

Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 5. С. 215–221
Thermal processes in engineering, 2023, vol. 15, no. 5, pp. 215–221

Научная статья
УДК 538.9, 515.1
DOI: 10.34759/tpt-2023-15-5-215-221

Топологический и физико-химический анализ отложений на рабочих поверхностях теплообменного оборудования

А.М. Ласица¹✉, П.А. Батраков¹, А.П. Аверченко¹,
М.С. Пешко¹, К.Н. Полещенко², Н.А. Семенюк¹

¹ Омский государственный технический университет, Омск, Россия

² Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Россия

✉ amlasitsa@gmail.com

Аннотация. В работе рассмотрен процесс формирования отложений на стенках теплообменного оборудования. Методами рентгенофлуоресцентного анализа и растровой электронной микроскопии исследован элементный состав и структура отложений, проведен анализ физических и химических процессов ответственных за формирование отложений. Предложено рассматривать процесс формирования отложений как процесс изменения топологии поверхности теплообменного оборудования, а параметр фрактальной размерности использовать как количественную характеристику данного процесса. В рамках линейной модели получено интегральное уравнение, описывающее процесс формирования отложений.

Ключевые слова: коррозионные отложения, теплообменное оборудование, кинетика коррозии, топологические модели, фрактальный анализ

Для цитирования. Ласица А.М., Батраков П.А., Аверченко А.П., Пешко М.С., Полещенко К.Н., Семенюк Н.А. Топологический и физико-химический анализ отложений на рабочих поверхностях теплообменного оборудования // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 5. С. 215–221. DOI: 10.34759/tpt-2023-15-5-215-221

Original article

Topological and physico-chemical analysis of deposits on the heat exchange equipment working surfaces

A.M. Lasitsa¹✉, P.A. Batrakov¹, A.P. Averchenko¹,
M.S. Peshko¹, K.N. Poleschenko², N.A. Semenyuk¹

¹ Omsk State Technical University, Omsk, Russia

² The Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

✉ amlasitsa@gmail.com

Abstract. The article considers the process of deposits forming on the walls of the heat exchange equipment. The elemental composition and structure of the deposits have been studied by the X-ray fluorescence analysis (XRF) and scanning electron microscopy (SEM). Analysis of physical and chemical processes contributing to the deposits formation was performed. The authors suggest considering the deposits forming process as the heat exchanging equipment surface topology changing process, and employ the fractal dimensionality as the qualitative characteristic of the said process. Integral equation describing the deposits forming process was obtained within the framework of the linear model.

© Ласица А.М., Батраков П.А., Аверченко А.П., Пешко М.С., Полещенко К.Н., Семенюк Н.А., 2023

Keywords: corrosion deposits, heat exchange equipment, corrosion kinetics, topological models, fractal analysis

For citation. Lasitsa A.M., Batrakov P.A., Averchenko A.P., Peshko M.S., Poleschenko K.N., Semenyuk N.A. Topological and physico-chemical analysis of deposits on the heat exchange equipment working surfaces. *Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 5, pp. 215–221. (In Russ.). DOI: 10.34759/tpt-2023-15-5-215-221

Введение

Теплообменное оборудование широко применяется как в сфере жилищно-коммунального хозяйства, так и в различных отраслях промышленности. При этом ресурс энергосбережения по некоторым оценкам составляет от 39 до 47 % [1]. Возможность извлечения данного ресурса напрямую связана с эффективностью эксплуатации теплообменного оборудования, в связи с чем в последнее время интенсивно развиваются автоматизированные системы управления тепловым хозяйством. Работоспособность и эффективность такой схемы зависит от ее способности предикативно, на основании показаний датчиков, предсказывать поведение теплообменного оборудования. Это возможно только в случае, если в управляющий контроллер заложены модели, описывающие физические и химические процессы в теплообменном оборудовании [2].

Среди множества протекающих процессов процесс формирования отложений на рабочих поверхностях теплообменного оборудования играет одну из самых существенных ролей. Наличие отложений оказывает влияние на процесс теплопереноса, скорость движения теплоносителя, распределение давления в системе. Формирование отложений на стенках теплообменных устройств является комплексным процессом, основанным на совместном протекании целой серии взаимосвязанных физических и химических явлений [3, 4]. При этом сам процесс формирования отложений, их физические и химические свойства специфичны для каждой среды, и, возможно, именно поэтому недостаточно изучены. Описание процессов в общем виде не представляется возможным ни с точки зрения аналитической постановки вопроса, ни с точки зрения численного решения. В связи с этим необходимо проведение предварительных экспериментальных исследований, позволяющих выделить основные факторы и механизмы формирования отложений. В данной статье проведен анализ закономерностей формирования

отложений в трубах системы водо- и теплообеспечения. Выбранный класс теплообменного оборудования безусловно является самым распространенным, и его исследование имеет наибольшее прикладное значение.

Исследование структуры и состава отложений

В качестве объектов исследования были выбраны стальные трубы диаметром 42,3 мм, толщина стенки 4 мм (ГОСТ 3262-75. Трубы стальные водогазопроводные). Выбор объекта исследования связан с тем, что данные трубы широко применяются для изготовления теплообменного оборудования (водовоздушные теплообменники, кожухотрубные теплообменники, пароводяные подогреватели), а также используются в водопроводном хозяйстве как промышленными предприятиями, так и предприятиями, обслуживающими жилой сектор. В качестве исследовательских методик применялась оптическая и электронная микроскопия, позволяющая оценить структуру отложений на стенках, а также рентгенофлуоресцентный анализ, с помощью которого определялся химический состав отложений. Исследования выполнялись на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-5700 с рентгеновским энергодисперсионным спектрометром JED-2300.

Типичный вид рентгенограммы приведен на рис. 1, результаты рентгенофлуоресцентного анализа представлены в табл. 1.

Таким образом, установлено, что отложения в основном сформированы оксидами железа в различном стехиометрическом составе. Наличие алюминия и кремния, видимо, обусловлено алюмосиликатами, находящимися в потоке воды из-за недостаточной очистки. Наличие соединений серы связано с ее присутствием в материале трубы (допускается действующим ГОСТом). Отметим, что в общем спектре отсутствует углерод, входящий в состав стали, углерод был обнаружен методом точечного анализа только в составе агломераций (рис. 2).

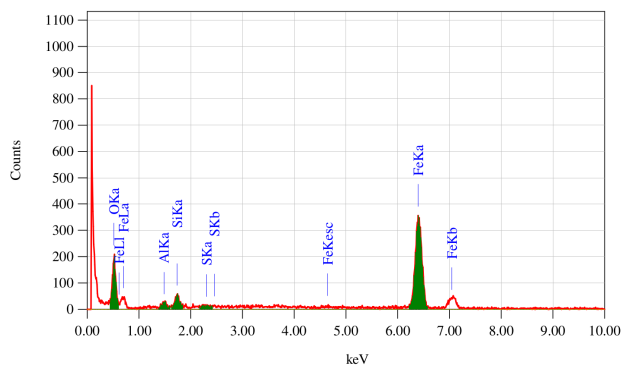
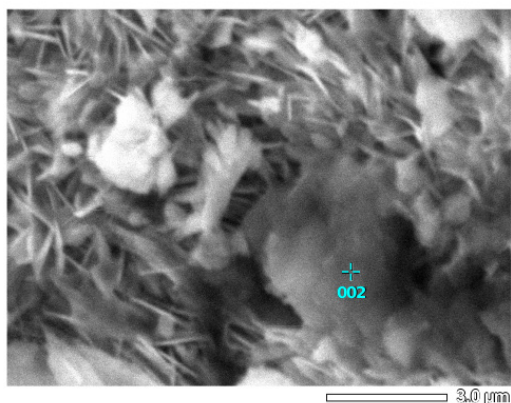


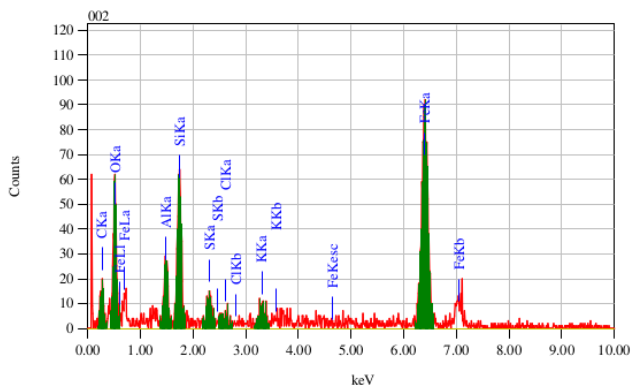
Рис. 1. Рентгенограмма спектрального анализа отложений

Таблица 1. Рентгенофлуоресцентный анализ образца

Элемент	Массовая доля, %	Атомная доля, %	Относительная ошибка определения, %
O	27,80	55,84	1,18
Al	1,47	1,75	0,98
Si	2,85	3,26	0,91
S	0,19	0,19	0,63
Fe	67,69	38,96	1,89



а



б

Рис. 2. Распределение углерода в отложениях: а – углерод в агломерации с другими элементами, б – элементный состав агломераций

Происхождение агломерации может быть связано как с процессами переноса углерода из стали, так и наличием его в воде. Сам механизм образования подобных агломераций требует дополнительных исследований.

Из общего вида сформировавшихся отложений, приведенного на рис. 3, видно, что на макроуровне отложения представляют собой сложные слоистые структуры, что было зафиксировано и другими исследователями [5]. Процесс расслаивания, видимо, связан с формированием внутренних напряжений из-за сильного отличия свойств основного материала и отложений, подобные процессы характерны для многих покрытий [6]. В случае отложений на стенках теплообменного оборудования дополнительными причинами, вызывающими расслаивание, могут быть сезонные колебания, связанные с изменением параметров работы оборудования в течение годового цикла. Склонность отложений к расслаиванию сама по себе создает техническую проблему: при достаточно большой толщине отложений растет вероятность отслаивания массивных фрагментов, способных вызвать закупоривание внутреннего прохода, что по-

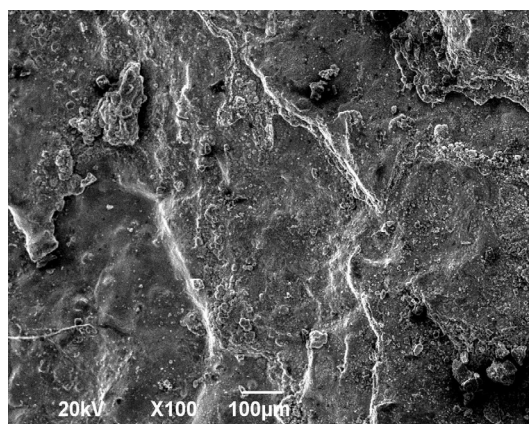


Рис. 3. Общий вид отложений

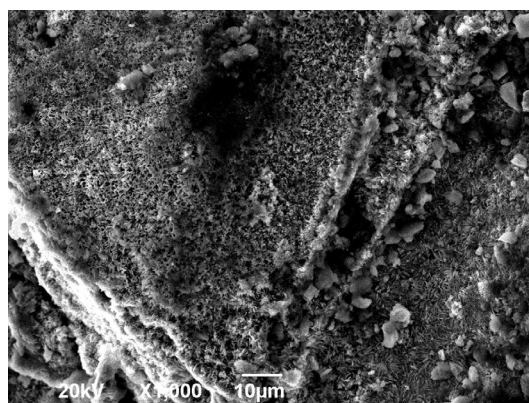


Рис. 4. Микроструктура отложений. Увеличение ×1000

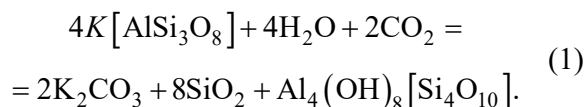
требует преждевременной замены трубы, соответственно, увеличится стоимость эксплуатации объектов хозяйства.

Структура отложений представляет собой сращенные агломерации игольчатых кристаллов. В пределах агломерации рост кристаллов осуществляется в преимущественном направлении, но направления роста соседних агломераций не связаны друг с другом.

Анализ полученных результатов

Анализ элементного состава позволяет утверждать, что наибольшее значение при формировании отложений имеет процесс коррозии металла, протекающий непрерывно и в зависимости от условий с различной скоростью. Поскольку большинство трубопроводов изготовлены из стали, то в составе всегда присутствуют железоксидные отложения. Этот компонент не зависит от теплоносителя, и во многих установках его доля может составлять более 95 % [7]. Соотношение атомарных долей железа и кислорода наиболее близко соединению Fe₃O₄, который составляет основу железоксидных отложений. Остальные формы оксидов железа (Fe₂O₃) образуют в преобладающем количестве шламовые отложения.

Химический состав силикатов и алюмосиликатов предсказать достаточно сложно. По всей видимости, они присутствуют в составе различных шпатов K[AlSi₃O₈], Na[AlSi₃O₈], Ca[Al₂Si₂O₈] и каолинита Al₄(OH)₈[Si₄O₁₀]. Как шпаты, так и каолинит являются породообразующими минералами и входят в состав многих почв. В составе воды они находятся из-за недостаточной очистки, а если требования к чистоте воды невысоки, могут вноситься в поток воды непосредственно из глиняных фильтров. Соотношение алюмосиликатных соединений предсказать, видимо, невозможно, так как при наличии в воде щелочных соединений, применяемых для пассивации железа, возможно превращение шпатов в каолинит. Процесс окисления их с водой можно представить в виде следующей химической реакции:



В пользу данного уравнения говорит наличие калия в спектре рентгенограммы на рис. 2.

Следует обратить внимание на то, что концентрации кремниевых кислот и алюмосиликатов изменяются в пределах от 100 мкг/кг на начальном этапе работы и до 10 мкг/кг при непрерывной стационарной работе энергоустановки. Данные концентрации находятся ниже значения растворимости, тем не менее алюмосиликаты практически всегда присутствуют в отложениях. Таким образом, в системе, состоящей из железа и его оксидов, алюмосиликатов и кремниевых кислот, идет цепочка взаимных превращений, приводящая к динамическому равновесию между компонентами.

Как показано на рис. 5, структура отложений, состоящая из игольчатых кристаллов с преимущественным направлением роста, является локально самоподобной и, следовательно, должна обладать свойствами фракталов. Для проверки этой гипотезы выполнялся анализ фрактальной размерности образцов. Расчет проводился тремя методами – методом подсчета кубов, методом триангуляции и методом спектра мощности. Описание методов можно найти в основополагающих работах [8, 9]. Результаты расчета фрактальной размерности приведены в табл. 2.

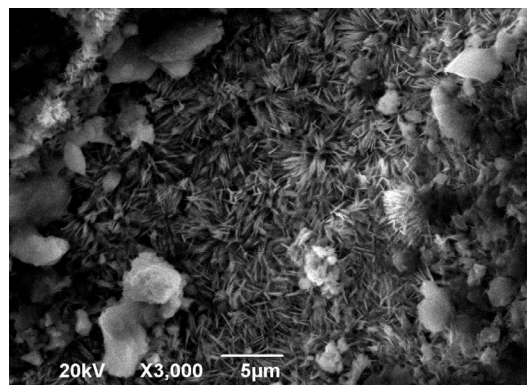


Рис. 5. Микроструктура отложений. Увеличение ×3000

Таблица 2. Анализ фрактальной размерности образцов

Метод	Подсчета кубов	Триангуляции	Спектра мощности
Фрактальная размерность <i>D</i>	2,53343	2,5983	2,52762

Отличие в результатах составляет менее 3 %. Наибольшей достоверностью обладают данные, полученные методом подсчета кубов, так как в этом случае экспериментальные точки наиболее близки к линейной зависимости (рис. 6).

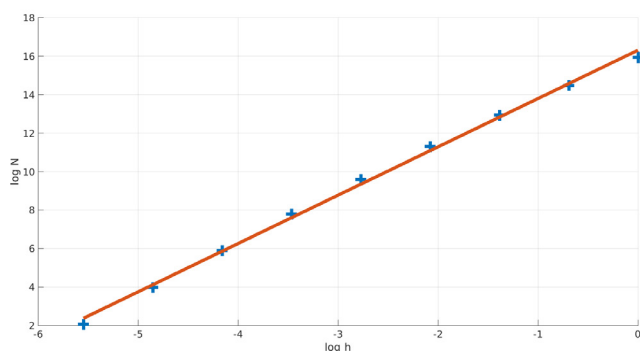


Рис. 6. Зависимость между числом блоков и масштабным фактором в двойном логарифмическом масштабе

Дробное значение фрактальной размерности подтверждает сделанное выше предположение о том, что с точки зрения топологии отложения на поверхностях теплообменного оборудования являются фракталами, занимающими промежуточное положение между двумерными и трехмерными объектами. Полученный результат позволяет вести описание процесса образования отложений с совершенно иной точки зрения – рассматривать образование отложений как процесс роста фрактальной размерности.

В первоначальном состоянии поверхность теплообменного оборудования можно считать двумерной структурой с $D = 2$, рост отложений на поверхности усложняет ее топологию и приводит к увеличению фрактальной размерности. При этом параметр фрактальной размерности D может успешно заменять такие параметры, как, например, шероховатость и пористость [10], и частично предоставить информацию о трехмерной структуре [11]. Преимущество использования топологического подхода состоит в том, что он может быть легко перенесен на другие физические и химические процессы, приводящие к изменению геометрии обрабатываемой поверхности, при этом топологическая терминология может быть использована для классификации получаемых структур [12].

Рассмотрение формирования отложений с позиции роста фрактальной размерности позволяет из общих соображений проанализировать кинетику процесса. Рассмотрим простейшую модель, основанную на следующих допущениях.

1. Скорость формирования отложений уменьшается по мере роста фрактальной размерности. Само предположение достаточно очевидно. При состоянии поверхности отложе-

ний со значением фрактальной размерности $D = 2$ (плоскость), скорость формирования отложений максимальна. При переходе в состояние с $D = 3$ (отложения заполнили весь прилегающий к стенке объем) формирование отложений в данном объеме прекратится. В общем виде это утверждение можно представить следующим соотношением

$$dM = f(D)dt. \quad (2)$$

Конкретный вид функции зависит от физико-химических процессов, ответственных за формирование отложений, но в самом простом случае можно предположить линейную зависимость, тогда

$$f(D) = V_{\text{MAX}}(n - D), \quad (3)$$

где V_{MAX} – максимальная скорость формирования, $n = 3$ – топологическая размерность пространства.

2. Фрактальная размерность растет по мере роста массы отложений. В общем случае связующая функция зависит от структуры самих отложений, но в рамках простейшей модели можно предположить, что фрактальная размерность, как связанная с поверхностью величина, растет пропорционально квадрату линейных размеров, а масса – пропорционально кубу. Предположение является очень грубым, так как фрактальная размерность не целочисленная величина, но позволяет получить достаточно простые соотношения

$$D \sim M^{(2/3)}, \quad dD \sim M^{(-1/3)}dM, \quad (4)$$

$$dM \sim M^{(1/3)}dD \sim D^{(1/2)}dD.$$

При объединении уравнений (2)–(4) получается интегральное соотношение

$$\int_2^D \frac{D^{(1/2)}dD}{3 - D} = V_{\text{MAX}}t. \quad (5)$$

Выражение записано для единичных коэффициентов пропорциональности, нижний предел интеграла взят в предположении о начальном плоском состоянии поверхности. В области $D < 3$ интеграл имеет вещественное решение

$$2\sqrt{2} - 2\sqrt{3} \operatorname{artanh}\left(\frac{\sqrt{6}}{3}\right) + \quad (6)$$

$$+ 2\sqrt{3} \operatorname{artanh}\left(\frac{(\sqrt{3D})}{3}\right) - 2\sqrt{D} = V_{\text{MAX}}t.$$

Трансцендентное уравнение (6) решалось численным методом в системе MATLAB и поз-

волило установить общий вид зависимости фрактальной размерности от времени. Поскольку в модели предполагается, что формирование отложений начинается на плоской поверхности (масса отложений равна нулю при $D = 2$), то масса отложений M связана с фрактальной размерностью D соотношением

$$M \sim (D - 2)^{3/2}. \quad (7)$$

Уравнение (7) позволяет с точностью до коэффициентов пропорциональности получить зависимость массы отложений от времени, аналогичная зависимость будет получаться для зависимости от времени толщины отложений, формируемых на плоских поверхностях. График для случая $V_{\text{MAX}} = 1$ приведен на рис. 7.

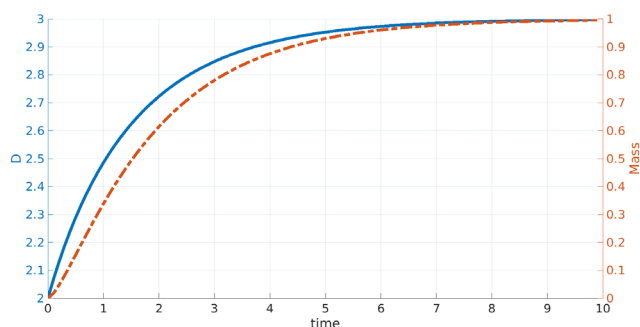


Рис. 7. Кинетика роста фрактальной размерности и массы отложений (— — фрактальная размерность, ·-· — масса)

Графики хорошо согласуются с начальными предположениями и описывают асимптотический рост отложений на поверхностях теплообменного оборудования.

Заключение

Отложения на стенках теплообменных поверхностей значительно влияют на характеристики их работы. Коэффициент теплоотдачи, рабочие давления и потоки, время работы до отказа и ряд других параметров во многом зависят от состояния отложений. Описание процесса формирования отложений стандартными методами физики и химии весьма затруднительно даже в самом простом случае, когда теплоносителем является вода с небольшим количеством примесей, в системе теплоноситель-железо возможно возникновение сложного осциллирующего процесса. Наличие в теплоносителе биоматериала, реагентов для пассивации, увеличение теплоотдачи может сделать анализ физикохимии процесса формирования отложе-

ний крайне затруднительным [13]. Дополнительно ситуация осложняется тем, что точный состав реагентов и их количество могут быть просто неизвестны. Наиболее приемлемым выходом в этой ситуации является построение моделей формирования отложений из общих соображений, без привязки к конкретным физико-химическим процессам в системе. По нашему мнению, одним из методов построения таких моделей может стать метод, основанный на использовании фрактальной размерности. Даже при сильных допущениях метод качественно передает кинетику формирования отложений. Использование более реалистичных соотношений между фрактальной размерностью и массой формируемых отложений, применение зависимостей, связывающих фрактальную размерность с толщиной отложений, позволят описывать процесс формирования отложений с любой точностью.

Список источников

1. Кузнецов Г.В., Озерова И.П., Половников В.Ю., Цыганкова Ю.С. Оценка фактических потерь тепла при транспортировке теплоносителя с учетом технического состояния и реальных условий эксплуатации тепловых сетей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2011. Т. 319. № 4. С. 56–60.
2. Peshko M.S., Batrakov P.A., Lasitsa A.M., Khomchenko V.S. Technological wear influence analysis on the decrease in the efficiency of a closed loop control of heat exchange equipment // Proceedings of the 33rd International DAAAM Virtual Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation" (27–28th October 2022), Hosted from Vienna University of Technology, Vienna, Austria. 2022. Vol. 33. No. 1. P. 0271–0278. DOI: 10.2507/33rd.daaam.proceedings.037
3. Crolet J.L. The electrochemistry of corrosion beneath corrosion deposits // Journal of materials science. 1993. Vol. 28. No. 10. P. 2577–2588.
4. Faes W., Lecompte S., Zaaquib Y., Van Bael J., Salenbien R., Verbeken K., De Paepe M. Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers // Corrosion reviews. 2019. Vol. 37. No. 2. P. 131–155.
5. Kuchař J., Kreibich V., Agartanov V., Petřík V. Maintenance and Cleaning of Heat Exchangers // Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2018. Vol. 919. P. 396–403.
6. Кузьбожев А.С., Шишкин И.В., Козлов Д.И. Моделирование распределения напряжений в слое защитного покрытия // Практика противокоррозионной защиты. 2013. № 4. С. 18–23.
7. Тербилов С.В., Батраков П.А., Таран М.А., Афанасьева О.В., Селиванов А.А., Вдовенко И.А. Повышение надежности работы жаротрубного котла, за счет снижения количества отложений на поверхностях нагрева // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. № 2 (46). С. 54–60.
8. Markel V.A., Shalaev V.M., Stechel E.B., Kim W., Armstrong R.L. Small-particle composites. I. Linear optical

- properties // *Physical Review B*. 1996. Vol. 53. No. 5. P. 2425–2436. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.53.2425>
9. **Van Put A., Vertes A., Wegrzynek D., Treiger B., Van Grieken R.** Quantitative characterization of individual particle surfaces by fractal analysis of scanning electron microscope images // *Fresenius' journal of analytical chemistry*. 1994. Vol. 350. No. 7–9. P. 440–447.
 10. **Иванов Д. В., Васильев С.А., Сдобняков Н.Ю., Романовская Е.В., Анофриев В.А., Кошелев В.А., Антонов А.С.** Моделирование процесса формирования фрактальных металлических пленок // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2020. Вып. 12. С. 424–437. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.424
 11. **Surikov V.I., Rogachev E.A., Lasitsa A.M.** Relationship Between Physical and Mechanical Properties of a Polymer Composite and Fractal Dimension of Structural Elements of its Surface // *Russian Physics Journal*. 2021. Vol. 64. No. 7. P. 1232–1238. DOI: 10.1007/s11182-021-02449-5
 12. **Полещенко К.Н., Коротаев Д.Н., Ерёмин Е.Н., Несов С.Н., Тарасов Е.Е., Теплоухов А.А., Семенюк Н.А., Иванова Е.В., Ласица А.М., Иванов А.Л.** Формирование наноструктурных топокомпозигов с кластерно-градиентной архитектурой комбинированной ионно-вакуумной обработкой // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2021. Т. 19. № 2. С. 68–78.
 13. **Kutz M.** Handbook of environmental degradation of materials. New York, William Andrew, 2018, 684 p.
 3. **Crolet J.L.** The electrochemistry of corrosion beneath corrosion deposits. *Journal of materials science*, 1993, vol. 28, no. 10, pp. 2577–2588.
 4. **Faes W., Lecompte S., Zaaquib Y., Van Bael J., Salenbien R., Verbeken K., De Paepe M.** Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers. *Corrosion reviews*, 2019, vol. 37, no. 2, pp. 131–155.
 5. **Kuchař J., Kreibich V., Agartanov V., Peřík V.** Maintenance and Cleaning of Heat Exchangers. *Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd*, 2018, vol. 919, pp. 396–403.
 6. **Kuzbozhev A.S., Shishkin I.V., Kozlov D.I.** Modelirovanie raspredeleniya napryazhenij v sloe zashchitnogo pokrytiya [Modelling of stress distribution in the protective coating layer]. *Praktika protivokorroziionnoj zashchity*, 2013, no. 4, pp. 18–23.
 7. **Terebilov S.V., Batrakov P.A., Taran M.A., Afanaseva O.V., Selivanov A.A., Vdovenko I.A.** Improving the reliability of the fluorotube boiler work, by reducing the amount of deposits on the heating surface. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2020, vol. 12, no. 2 (46), pp. 54–60.
 8. **Markel V.A., Shalaev V.M., Stechel E.B., Kim W., Armstrong R.L.** Small-particle composites. I. Linear optical properties. *Physical Review B*, 1996, vol. 53, no. 5, pp. 2425–2436. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.53.2425>
 9. **Van Put A., Vertes A., Wegrzynek D., Treiger B., Van Grieken R.** Quantitative characterization of individual particle surfaces by fractal analysis of scanning electron microscope images. *Fresenius' journal of analytical chemistry*, 1994, vol. 350, no. 7–9, pp. 440–447.
 10. **Ivanov D.V., Vasiliev S.A., Sdobnyakov N.Yu., Romanovskaya E.V., Anofriev V.A., Koshelev V.A., Antonov A.S.** Simulation of the fractal metal films formation. *Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*, 2020, iss. 12, pp. 424–437. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.424
 11. **Surikov V.I., Rogachev E.A., Lasitsa A.M.** Relationship Between Physical and Mechanical Properties of a Polymer Composite and Fractal Dimension of Structural Elements of its Surface. *Russian Physics Journal*, 2021, vol. 64, no. 7, pp. 1232–1238. DOI: 10.1007/s11182-021-02449-5
 12. **Poleshenko K.N., Korotaev D.N., Eremin E.N., Nesov S.N., Tarasov E.E., Teploukhov A.A., Semenyuk N.A., Ivanova E.V., Lasitsa A.M., Ivanov A.L.** Formation of nanostructured topocomposites with cluster-gradient architecture by combined ion-vacuum processing. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2021, vol. 19, no. 2, pp. 68–78.
 13. **Kutz M.** Handbook of environmental degradation of materials. New York, William Andrew, 2018, 684 p.

References

1. **Kuznetsov G.V., Ozerova I.P., Polovnikov V.Yu., Tsygankova Yu.S.** Ocenka fakticheskikh poter' tepla pri transportirovke teplonositelya s uchetom tekhnicheskogo sostoyaniya i real'nyh uslovij eksploatatsii teplovyh setej [Estimation of actual heat losses during transportation of the coolant, taking into account the technical condition and actual operating conditions of thermal networks]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*, 2011, vol. 319, no. 4, pp. 56–60.
2. **Peshko M.S., Batrakov P.A., Lasitsa A.M., Khomchenko V.S.** Technological wear influence analysis on the decrease in the efficiency of a closed loop control of heat exchange equipment. *Proceedings of the 33rd International DAAAM Virtual Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation" (27–28th October 2022)*. Hosted from Vienna University of Technology (Vienna, Austria), 2022, vol. 33, no. 1, pp. 0271–0278. DOI: 10.2507/33rd.daaam.proceedings.037

Статья поступила в редакцию 04.02.2023; одобрена после рецензирования 12.04.2023; принята к публикации 02.05.2023.

The article was submitted on 04.02.2023; approved after reviewing on 12.04.2023; accepted for publication on 02.05.2023.