21] или отсканированные реальные поверхности (3D-сканирование) [22-24].

Несколько научных источников содержат информацию о потоке и теплопередаче по шероховатым поверхностям, например, пособие Шлихтинга [25], Уилкокса [26], Кейса и Кроуфорда [27]. Несмотря на большое количество экспериментальных и CFD-исследований влияния шероховатой поверхности на поток и теплопередачу, количество обзорных статей, связанных с этой темой, на удивление мало, и большинство из них были опубликованы десятилетия назад. В 1985 году Патель и др. [28] рассмотрели турбулентные модели вблизи стенок и потоков с малым числом Рейнольдса, с небольшим акцентом на шероховатость поверхности. В последствие в 1991 году Раупах и др. [29] были рассмотрены экспериментальные и теоретические результаты лабораторных исследований потоков атмосферного пограничного слоя (ABL). В 1998 году Патель [30] рассмотрел исследования потоков с высоким числом Рейнольдса по шероховатым поверхностям для перспективных применений CFD. Он представил сильные и слабые стороны некоторых турбулентных CFD-

моделей для течения по шероховатым поверхностям и заявил о необходимости дальнейших экспериментальных исследований и более точных численных методов. В 2004 году Хименес [31] был проведен обзор экспериментальных исследований, связанных с характеристикой турбулентных течений по различным типам шероховатости. В 2010 году компания Bons провела обзор последних 60 лет исследований влияния шероховатой поверхности на производительность газовой турбины. В том же году Флэк и Шульц [32] рассмотрели методы прогнозирования, используемые для определения сопротивления трению на шероховатых поверхностях. В 2019 году Пьомелли [33] дали обзор исследований, проведенных с DNS и LES в Лаборатории моделирования турбулентности, подчеркнув полезность данных, которые могут быть получены с помощью численного моделирования, в то же время поддерживая необходимость более полного обзора исследований по этому вопросу.

Из приведенного выше обзора следует, что существует большой пробел для всестороннего обзора недавних и прошлых экспериментальных и численных исследований основ и теорий турбулентных течений с шероховатыми поверхностями.

Поверхность технологических каналов трубопроводов состоит из совокупности неровностей, которые можно описать различными параметрами и характеристиками. Данные параметры необходимы для описания состояния поверхности.

Параметры и характеристики шероховатости поверхности

Как правило, текстура поверхности, также известная как морфология поверхности, включает в себя ряд геометрических неровностей, которые случайным образом или равномерно распределены по гладкой поверхности. Частота высоты неровностей количественно определяет тип поверхности, как показано на рисунке 2.

Геометрические неровности с высокой частотой рассматриваются как «шероховатость» в то время как неровности со средней частотой рассматриваются как «волнистость». Геометрические неровности с низкой частотой известны как «форма поверхности» которая больше не рассматривается как текстура поверхности. Различие между шероховатостью, волнистостью и формой можно найти в [34].

Как обсуждалось ранее в данной статье, шероховатость может влиять на передачу тепла и импульса в пограничном слое. Это влияние можно наблюдать за счет увеличения перепада давления, изменения ламинарно-турбулентных переходов потока, индуцирования вторичных движений потока, улучшения перемешивания потока и усиления теплопередачи. Как правило, шероховатые поверхности можно разделить на две категории [35]: 2D-шероховатость и 3D-шероховатость. Термин 2D-шероховатость относится к поверхностям с линейным профилем, таким как поперечные ребра и канавки с различными поперечными сечениями, которые благоприятны для применений теплопередачи [36-37]. Термин 3D-шероховатость относится к поверхностям с площадными картами высот, которые состоят из регулярных или нерегулярных элементов шероховатости, которые систематически/случайным образом распределены по поверхности.

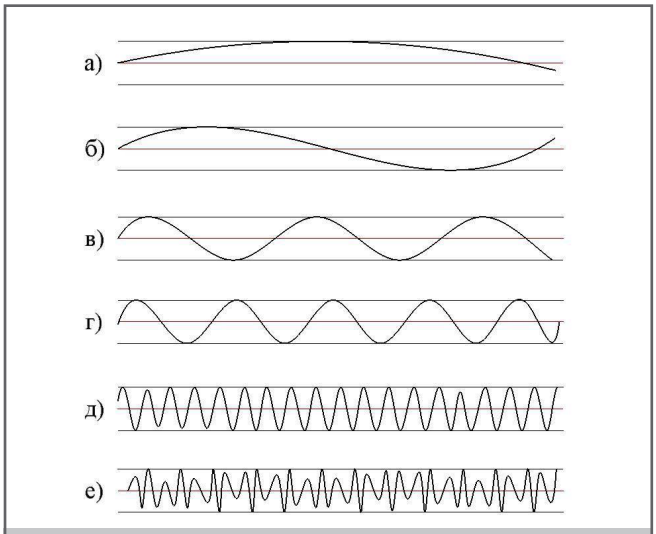

Рис. 2. Поверхности с разной длиной волны, но одинаковой амплитудой: (а) и (б) формы поверхности; (в) и (г) волнистость; (д) и (е) шероховатость

Турбулентные движения в ограниченных шероховатых поверхностях имеют ряд трудностей, одной из которых связано с большим количеством вариантов этих поверхностей, и в данный момент для прогнозирования вида применяется метод корреляционного анализа.

Методы корреляции эквивалентной шероховатости песчинки

Эквивалентная шероховатость песчинки k_s может быть определена для каждого типа шероховатости. Чтобы найти распределение скоростей $U(y)$ в пограничном слое вблизи шероховатой поверхности, уравнение для определения эквивалентной шероховатости песчинки k_s можно записать в виде:

$$k_s = \exp\left\{\kappa \lim_{y\to 0}\left[8.0 + \frac{1}{\kappa}\ln y - \frac{U(y)}{\sqrt{\tau_w/\rho}}\right]\right\} \quad (1)$$

где τ_w – напряжение сдвига при $y=0$; k – константа Кармана, $k = 0.41$.

Большинство корреляций эквивалентной шероховатости песчинки k_s, описанных в литературе, были основаны на экспериментальных данных турбулентного течения вблизи шероховатых стенок. В нескольких исследованиях было предложено использовать k_s на основе среднего арифметического отклонения R_a. Экспериментальные исследования Баммерта и Санстеда [38] позволили определить отношение $k_s/R_a = 2$ для фрезерованных поверхностей, а Кох и Смит [39] нашли значение $k_s/R_a = 6$ для наждачной бумаги с различным значением зернистости.

Однако Богард доказал, что использование только среднего арифметического отклонения R_a недостаточно для полной характеристики шероховатости. Несколько исследователей определили k_s на основе других характеристик шероховатости, таких как момент инерции функции распределения вероятностей (PDF), уклон профиля шероховатости и плотность шероховатых элементов поверхности.

Маскер предложил использовать моменты инерции PDF при определении шкалы шероховатости. Затем он определил высоту шероховатости песчинки k с использованием среднеквадратичного отклонения R_q с корреляцией по уклону профиля шероховатости s_p, асимметрией s_k и эксцессом k_u в виде:

$$k = R_q\left(1 + as_p\right)\left(1 + bs_k k_u\right) \quad (2)$$

где a и b – эмпирические константы, соответствующие данным о шероховатых поверхностях. Корреляция Маскера была разработана на основе пяти статистических параметров шероховатых поверхностей.

При движении жидкости в трубопроводах возможно возникновение зон отрыва потока. В турбулентном режиме при различных скоростях относительно двух и более точек возникают нулевые поперечные составляющие, вызывающие вторичные потоки.

Влияние вторичных потоков

Вторичные потоки – это возникновение заметных движений жидкости перпендикулярно основному направлению потока в ограниченном стенками пространстве. Вторичные движения турбулентного потока в каналах некруглого поперечного сечения впервые были обнаружены Никурадсе с различными типами вторичных движений, которые затем были введены и классифицированы Прандтлем: вторичные потоки первого рода и вторичные потоки второго рода. Вторичный поток первого рода Прандтля возникает в изогнутых каналах/трубах любой геометрии поперечного сечения из-за центробежной силы, которая преобладает как в турбулентных, так и в ламинарных потоках. Вторичное течение второго рода Прандтля имеет место при турбулентном течении в каналах некруглого поперечного сечения и связано с неоднородностями напряжений Рейнольдса [40]. Это также может происходить в плоских или симметричных потоках, ограниченных стенками, если существует локальная неоднородность, например, из-за шероховатости поверхности. Вторичные потоки приводят к увеличению гидродинамического сопротивления и росту коэффициента теплоотдачи.

Несмотря на свою слабую интенсивность, вторичное движение может значительно влиять на поток и изменять профиль средней скорости из-за генерации локальной завихренности потока. Поперечная неоднородность вносит отчетливые градиенты в распределение напряжений Рейнольдса и изменяет локальные турбулентные свойства потока. Эти градиенты приводят к дисбалансу локальной турбулентной генерации и скорости диссипации, что для соблюдения баланса неизбежно приводит к возникновению локальной потоковой завихренности. Это в конечном итоге влечет за собой образование крупномасштабных вихревых пар, занимающих всю толщину пограничного слоя, и может значительно изменить профиль средней скорости. В усредненном поле скоростей эти особенности отчетливо видны. Исследователями было изучено применение вторичного потока для улучшения теплопередачи, в том числе улучшенная теплопередача за счет создания вторичного потока первого рода Прандтля в изогнутых трубах и второго рода Прандтля по шероховатым поверхностям.

Выводы

Шероховатость может влиять на поток жидкости и теплопередачу, увеличивая перепад давления, изменяя ламинарно-турбулентный переход режима течения и вызывая вторичные движения потока, которые приводят к улучшению перемешивания потока и теплопередачи. К усилению теплопередачи также приводит добавление в теплоноситель наночастиц. Эффективность применения таких «наножидкостей» была продемонстрирована на теплообменных устройствах. Однако не стоит забывать, что различные режимы работы оборудования требуют подбор соответствующих по характеристикам наночастиц, что затрудняет их повсеместное внедрение.

В большинстве исследований изучались продольные неоднородности, которые вызывают переход в пограничном слое, и поперечные неоднородности, которые способствуют возникновению вторичных движений потока, в то время как в нескольких исследованиях изучалась комбинация обоих. Хотя недавние экспериментальные и DNS-исследования пролили свет на различные аспекты восстановления потока при изменениях поперечной поверхности, эта область исследований все также изучена не до конца.

Всесторонний анализ параметров и характеристик шероховатости показывает, что она подразделяется на две категории: 2D и 3D-шероховатость. При этом сама шероховатость образована геометрической неровностью с высокой частотой. В случае низкой частоты геометрическая неровность характеризуется как «форма поверхности», средней – «волнистость».

На основе данных научных исследований сформулирован метод корреляции с использованием среднеквадратичного отклонения по уклону шероховатости, асимметрии и эксцесса на основе пяти статистических параметров шероховатых поверхностей. Объяснено влияние вторичного потока на изменение профиля средней скорости из-за генерации локальной завихренности турбулентного течения.

Результаты проведенных исследований показывают, что на сегодняшний день исследованы не все характеристики и их влияние на теплообмен интенсификаторов теплообмена в виде дискретно-шероховатых (термоконтактных) поверхностей. Хотя существующие устройства и оказывают ощутимое воздействие на теплообмен, тем не менее требуются дополнительные исследования с целью повышения их эффективности в существующих реакторах термической деструкции (пиролиза). Неотъемлемой частью повышения их надежности является разработка универсальной технологии изготовления данных устройств.

Исследования выполнены по государственному заданию по проекту «Разработка комплекса научно-технических решений в области создания биотоплив и оптимальных биотопливных композиций, обеспечивающих возможность трансформации потребляемых видов энергоносителей в соответствии с тенденциями энергоэффективности, снижения углеродного следа продукции и использования видов топлива альтернативных ископаемому» (Контракт FSRZ-2021-0012) в научной лаборатории биотопливных композиций Сибирского федерального университета, созданной в рамках деятельности Научно-образовательного центра «Енисейская Сибирь».

Литература

1. Kolenchukov, O. A., Petrovsky, E. A., Bashmur, K. A., et al. (2021). Simulating the hydrocarbon waste pyrolysis in reactors of various designs. *SOCAR Proceedings*, 2, 1-7.

2. Mohammadi, A., Floryan, J. (2013). Pressure losses in grooved channels. *Journal of Fluid Mechanics,* 725, 23-54.

3. Eckert, M. (2021). Pipe flow: a gateway to turbulence. *Archive for History of Exact Sciences*. 75, 249–282.

4. Bons, J. P. (2010). A review of surface roughness effects in gas turbines. *Journal of Turbomachinery,* 132(2), 16.

5. Stripf, M., Schulz, A., Bauer, H. J. (2008). Modeling of rough-wall boundary layer transition and heat transfer on turbine airfoils. *Journal of Turbomachinery,* 130(2), 11.

6. McClain, S. T., Vargas, M., Tsao, J. C., Broeren, A. (2019). Influence of freestream temperature on ice accretion roughness SAE. *Technical Papers - Publications - SAE International*, 2(1), 227-237.

7. Liu, Y., Zhang, K., Tian, W., Hu, H. (2020). An experimental investigation on the dynamic ice accretion and unsteady heat transfer over an airfoil surface with embedded initial ice roughness. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 146, 118900.

8. Forooghi, P., Weidenlener, A., Magagnato, F., et al. (2018). DNS of momentum and heat transfer over rough surfaces based on realistic combustion chamber deposit geometries. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 69, 83-94.

9. Schultz, M. P. (2007). Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering. *Biofouling*, 23, 331-341.

10. Walker, J. M., Flack, K. A., Lust, E. E., et al. (2014). Experimental and numerical studies of blade roughness and fouling on marine current turbine performance. *Renewable Energy*, 66, 257-267.

11. Li, J., Tsubokura, M., Tsunoda, M. (2017). Numerical investigation of the flow past a rotating golf ball and its comparison with a rotating smooth sphere. *Flow, Turbulence Combustion*, 99(3), 837-864.

12. Oeffner, J., Lauder, G.V. (2012). The hydrodynamic function of shark skin and two biomimetic applications. *Journal of Experimental Biology*, 215(5), 785-795.

13. Suleimanov, B. A., Ismayilov, R. H., Abbasov, H. F., et al. (2017). Thermophysical properties of nano- and microfluids with $[Ni_5(\mu_5\text{-pppmda})_4Cl_2]$ metal string complex particles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 513, 41-50.

14. Suleimanov, B. A., Abbasov, H. F., Valiyev, F. F., et al. (2019). Thermal-conductivity enhancement of microfluids with Ni3(μ3-ppza)4Cl2 metal string complex particles. *ASME Journal of Heat Transfer,* 141, 012404.

15. Shu, L., Li, H., Hu, Q., et al. (2018). Study of ice accretion feature and power characteristics of wind turbines at natural icing environment. *Cold Regions Science and Technology*, 147, 45-54.

16. Lien, F. S., Yee, E., Cheng, Y. (2004). Simulation of mean flow and turbulence over a 2D building array using high-resolution CFD and a distributed drag force approach. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92(2), 117-158.

17. Finnigan, J. (2000). Turbulence in plant canopies. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 32, 519-571.

18. Абдуллаев, В. Дж., Гамзаев Х. М. (2022). Численный метод определения коэффициента гидравлического сопротивления двухфазного потока в газлифтной скважине. *SOCAR Proceedings,* 1, 56-60.

19. Башмур, К. А., Петровский, Э. А., Тынченко, В. С. и др. (2021). Влияние гидроциклона-демпфера с рельефом поверхности на разделительную способность текучих неоднородных систем. *SOCAR Proceedings,* 2, 13-20.

20. Coceal, O., Belcher, S. E. (2004). A canopy model of mean winds through urban areas. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 130(599), 1349-1372.

21. Cheng, H., Castro, I. P. (2002). Near wall flow over urban-like roughness. *Boundary-Layer Meteorology*, 104(2), 229-259.

22. Roth, M. (2007). Review of atmospheric turbulence over cities. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 126(564), 941-990.

23. Barlow, J. F., Coceal, O. (2008). A review of urban roughness sublayer turbulence. *Technical Report. Met Office*.

24. Domel, A. G., Saadat, M., Weaver, J. C., et al. (2018). Shark skin-inspired designs that improve aerodynamic performance. *Journal of the Royal Society Interface*, 15(139), 20170828.

25. Liu, G., Yuan, Z., Qiu, Z., et al. (2020). A brief review of bio-inspired surface technology and application toward underwater drag reduction. *Ocean Engineering*, 199(1), 106962.

26. Li, P., Guo, D., Huang, X. (2020). Heat transfer enhancement, entropy generation and temperature uniformity analyses of shark-skin bionic modified microchannel heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 146, 118846.

27. Liu, W., Ni, H., Wang, P., Zhou, Y. (2020). An investigation on the drag reduction performance of bioinspired pipeline surfaces with transverse microgrooves. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 11(1), 24-40.

28. Dean, B., Bhushan, B. (2010). Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review. *Philosophical Transactions of the Royal Society a Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 368(1929), 4775-4806.

29. Soleimani, S., Eckels, S. (2021). A review of drag reduction and heat transfer enhancement by riblet surfaces in closed and open channel flow. *International Journal of Thermofluids*, 9(1), 100053.

30. Liang, G., Mudawar, I. (2019). Review of pool boiling enhancement by surface modification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 128, 892-933.

31. Alnaimat, F., AlHamad, I. M., Mathew, B. (2021). Heat transfer intensification in MEMS two-fluid parallel flow heat exchangers by embedding pin fins in microchannels. *International Journal of Thermofluids*, 9, 100048.

32. Boomsma, A., Sotiropoulos, F. (2016). Direct numerical simulation of sharkskin denticles in turbulent channel

flow. *Physics of Fluids*, 28(3), 035106.

33. Sharma, S. K., Kalamkar, V. R. (2015). Thermo-hydraulic performance analysis of solar air heaters having artificial roughness–a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 413-435.

34. Gawande, V. B., Dhoble, A. S. A., Zodpe, D. B. B. (2014). Effect of roughness geometries on heat transfer enhancement in solar thermal systems – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 347-378.

35. Alam, T., Kim, M. H. (2017). A critical review on artificial roughness provided in rectangular solar air heater duct. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 387-400.

36. Ahmad, D., van den Boogaert, I., Miller, J., et al. (2018). Hydrophilic and hydrophobic materials and their applications, energy sources, part a recover. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 40, 2686-2725.

37. Quéré, D. (2008). Wetting and roughness. *Annual Review of Materials Research*, 38(1), 71-99.

38. Bammert, K., Sandstede, H. (1976). Influences of manufacturing tolerances and surface roughness of blades on the performance of turbines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 98(1) 29–36.

39. Koch, C. C., Smith, L. H. (1976). Loss sources and magnitudes in axial-flow compressors. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 98, 411-424.

40. Abdullayev, V. J. (2021). New approach for two-phase flow calcuation of artifical lift. *SOCAR Proceedings*, 1, 49-55.

References

1. Kolenchukov, O. A., Petrovsky, E. A., Bashmur, K. A., et al. (2021). Simulating the hydrocarbon waste pyrolysis in reactors of various designs. *SOCAR Proceedings*, 2, 1-7.

2. Mohammadi, A., Floryan, J. (2013). Pressure losses in grooved channels. *Journal of Fluid Mechanics*, 725, 23-54.

3. Eckert, M. (2021). Pipe flow: a gateway to turbulence. *Archive for History of Exact Sciences*. 75, 249–282.

4. Bons, J. P. (2010). A review of surface roughness effects in gas turbines. *Journal of Turbomachinery*, 132(2), 16.

5. Stripf, M., Schulz, A., Bauer, H. J. (2008). Modeling of rough-wall boundary layer transition and heat transfer on turbine airfoils. *Journal of Turbomachinery*, 130(2), 11.

6. McClain, S. T., Vargas, M., Tsao, J. C., Broeren, A. (2019). Influence of freestream temperature on ice accretion roughness SAE. *Technical Papers - Publications - SAE International*, 2(1), 227-237.

7. Liu, Y., Zhang, K., Tian, W., Hu, H. (2020). An experimental investigation on the dynamic ice accretion and unsteady heat transfer over an airfoil surface with embedded initial ice roughness. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 146, 118900.

8. Forooghi, P., Weidenlener, A., Magagnato, F., et al. (2018). DNS of momentum and heat transfer over rough surfaces based on realistic combustion chamber deposit geometries. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 69, 83-94.

9. Schultz, M. P. (2007). Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering. *Biofouling*, 23, 331-341.

10. Walker, J. M., Flack, K. A., Lust, E. E., et al. (2014). Experimental and numerical studies of blade roughness and fouling on marine current turbine performance. *Renewable Energy*, 66, 257-267.

11. Li, J., Tsubokura, M., Tsunoda, M. (2017). Numerical investigation of the flow past a rotating golf ball and its comparison with a rotating smooth sphere. *Flow, Turbulence Combustion*, 99(3), 837-864.

12. Oeffner, J., Lauder, G.V. (2012). The hydrodynamic function of shark skin and two biomimetic applications. *Journal of Experimental Biology*, 215(5), 785-795.

13. Suleimanov, B. A., Ismayilov, R. H., Abbasov, H. F., et al. (2017). Thermophysical properties of nano- and microfluids with $[Ni_5(\mu_5\text{-pppmda})_4Cl_2]$ metal string complex particles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 513, 41-50.

14. Suleimanov, B. A., Abbasov, H. F., Valiyev, F. F., et al. (2019). Thermal-conductivity enhancement of microfluids with Ni3(μ3-ppza)4Cl2 metal string complex particles. *ASME Journal of Heat Transfer*, 141, 012404.

15. Shu, L., Li, H., Hu, Q., et al. (2018). Study of ice accretion feature and power characteristics of wind turbines at natural icing environment. *Cold Regions Science and Technology*, 147, 45-54.

16. Lien, F. S., Yee, E., Cheng, Y. (2004). Simulation of mean flow and turbulence over a 2D building array using high-resolution CFD and a distributed drag force approach. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92(2), 117-158.

17. Finnigan, J. (2000). Turbulence in plant canopies. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 32, 519-571.

18. Abdullayev, V. J., Gamzaev, Kh. M. (2022). Numerical method for determining the coefficient of hydraulic resistance two-phase flow in a gas lift well. *SOCAR Proceedings*, 1, 56-60.

19. Bashmur, K. A., Petrovsky, E. A., Tynchenko, V. S., и др. (2021). Effects of a rough surface vortex breaker hydrocyclone on the separating capacity of heterogeneous fluid systems. *SOCAR Proceedings*, 2, 13-20.

20. Coceal, O., Belcher, S. E. (2004). A canopy model of mean winds through urban areas. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 130(599), 1349-1372.

21. Cheng, H., Castro, I. P. (2002). Near wall flow over urban-like roughness. *Boundary-Layer Meteorology*, 104(2), 229-259.

22. Roth, M. (2007). Review of atmospheric turbulence over cities. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 126(564), 941-990.

23. Barlow, J. F., Coceal, O. (2008). A review of urban roughness sublayer turbulence. *Technical Report. Met Office*.

24. Domel, A. G., Saadat, M., Weaver, J. C., et al. (2018). Shark skin-inspired designs that improve aerodynamic performance. *Journal of the Royal Society Interface*, 15(139), 20170828.

25. Liu, G., Yuan, Z., Qiu, Z., et al. (2020). A brief review of bio-inspired surface technology and application toward underwater drag reduction. *Ocean Engineering*, 199(1), 106962.

26. Li, P., Guo, D., Huang, X. (2020). Heat transfer enhancement, entropy generation and temperature uniformity analyses of shark-skin bionic modified microchannel heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 146, 118846.

27. Liu, W., Ni, H., Wang, P., Zhou, Y. (2020). An investigation on the drag reduction performance of bioinspired pipeline surfaces with transverse microgrooves. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 11(1), 24-40.

28. Dean, B., Bhushan, B. (2010). Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review. *Philosophical Transactions of the Royal Society a Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 368(1929), 4775-4806.

29. Soleimani, S., Eckels, S. (2021). A review of drag reduction and heat transfer enhancement by riblet surfaces in closed and open channel flow. *International Journal of Thermofluids*, 9(1), 100053.

30. Liang, G., Mudawar, I. (2019). Review of pool boiling enhancement by surface modification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 128, 892-933.

31. Alnaimat, F., AlHamad, I. M., Mathew, B. (2021). Heat transfer intensification in MEMS two-fluid parallel flow heat exchangers by embedding pin fins in microchannels. *International Journal of Thermofluids*, 9, 100048.

32. Boomsma, A., Sotiropoulos, F. (2016). Direct numerical simulation of sharkskin denticles in turbulent channel flow. *Physics of Fluids*, 28(3), 035106.

33. Sharma, S. K., Kalamkar, V. R. (2015). Thermo-hydraulic performance analysis of solar air heaters having artificial roughness–a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 413-435.

34. Gawande, V. B., Dhoble, A. S. A., Zodpe, D. B. B. (2014). Effect of roughness geometries on heat transfer enhancement in solar thermal systems – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 347-378.

35. Alam, T., Kim, M. H. (2017). A critical review on artificial roughness provided in rectangular solar air heater duct. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 387-400.

36. Ahmad, D., van den Boogaert, I., Miller, J., et al. (2018). Hydrophilic and hydrophobic materials and their applications, energy sources, part a recover. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 40, 2686-2725.

37. Quéré, D. (2008). Wetting and roughness. *Annual Review of Materials Research*, 38(1), 71-99.

38. Bammert, K., Sandstede, H. (1976). Influences of manufacturing tolerances and surface roughness of blades on the performance of turbines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 98(1) 29–36.

39. Koch, C. C., Smith, L. H. (1976). Loss sources and magnitudes in axial-flow compressors. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 98, 411-424.

40. Abdullayev, V. J. (2021). New approach for two-phase flow calcuation of artifical lift. *SOCAR Proceedings*, 1, 49-55.

Интенсификаторы с дискретно-шероховатой поверхностью в установках термической деструкции: современное состояние исследований и будущий потенциал

О. А. Коленчуков[1], Т. Н. Коленчукова[1], К. А. Башмур*[1], В. В. Бухтояров[1,2], Р. Б. Сергиенко[3]

[1]Институт нефти и газа, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия;
[2]Центр НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества»,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;
[3]Gini Gmbh, Мюнхен, Германия

Реферат

Известно, что шероховатость влияет на падение гидравлического давления, увеличивая силу сопротивления движению потока среды. Образование пограничного слоя на шероховатых поверхностях существенно влияет на динамику жидкости и процесс теплообмена в конвективных потоках, вызывающих возмущения в профиле скорости и влияющих на поверхностное сопротивление, турбулентное перемешивание и теплообмен. Несмотря на то, что есть большое количество экспериментальных и CFD-исследований в области изучения турбулентного потока, полноценного обзора этой проблематики не существует. Ввиду этого необходимо систематизировать исследования, связанные с изучением влияния шероховатой поверхности при турбулентном течении флюида. В большинстве случаев шероховатость определяется количественно только с помощью единственного параметра масштабирования – эквивалентной высоты шероховатости песчинки, которая может быть выражена на основе статистических параметров. В данной статье представлен обзор и обобщение данных по параметрам и характеристикам шероховатых поверхностей. Рассматривается метод корреляции с использованием среднеквадратичного отклонения по уклону профиля шероховатости, а также влияние вторичного потока на течение теплоносителя в замкнутом пространстве. Результаты данного исследования могут найти применение при интенсификации теплообмена в реакторах термической деструкции с использованием интенсификаторов в виде дискретно-шероховатых поверхностей.

Ключевые слова: дискретно-шероховатые поверхности; термоконтактная поверхность; шероховатая поверхность; турбулентный поток; реактор пиролиза; термическая деструкция; теплообменный аппарат.

Termal destruksiya qurğularında diskret nahamarlıq səthli intensivləşdiricilər: tədqiqatların mövcud vəziyyəti və gələcək potensial

O. A. Kolençukov[1], T. N. Kolençukova[1], K. A. Başmur[1], V. V. Buxtoyarov[1,2], R. B. Serqiyenko[3]

[1]Sibir Federal Universiteti, Neft və Qaz İnstitutu, Krasnoyarsk, Rusiya;
[2]«Rəqəmsal materialşünaslıq: yeni materiallar və maddələr» Milli Texnologiya təşəbbüsü Mərkəzi»,
N.E.Bauman adına MDTU, Moskva, Rusiya; [3]Gini Gmbh, Munhen, Almaniya

Xülasə

Nahamarlıq hidravlik təzyiqin düşməsinə təsir göstərdiyi, mühitin axınının hərəkətinə müqavimət gücünü artırdığı bilinir. Nahamar səthlərdə sərhəd təbəqənin əmələ gəlməsi mayenin dinamikasına və konvektiv axınlarda istilik mübadiləsi prosesinə əhəmiyyətli dərəcədə təsir edir, sürət profilində pozulmalara səbəb olur və səthi gərilməyə, turbulent qarışmaya və istilik mübadiləsinə təsir göstərir. Turbulent axının öyrənilməsi sahəsində çoxlu sayda eksperimental və CFD tədqiqatlarının olmasına baxmayaraq, bu məsələnin tam nəzərdən keçirilməsi mövcud deyil. Bunu nəzərə alaraq, turbulent flüid axınında nahamar səthin təsirinin öyrənilməsi ilə bağlı tədqiqatları sistemləşdirmək lazımdır. Əksər hallarda nahamarlıq yalnız bir miqyaslama parametrindən - statistik parametrlərlə ifadə oluna bilən qum dənəciyinin ekvivalent nahamarlılığın hündürlüyündən istifadə etməklə kəmiyyətcə ölçülür. Bu məqalə nahamar səthlərin parametrləri və xüsusiyyətləri haqqında məlumatların icmalı və ümumiləşdirilməsi təqdim edilir. Korrelyasiya metodu, nahamar profilinin mailliyinin orta-kvadrat sapmasından, həmçinin ikinci axının qapalı məkanda istilik daşıyıcısı axınına təsirindən istifadə edilir. Bu tədqiqatın nəticələri diskret nahamar səthlər şəklində intensifikatorlardan istifadə edərək termal destruksiya reaktorlarında istilik mübadiləsini intensivləşdirmək üçün istifadə edilə bilər.

Açar sözlər: diskret nahamarlıq səthiləri; termokontakt səth; nahamar səth; turbulent axın; piroliz reaktoru; termiki destruksiya; istilik mübadiləsi aparatı.