

Интернет-журнал «Наукovedение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №4 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-4>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/34TVN415.pdf>

DOI: 10.15862/34TVN415 (<http://dx.doi.org/10.15862/34TVN415>)

**УДК 62-408**

**Фандеев Владимир Петрович**

ГОУ ВПО «Пензенский государственный университет»

Россия, Пенза<sup>1</sup>

Профессор

Доктор технических наук

E-mail: [lyudmilarotmanova@yandex.ru](mailto:lyudmilarotmanova@yandex.ru)

**Самохина Кристина Сергеевна**

ГОУ ВПО «Пензенский государственный университет»

Россия, Пенза

Аспирантка кафедры «Медицинская кибернетика и информатика»

E-mail: [skristina1990@rambler.ru](mailto:skristina1990@rambler.ru)

## **Методы исследования пористых структур**

---

<sup>1</sup> 440018, Россия, г. Пенза, ул. Карпинского, 40, кв. 41

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы исследования пористых структур. Представлена классификация параметров пористой структуры.

Основной материал статьи посвящен рассмотрению вопросов систематизации методов исследования пористых структур, их достоинствам и недостаткам. Показано, что пористая структура характеризуется комплексом параметров достаточных для её исследования. Форма, объём и протяжённость отдельной поры обычно трудноопределимы. Вместе с тем можно выделить характерные размеры поры относительно простой формы, которыми определяются свойства пористой структуры. Основными параметрами пористой структуры при её статистическом описании принимаются функция и плотность распределения пор по размерам и объёма пор по радиусам. Методика исследования пористой структуры должна основываться на комплексном методическом подходе, предусматривающем сочетание методов порометрии согласованное с классификационной группировкой и характеристиками пористой структуры.

В работе выявлено, что методика исследования пористой структуры должна основываться на комплексном методическом подходе, предусматривающем сочетание методов порометрии согласованное с классификационной группировкой и характеристиками пористой структуры. Изучение открытой макропористости возможно методами световой микроскопии, капиллярными, термoporометрии, жидкостной и газовой волюмометрии, заполнения пор жидкостью, гидростатического взаимодействия жидкостей, эталонной порометрии. Практически целесообразно сочетать методы световой микроскопии, компьютерного анализа изображений и порометрии.

**Ключевые слова:** волюмометр; калориметрический метод; метод дефектоскопии; методы малоуглового рассеяния излучений; микроструктурирование; пикнометрия; пористая структура; размер микропор; ртутная порометрия; систематизация; сорбционные методы; транспирационные методы; химический состав.

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Фандеев В.П., Самохина К.С. Методы исследования пористых структур // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №4 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/34TVN415.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/34TVN415

Материалы с пористой структурой обладают специфическими физическими свойствами. Для пористых материалов характерны значительная диффузионная проницаемость, малое гидродинамическое сопротивление, фильтрующая способность, высокие адсорбционные свойства, малые звукопроводность и теплопроводность, способность интеграции с биологическими тканями.

Систематизация пористых структур по элементному, химическому составу и строению твёрдых структурных частиц, по происхождению пористости не завершились созданием единой классификации, но выявила в качестве основы классификации отличия в механизме образования и структуре пористых сред [17]. Существенными для моделирования признаками классификации пористой структуры материалов являются происхождение и размерно-геометрические признаки.

Корпускулярные структуры образуются сложением большого числа отдельных элементов структуры, непористых и обладающих первичной пористостью (ткани, бумага, пористая керамика и металлы и др., неконсолидированные пористые среды). Пористая структура систем сложения образована промежутками между частицами, составляющими их скелет.

Развитие губчатых структур может быть результатом топохимических превращений или пиролитического разложения твёрдых веществ, выщелачивания и растворения компонентов твёрдой системы, высокотемпературных реакций твёрдого тела с газом, поверхностной и объёмной эрозии.

По геометрическим признакам пористые тела подразделяются на регулярные пористые структуры с правильным чередованием в объёме тела отдельных пор или полостей и соединяющих их каналов, связанных между собой скоплений пор, а также стохастические структуры, в которых форма, размеры, ориентация, взаимное расположение и взаимосвязи пор случайные. Большинство пористых материалов имеют стохастическую структуру.

Открытая пора сообщается с поверхностью тела и участвует в фильтрации жидкости или газа при наличии градиента давления на пористом теле. Тупиковая пора сообщается только с одной поверхностью тела, заполняется жидкостью или газом при фильтрации, но не влияет на проницаемость пористого материала. Закрытая пора не сообщается с поверхностью тела [15,17].

Пористая структура характеризуется несколькими основными параметрами достаточными для её исследования: пористостью и удельным суммарным объёмом пор, удельной поверхностью пористой системы, характерными размерами и распределением по размерам пор. Параметры для исследования пористой структуры материалов составляют комплекс пространственных (геометрических) физических и математических величин, которые определяются с помощью современных средств измерений и вычислительной техники (рисунок 1).

Характеристика пористой структуры (совокупная характеристика размеров и количества пор в теле), равная отношению свободного объёма  $V_c$  не заполненного элементарными структурными частицами к общему объёму  $V$  тела, называемая пористостью [4,17]:

$$\dot{\bar{V}} = \frac{V_c}{V} = 1 - \frac{V_T}{V} = 1 - T,$$

где  $V_T$  — объём твёрдого скелета или матрицы;  $T$  — доля объёма тела, занятая компактной или твёрдой частью.

Объём пор в общем случае складывается из объёмов открытых, тупиковых и закрытых пор и соответственно пористость складывается из открытой  $P_0$ , тупиковой  $P_T$  и закрытой  $P_3$  пористости.

Термин пористость иногда определяется как отношение объёма открытых пор к общему объёму пористого твёрдого тела [4].

Согласно правилу обращения пористых систем, характеристики  $P$  и  $T$  пористой структуры всегда положительные, безразмерные и дополняют друг друга до единицы:

$$P + T = 1.$$

Относительная пористость структуры характеризуется показателем, обозначаемым  $\xi$ , определяемым как отношение пористости к доле объёма тела, занятая компактной или твёрдой частью

$$\xi = \frac{P}{\bar{V}}.$$

Значение относительной пористости изменяется от 0 до  $\infty$  при изменении пористости от 0 до 1 [4,17]. Пористые среды, у которых  $\xi \leq 1$  и  $P \leq 0,5$  считаются малопористыми, а при  $\xi \geq 1$  и  $P \geq 0,5$  считаются высокопористыми.



**Рисунок 1.** Классификация параметров пористой структуры

Верхняя граница пористости  $P \approx 0,7...0,9$  ограничивается пределом сохранения устойчивой связности структурных элементов по всему объёму твёрдой части, выше которой наступает её разрушение. Нижняя граница увязывается с возможностью экспериментального определения пор как дефектов структуры, с вкладом пористости в изменение свойств пористого тела.

Пористостью рекомендуется пользоваться для исследования материалов, компоненты которых значительно отличаются по плотности.

Основными параметрами пористой структуры при её статистическом описании принимаются плотность распределения пор по размерам и функция или плотность распределения объёма пор по радиусам. Аппроксимация функции плотности распределения пор по размерам одним из типовых распределений позволяет характеризовать пористую систему параметрами этого распределения.

Функция и плотность распределения объёма пор по радиусам представляют наибольший практический интерес, поскольку более полно характеризуют неоднородность структуры реальных пористых тел. Плотность распределения объёма пор по радиусам определяется методами ртутной порометрии, капиллярной конденсации. С помощью функции

распределения пор по радиусам вычисляется плотность распределения пор по размерам и пористость.

Практическое значение имеет классификация пор по размерам, основанная на принципе относительности размеров пор и основных элементов структуры скелета пористого тела, предложенная Черемским, и классификация пор по размерам, согласованная со способом анализа пористости, предложенная Дубининым и приведённая в соответствие с нормами Международного союза теоретической и прикладной химии (IUPAC) [4,17].

Размеры макропор более нескольких микрометров значительно превышают размеры элементов структуры кристаллических тел (кристаллитов или мозаичных блоков). Микропоры соизмеримы с элементами структуры. Субмикропоры значительно меньше структурных частиц.

Классификация Дубинина применима для высокопористых систем, обладающих выраженными сорбционными свойствами. Процессы адсорбции очень чувствительны к линейному размеру пор, что позволяет с помощью методов анализа адсорбционной системы разграничивать поры по размерам.

Размеры микропор соизмеримы с размерами адсорбируемых молекул и адсорбция протекает не послойным заполнением поверхности молекулами, а по механизму объёмного заполнения. Доступность микропор молекулам адсорбтива определяется линейными размерами входов в микропоры и полостей микропор, критическим диаметром молекул адсорбтива.

Внутренняя поверхность пористых тел, образованная поверхностью раздела структурных частиц и пор, характеризуется удельной поверхностью (удельной площадью поверхности). Определяется как отношение общей (суммарной) поверхности пористого тела к его массе, обозначается  $S_{уд}$ , или объёму, обозначается  $S_V$ .

Связь между  $S_{уд}$  и  $S_V$  определяется соотношением

$$S_V = \rho S_{\sigma\bar{a}},$$

где  $\rho$  – кажущаяся плотность пористого тела, получаемая делением массы твёрдого тела на его полный объём (включая объём пор), определяемый в пикнометре, заполняемом ртутью [4].

Удельная поверхность предпочтительна для анализа мезопористых структур, так как для определения  $S_{уд}$  мезопор разработаны независимые методы, показывающие хорошую воспроизводимость результатов при их сопоставлении. В высокодисперсных микропористых системах размеры элементов структуры и пор соизмеримы с размерами молекул и определение  $S_{уд}$  часто сопряжено с неприемлемыми допущениями аналитических методов.

Известно более 60 аналитических методов исследования пористой структуры твёрдых тел систематизированных по физическим принципам определения её характеристик [16,17]. Систематизация методов исследования пористой структуры, предпринятая в нескольких работах [5,7,10,17,19] не завершилась пока созданием единой классификации методов порометрии.

Методы наблюдения, в отличие от всех других методов, позволяют непосредственно определять размеры, форму, взаимосвязи пор. Непосредственные наблюдения формы и взаимосвязи пор необходимы для интерпретации результатов методов порометрии, основанных на модельных представлениях о структуре. Имеются инструментальные средства наблюдения, отработаны методики, позволяющие изучать пористость всевозможных объектов в широком интервале размеров пор.

Методы капиллярной дефектоскопии основываются на явлениях капиллярности, сорбции и диффузии, позволяющих выявлять открытые поры размером более 0,1 мкм посредством их заполнения хорошо смачивающей индикаторной жидкостью (пенетрантом) и создания на поверхности тела индикаторных рисунков с высоким оптическим (яркостным и цветовым) контрастом, ширина линий которого намного превышает ширину раскрытия несплошностей. Капиллярная дефектоскопия в сочетании с визуально-оптическими методами и микроскопией применяется в производственных условиях для выявления несплошностей, глубина расположения которых более чем в 5 – 10 раз превышает их минимальный размер.

Ртутная порометрия, основанная на капиллярных явлениях, используется для изучения распределения пор по размерам вдавливанием ртути в поры. Жидкая ртуть не смачивает большинство материалов и практически не взаимодействует с ними. Каждому давлению соответствует определённый объём ртути, вдавленный в поры определённого радиуса. Повышая давление, и одновременно измеряя объём ртути, вдавленной в поры, можно построить интегральную кривую распределения удельного объёма пор по их диаметрам, определить пористость и удельную поверхность.

Транспирационные методы основываются на измерении проницаемости пористых материалов газами или жидкостями. Степень проницаемости определяется скоростью течения газа или жидкости через единицу площади и единицу толщины объёма при заданном давлении.

Сорбционные методы основаны на явлении конденсации газов (адсорбатов) на открытых (доступных для молекул газа) поверхностях адсорбентов. Эти методы, как и метод ртутной порометрии, пригодны для исследования материалов с развитой пористой структурой, дополняют метод ртутной порометрии в области микропор, самой трудной для порометрического анализа, позволяют надёжно определять удельную поверхность пористой структуры.

Методы малоуглового рассеяния излучений основаны на анализе уровня и характера углового распределения интенсивности рассеяния под малыми углами излучения, например, рентгеновского. Эти методы наряду со сведениями об основных параметрах пористой структуры в отличие от других методов позволяют анализировать закрытую пористость (замкнутые поры) в значительном интервале размеров от микропор до ультрапор.

Калориметрические методы определения удельной поверхности пористых тел основываются на непосредственной связи между теплотой погружения и поверхностными свойствами твёрдых тел. Погружение твёрдого тела в химически инертную смачивающую его жидкость, проникающую в микропоры, сопровождается самопроизвольным падением поверхностной энергии и выделением теплоты в системе. Экспериментально определяемая теплота погружения (смачивания) включает все тепловые эффекты взаимодействия твёрдого тела с жидкостью.

Теплота смачивания пропорциональна удельной поверхности твёрдого тела. Если значение теплоты смачивания единицы поверхности надёжно определено в серии калориметрических измерений теплоты погружения эталонных образцов с известной удельной поверхностью, то экспериментальное определение удельной поверхности сводится к одноразовому определению теплоты погружения исследуемого образца, учитывая высокую точность и воспроизводимость калориметров.

Однако разброс значений теплоты смачивания единицы поверхности, даже однотипных образцов, достигает более 100%. Незначительные отличия пористой структуры исследуемого образца от эталонной системы не позволяют применять значения теплоты смачивания единицы поверхности эталонных образцов к исследуемому образцу. Снижение

влияния различий в свойствах исследуемых образцов и эталонов на значения удельной поверхности достигается насыщением образца перед погружением в жидкость парами этой жидкости. Удовлетворительная точность метода достигается при радиусе пор более 3 нм [19].

Метод термoporометрии основывается на определении изменения фазового состава исследуемой пористой системы по изменению его теплоёмкости с температурой. Обычно образец увлажняется, а затем охлаждается в микрокалориметре по заданной программе снижения температуры. Несмотря на теоретические допущения и экспериментальную сложность, сходимость результатов термoporометрии с данными адсорбционно-структурного метода расчёта кривых распределения мезопор при анализе разнообразных пористых материалов с радиусом пор от 10 до 500 нм.

Объёмно-весовые методы исследования пористой структуры применяются для определения пористости твёрдого тела по различию теоретической (эталонной) и действительной плотности образца. Плотность, как предел отношения массы тела к его объёму при точечной локализации всего объёма, характеризует либо плотность абсолютно однородного компактного тела в целом, либо локальную плотность неоднородного тела в данной точке. Неоднородные тела характеризуются средней или эффективной, кажущейся, истинной (теоретической) и относительной плотностью.

Кажущаяся плотность определяется как отношение массы материалы ко всему занимаемому им объёму. Понятие истинной плотности относится к матрице (каркасу) без учёта пор. Тогда суммарный объём пор определяется разностью обратных величин кажущейся и истинной плотностей.

Относительная плотность определяется либо отношением объёма, занимаемого собственно веществом в данном образце, к полному объёму образца, либо отношением плотности (массы) рассматриваемого вещества к плотности (массе равновеликого объёма) другого условного вещества (эталона) при определённых физических условиях.

Истинная плотность может быть рассчитана, например, исходя из строения кристаллических тел, а фактическая плотность измерена. Сравнивая значения теоретической  $\rho_t$  и фактической  $\rho$  плотности твёрдого тела, можно определить его пористость, пренебрегая малым вкладом других дефектов [19]:

$$\dot{i} = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} \cdot 100\% .$$

Наиболее простые методы расчёта плотности основываются на непосредственном определении массы и объёма образца. Для определения объёма образца используются жидкостные и газовые волюмометры.

Жидкостной волюмометр представляет собой сосуд, проградуированный в единицах объёма. В него погружается предварительно взвешенное обезжиренное тело. Рабочая жидкость должна обладать хорошей смачивающей способностью и не взаимодействовать с телом. Объём тела определяется по объёму вытесненной им жидкости. Плотность тела вычисляется по измеренным значениям массы и объёма.

Газовые волюмометры применяются для измерения плотности сыпучих и пористых сред, а также плохо смачивающихся или недопускающих контакта с жидкостью веществ. Испытуемое тело известной массы помещается в герметизируемый сосуд постоянного объёма, куда подаётся газ. Плотность тела определяется по разности абсолютных давлений газа до и после введения газа в сосуд.

Наиболее точно эффективная плотность определяется методами пикнометрии, основанными на объёмном или весовом определении количества жидкости, заполняющей поры твёрдого тела или вытесняемой им при погружении в жидкость. Основополагающей концепцией метода является допущение о неизменности плотности пикнометрического вещества в свободном состоянии и в порах при условии опыта, которая не всегда выполняется. Пикнометрическое вещество должно быть химически инертным к исследуемому материалу, хорошо смачивать поверхность, быть нелетучим.

Пикнометр представляет собой сосуд, объём которого определяется с известной точностью, заполненный не взаимодействующей с телом жидкостью. Искомая плотность рассчитывается по результатам взвешивания тела на воздухе, пикнометра, наполненного жидкостью и пикнометра с жидкостью и погружённым в неё тело. При всех взвешиваниях исследуемый образец предварительно обезжиривается, высушивается и вакуумируется, а жидкость наливается в пикнометр до одного и того же уровня, выдерживая одинаковую температуру.

Определение эффективной плотности методом гидростатического взвешивания основано на сравнении веса тела в воздухе и в жидкости известной плотности. Для измерения применяются чувствительные весы. Точность метода зависит от выбора пикнометрической жидкости, которая должна обладать малым коэффициентом объёмного расширения, низкой вязкостью, хорошо смачивать поверхность образца, иметь плотность ненамного меньше плотности образца. Такие требования к жидкости ограничивают применение метода в пикнометрии. Метод используется, например, для измерения пористости газотермических покрытий [6].

Методом газовой пикнометрии объём твёрдого тела определяется по объёму газа, чаще всего гелия, вытесняемому исследуемым образцом из градуированной измерительной камеры. Значение эффективной плотности рассчитывается по уравнению. Достоинство метода газовой пикнометрии как неразрушающего метода контроля состоит в возможности повторного анализа одного и того же образца, что повышает надёжность результатов, позволяет проследить изменение пористой структуры в зависимости от внешних факторов.

Метод заполнения пор жидкостью позволяет рассчитать открытую пористость материалов, исходя из объёма тела и жидкости, заполнившей до насыщения поры образца. Объём жидкости определяется по изменению веса сухого образца после насыщения его жидкостью известной плотности. Расчётное значение открытой пористости оказывается меньше истинного, поскольку при насыщении жидкостью заполняются, как правило, не все открытые поры, а также вследствие утечки жидкости из пор, зависящей от капиллярных сил, по-разному действующих в порах различного сечения и длины.

Наилучшее заполнение капилляров для уменьшения указанной погрешности достигается при насыщении образца жидкостью в вакууме. Исключить погрешность, возникающую вследствие вытекания жидкости из пор, позволяет метод жидкостного пористомера [19].

Метод гидростатического взаимодействия жидкостей заключается в том, что образец, пропитанный жидкостью с плотностью  $\rho_1$ , погружается в жидкость с плотностью  $\rho_2$ , вытесняющей жидкость насыщения. Если жидкости взаимно растворимые и имеют близкие коэффициенты вязкости, то вытеснение происходит только под действием гидростатических сил в соответствии с законом Пуазейля, что позволяет рассчитать радиус открытых сквозных пор в исследуемом образце, объёмную концентрацию открытых пор, имеющих радиус меньше рассчитанного значения.



Метод эталонной порометрии теоретически обосновывается тем, что в изолированной системе, состоящей из капиллярно-пористых тел и жидкости, находящейся в равновесии с её паром, относительное давление паров, свободная энергия связи адсорбата с пористым материалом и капиллярное давление жидкости в порах связаны термодинамическими соотношениями с радиусом мезопор и макропор. Метод заключается в установлении зависимости равновесного объёмного насыщения испытуемого образца измерительной жидкостью от её объёмного содержания в эталонном образце, находящемся с исследуемым образцом в одной замкнутой системе.

По известной для эталона функции распределения объёма измерительной жидкости, потенциалу массообмена можно найти аналогичную функцию или её производные – изотерму адсорбции и кривую распределения объёма пор по эквивалентному радиусу для исследуемого образца. Изотерма адсорбции затем обрабатывается любым из адсорбционно-структурных методов.

Недостатками метода являются погрешности, обусловленные многократными операциями взвешивания, разборки и сборки комплектов эталонных и исследуемых образцов, ошибками определения порометрической кривой эталона, также продолжительность измерений.

К преимуществам метода в первую очередь следует отнести возможность повторных анализов одного и того же образца (неразрушающий контроль), полезную при исследовании динамики структурообразования или последствий действия на структуру технологических факторов. Метод отличается универсальностью для разнообразных материалов, в том числе малопрочных, легкодеформируемых, несвойственной, например, ртутной порометрии. Отмеченные и другие достоинства метода как сравнительного метода при условии автоматизации делают его перспективным для практического приложения.

Результаты анализа методов исследования пористой структуры применительно к классификационным группировкам и характеристикам пористой структуры и пор, обнаруживают узкую специализацию каждого из методов порометрии. Универсальные методы порометрии пригодные для исследования любых пористых структур отсутствуют.

Отсутствие единой классификации и универсальных методов исследования пористой структуры усложняет корректный выбор нужной методики исследования. Тем более важен комплексный методический подход к исследованию пористой структуры сочетанием методов порометрии согласованным с классификационной группировкой и характеристиками пористой структуры и пор.

Изучение открытой макропористости возможно методами визуально-оптическими и световой микроскопии, капиллярными, термопорометрии, жидкостной и газовой волюмометрии, гидростатического взаимодействия жидкостей, заполнения пор жидкостью, гидростатического взаимодействия жидкостей, эталонной порометрии. Практически целесообразно сочетать методы микроскопии, заполнения пор жидкостью и эталонной порометрии.

Полезное увеличение современных оптических микроскопов не превышает  $10^3$  из-за ограничений, связанных с длиной волны света. Попытки улучшения этого показателя приводят к потере разрешающей способности из-за искажения изображения. Разрешающая способность современных микроскопов, использующих видимый свет, при количественном структурном анализе составляет приблизительно 1 мкм. Объектами для исследования световой микроскопией могут быть только макропористые структуры. Электронная микроскопия позволяет анализировать микропористую структуру.

Структура объекта хорошо выявляется в световом микроскопе, когда распределение прошедшего или отражённого света неоднородно по интенсивности или цвету. Контрастность структурных элементов при наблюдении в проходящем свете по методике светлого поля усиливается травлением или контрастным окрашиванием поверхности объекта. Выявление структурных неоднородностей неконтрастных образцов по методикам наблюдения в тёмном поле, фазово-контрастная, интерференционная и поляризационная микроскопия позволяет достигать высокого разрешения в проходящем и отражённом свете.

Выявление и количественный анализ макропор с размерами более 100 – 200 мкм рекомендуется проводить на свежих изломах, сколах или срезах при увеличении  $50\times$  в наклонном положении поверхности объекта, достигаемом с помощью подвижного столика. Количественный анализ структуры выполняется с использованием размерной сетки из комплекта микроскопа, которая крепится к образцу и избавляет от необходимости вводить поправку на наклон образца. При необходимости образец фотографируется с использованием фотонасадки.

Исследуемые образцы для микроскопического анализа пор от 1 – 2 до 100 – 200 мкм в проходящем свете готовятся в виде тонких пластинок материала толщиной не более 30 мкм. Технические трудности получения тонких образцов ограничивают возможности микроскопического анализа в проходящем свете. Кроме того, микроскопия «на просвет» при размерах пор много меньше толщины образца усложняет количественный анализ из-за проекционного наложения структурных неоднородностей. Поэтому чаще отдаётся предпочтение методикам исследования в отражённом свете отполированного участка поверхности образца с использованием металлографических микроскопов.

Количественные характеристики пространственной пористой структуры невозможно определить непосредственно по плоскому изображению, полученному методами микроскопии. Плоское изображение содержит первичную и порой искажённую информацию об объёмной структуре. Воспроизведение или реконструкция пространственной структуры с помощью измерений на плоскости изображения осуществляется методами стереологии [3,14].

Статистическая реконструкция основывается на измерении параметров структуры в плоскости изображения и преобразовании результатов измерений в параметры пространственной структуры, в том числе параметры пористой структуры, с помощью формул, выведенных с использованием вероятностных законов и положений дифференциальной геометрии. Преимущество метода статистической реконструкции состоит в том, что для расчётов, как правило, бывает достаточно одного объекта исследования, например, шлифа.

Непосредственная реконструкция воспроизводит точный образец пространственной структуры, по которому определяются его параметры. Результат достигается изучением множества последовательных параллельных сечений образца с малым шагом или прямым стереоскопическим наблюдением образца.

Результат стереологической реконструкции пространственной структуры зависит от представительности исследуемого образца. Объект наблюдения должен как можно точнее и полнее отображать структурные особенности исследуемого пористого тела. При наличии значительной неоднородности структуры одной плоскости сечения недостаточно и представительная выборка должна содержать сечения пористого тела несколькими различно ориентированными плоскостями [4,18]. Представительность участка плоскости наблюдения задаётся его протяжённостью или количеством измерений на плоскости.

Исследование пористой структуры не ограничивается качественным анализом изображений. Кроме простого визуального наблюдения и сравнения обязательными

становятся операции подсчета, измерения, статистического анализа полученной информации, стереологической реконструкции микроскопического изображения. Подобные задачи, особенно при анализе микроструктур, решаются компьютерными системами анализа изображений [1,2,8,9,11,12,13].

Система анализа изображений (анализатор изображений) состоит из системы ввода изображений с объективом при макросъемке или установленной на микроскопе при съемке микроскопических объектов, компьютера и программного обеспечения. Системы ввода изображений, используемые в составе анализаторов, условно можно разделить на три группы.

Аналоговые телевизионные цветные или черно-белые камеры в комплекте с платами оцифровки сигнала (фреймграбберами), предназначенные для ввода и количественного анализа изображений, обеспечивают получение изображений высокого качества, прежде всего, за счет широких возможностей настройки по цвету и другим. При необходимости записи движения с высокой частотой, без сжатия и пропусков кадров альтернативы аналоговым системам ввода с фреймграбберами пока нет.

Трехматричные цветные камеры обеспечивают превосходные результаты при съемке микроскопических объектов на большом увеличении. Передача цветовых характеристик максимально соответствует оттенкам, наблюдаемым в микроскоп, а высокое разрешение системы ввода позволяет видеть все тонкие структуры объектов на захваченных изображениях при работе с большими увеличениями, что важно при исследовательской работе.

Вместе с тем, дорогие аналоговые камеры высокого качества постепенно вытесняются цифровыми телевизионными системами ввода изображений. Постоянно повышается их качество, надежность, растет разрешение, совершенствуются технологии производства, снижается цена. Профессиональные цифровые системы ввода, в том числе и для микроскопии, производятся фирмами Baumer Optronik (Германия), Jenoptic Laser, Optik, Systeme GmbH (Германия), Soft Imaging Company (Германия), Diagnostic Instruments (США), Pixera (США), Roper Scientific Inc. (США), PixeLINK (Канада), Qimaging (Канада) и другими.

Использование цифровых фотоаппаратов оправдано при макросъемке с передачей полученных снимков в компьютер. Цифровые фотоаппараты также могут использоваться при съемке со стереомикроскопов. В таких случаях цифровой фотоаппарат обеспечивает получение изображений достаточно высокого качества по разрешению и цвету. Однако использование цифровых фотоаппаратов не всегда является оправданным при съемке изображений препаратов, наблюдаемых в световой микроскоп, особенно при работе с большими увеличениями (объективы 40x – 100x).

Цифровые фотокамеры изначально не предназначались разработчиками для микроскопии. Они имеют небольшие размеры матрицы, шумят, ограничены в настройках цвета и баланса белого, отличаются в большей или меньшей степени цветовыми аберрациями, имеют встроенные широкопольные объективы, зум оптический и цифровой. Все это мешает получать качественные изображения.

Адаптер, который необходим для механического соединения камеры с микроскопом, должен также взять на себя задачу максимально сгладить эти недостатки, и поэтому должен представлять собой довольно сложную механическую и оптическую конструкцию. Задача фотоадаптера – компенсировать широкопольную оптику бытовой фотокамеры, не нужную при использовании цифровых систем ввода для микроскопии. Изготовление такого адаптера в кустарных условиях приводит к существенной потере качества изображения.

Производители адаптеров пошли по пути изготовления универсального адаптера, к которому делаются дополнительные кольца и т.п., но и в этом случае, зачастую, не добиться желаемого качества изображения. Кроме того, большинство фотокамер не предоставляют возможности управления от компьютера и захвата изображения напрямую в компьютер. Нажатие кнопки спуска пальцем неизбежно вызывает колебания камеры относительно микроскопа, что приводит к потерям качества изображения, которое и без того страдает.

Таким образом, использование цифровых фотокамер на микроскопе не рекомендуется по следующим причинам:

- 1) качество изображения не может быть отличным, поскольку цифровая фотокамера не предназначена для микроскопии;
- 2) сложность адаптации камеры на микроскоп, качественный адаптер не может быть дешевым;
- 3) удорожание камер, которые могут управляться программно (стоимость зеркальных фотокамер существенно выше стоимости компактных);
- 4) необходимость приобретения дополнительного оборудования, например, сетевого адаптера для питания камеры от сети.

После передачи изображения в компьютер посредством системы ввода, оно может быть количественно проанализировано с помощью программного обеспечения. Какими бы ни были возможности программного обеспечения системы анализа изображений, этапы обработки могут быть одинаковыми [1,2,12].

Преобразование изображения состоит в изменении его характеристик таким образом, чтобы при количественном анализе выделение интересующих объектов или фаз в дальнейшем могло бы быть произведено наилучшим образом. Однако при любом преобразовании изображения часть первичной информации утрачивается. Поэтому необходимо стремиться к тому, чтобы изображение максимально высокого качества захватывалось на этапе ввода. Изображения улучшаются методами фильтрации, в том числе изменением яркости и контрастности, выравниванием, сглаживанием и детализацией изображения.

Методами изменения яркости и контрастности меняются яркостные характеристики изображения, что отражается на гистограмме яркости по изображению. Фильтрами выравнивания яркости и цвета устраняются последствия дефектов осветительной системы или оптики микроскопа, проявляющихся в неравномерности фона изображения. Фильтры сглаживания обеспечивают очистку изображений от шумов. Фильтрами детализации осуществляются пограничные преобразования, приводящие, например, к усилению резкости, выделению границ объектов (фаз), детализации объектов.

Необходимым условием получения количественной информации по объектам изображения с помощью анализатора является их выделение относительно фона или посторонних элементов. Выделение, распознавание объектов изображения – наиболее критический этап обработки изображения, являющийся залогом выполнения анализатором своей задачи. Методы выделения объектов включают выделение по яркости, цвету, текстурным признакам, ручное выделение.

Методом выделения объектов или фаз по яркостным характеристикам производится отбор всех точек изображения, попадающих в определенный интервал яркости, по гистограмме яркости для данного изображения. Оцифрованное изображение представляет собой набор точек, яркость которых для 8-битных изображений лежит в интервале от 0 (черный цвет) до 255 (белый цвет). Гистограмма яркости изображения показывает процентное содержание точек определенной яркости. Выделение объектов по яркости обычно

производится методом установки пороговых значений яркости, и все точки изображения, лежащие в пределах данных значений, будут выделены на изображении как маски объектов, которые и будут затем измеряться.

Выделение объектов по цвету с использованием цветовых моделей является более сложным, чем простое выделение по яркости, но позволяет добиться лучших результатов в тех случаях, когда объекты с одинаковыми яркостными характеристиками отличаются по цвету. В современных анализаторах изображений выделение объектов изображения по цвету реализуется с использованием метода обучения, когда пользователь системы указывает участки изображения, которые необходимо выделять. Обученная таким образом система на следующем изображении будет автоматически выделять объекты, соответствующие по цвету указанным участкам.

Выделение по текстурным особенностям состоит в опознании объекта или фазы не по яркости или цветовым характеристикам, а по внешним признакам или текстурным особенностям. Это относится к таким ситуациям, когда необходимо выделить слой (участок) с ориентированной структурой внутри однородной структуры, которая не отличается от слоя ни по яркости, ни по цвету, но отличается исключительно по внешнему виду. Этот способ выделения наиболее сложен для реализации, и далеко не все существующие в настоящее время анализаторы изображений способны решать задачу выделения по текстурным признакам.

Ручное выделение объектов или фаз используется в тех случаях, когда их не удастся выделить ни одним из вышеперечисленных способов. При ручном выделении основным действующим лицом становится пользователь системы, который указывает, что считать объектом, а что – нет.

Измерение становится возможным только после того, как интересующие объекты выделены, когда анализатор изображений «знает», что надо считать объектами. Для проведения ручных измерений линейных и угловых параметров, подсчёта объектов не требуется выделять объекты изображения. Измеряя линейные размеры объекта или структуры, пользователь системы указывает на изображении начальную и конечную точку отрезка прямой или кривой линии, получая в таблице или непосредственно на изображении информацию о длине отрезка. Аналогичным образом осуществляется измерение углов или радиуса окружности. Простой подсчет объектов также может проводиться в ручном режиме методом нанесения меток, подсчет анализатор проводит автоматически.

Современный анализатор позволяет выполнять автоматические измерения объектов или фаз, выделенных по яркости, цвету или текстурным особенностям за доли секунды, что далеко превосходит возможности человека. Предлагаемый разными фирмами-производителями набор параметров варьирует, однако, в любом случае измеряемые параметры могут быть сгруппированы следующим образом:

- площадные (площадь и периметр);
- размерные (диаметр, хорда, габарит, длина, ширина и др.);
- описывающие форму (фактор формы, округлость, удлиненность и др.);
- характеризующие положение и ориентацию объектов (координаты X и Y, направление и др.);
- денситометрические или оптические (яркость, оптическая плотность и др.).

После того, как измерения проведены, возможна статистическая обработка результатов анализа, а также, при необходимости, классификация объектов по любому из измеренных

признаков или комплексу признаков. Статистической обработкой рассчитываются, например, среднее, минимальное и максимальное значения параметра, сумма значений, стандартное отклонение, удельное количество объектов (на единицу площади), стереологические параметры, такие как площадь поверхности, объемная доля и другие.

При классификации объектов с помощью анализатора пользователь системы выбирает параметр (параметры), по которому она будет проводиться, задает количество классов (групп) объектов, а также граничные значения параметров. Эти граничные значения могут быть также заданы автоматически анализатором при выборе соответствующего режима работы. Результатом классификации становится получение информации о процентном содержании объектов каждого класса или проценте площади, занимаемой каждой группой объектов или фазой.

Результаты анализа сохраняются в базе данных. База данных представляет собой программное обеспечение, предназначенное для накопления, архивирования информации (изображений, результатов анализа, сопровождающих данных), ее систематизации, поиска, создания выборок по любому критерию. Отправляя изображение в базу данных, пользователь должен иметь возможность сопроводить его данными, полученными в результате анализа, любой необходимой текстовой и цифровой информацией.

Базой данных, как правило, обеспечиваются различные варианты просмотра информации: каталог изображений, галерея изображений, карточка с изображением и информацией, таблица. Программа анализа изображений взаимодействует с базой данных, изображение может быть передано в базу данных для хранения и обратно из базы для анализа при необходимости. Некоторые системы позволяют создавать базу изображений путем автоматической передачи туда изображений с диска. В этом случае изображения копируются в базу вместе с информацией об их свойствах.

При необходимости любое изображение, хранящееся в базе, вместе с результатами анализа можно распечатать, причем вывод документа на печать осуществляется в виде бланка, вид которого формируется пользователем системы. В бланке обычно предусматриваются стандартные поля (например, название организации, ее адрес, логотип и т.п.), которые будут присутствовать при печати любого изображения из базы.

Таким образом, пористая структура материала образуется сложной для классификации и математического описания параметров системой элементарных структурных частиц материала и разделяющих их дискретных полостей, называемых порами, отличающихся разнообразными формой, размерами, расположением, связями между собой. Систематизация пористых структур по элементному, химическому составу и строению твердых структурных частиц, по происхождению пор не завершились созданием единой классификации, но выявила в качестве основы классификации отличия в механизме образования и структуре пористых сред.

Материалы с пористой структурой классифицируются по происхождению, размерно-геометрическим признакам, расположению пор на корпускулярные и губчатые, регулярные и стохастические, с открытыми и закрытыми макропорами, микропорами и нанопорами системы. Например, пористая структура материалов, получаемых порошковой металлургией, относится к корпускулярным стохастическим микропористым системам. Пористая структура, сформированная лазерной обработкой микроотверстий или лазерным микроструктурированием, относится соответственно к губчатым регулярным или губчатым стохастическим, с открытыми тупиковыми макропорами системам.

Комплекс параметров и способов для исследования пористых материалов согласовывается с математическим описанием классификационных группировок пористой

структуры. Сложные для математического описания губчатая и корпускулярная структуры отображаются геометрическими и статистическими моделями. Упрощённое отображение моделью основывается на допущении простых форм структурных частиц и пор. Чаще всего применяются глобулярная и капиллярные модели, параметры которых могут быть случайными величинами. Вместе с тем, допущения, принятые при моделировании, приводят к методическим ошибкам вычисления параметров.

Пористая структура характеризуется комплексом параметров достаточных для её исследования. Форма, объём и протяжённость отдельной поры обычно трудноопределимы. Вместе с тем можно выделить характерные размеры поры относительно простой формы, которыми определяются свойства пористой структуры. Сложная форма пор приводится к простым геометрическим фигурам, и определяются эквивалентные размеры, исходя из принятой модели пористой структуры. Основными параметрами пористой структуры при её статистическом описании принимаются функция и плотность распределения пор по размерам и объёма пор по радиусам.

Систематизация методов исследования пористой структуры выявила существенные признаки классификации методов порометрии. Результаты классификации и анализа методов исследования пористой структуры применительно к классификационным группировкам и характеристикам пористой структуры и пор обнаруживают специализацию каждого из методов порометрии. Универсальные методы порометрии пригодные для исследования любых пористых структур отсутствуют. Отсутствие единой классификации и универсальных методов исследования пористой структуры усложняет выбор нужной методики исследования.

Методика исследования пористой структуры должна основываться на комплексном методическом подходе, предусматривающем сочетание методов порометрии согласованное с классификационной группировкой и характеристиками пористой структуры. Изучение открытой макропористости возможно методами световой микроскопии, капиллярными, термопорометрии, жидкостной и газовой волюмометрии, заполнения пор жидкостью, гидростатического взаимодействия жидкостей, эталонной порометрии. Практически целесообразно сочетать методы световой микроскопии, компьютерного анализа изображений и порометрии.

Первоочередное применение световой микроскопии объясняется тем, что возможности оптических микроскопов позволяют анализировать макропористые структуры в интервале размеров пор недоступном для исследования другими методами. Световая микроскопия незаменима при изучении макропор для выявления общего характера, обоснованного моделирования структуры и объяснения результатов других методов порометрии. Трудоёмкость и ограничения микроскопии, связанные с подготовкой образцов и интерпретацией данных, отчасти преодолеваются методикой исследования в отражённом свете подготовленного участка поверхности и компьютерной обработкой изображений.

Применение компьютерной обработки изображений позволяет преодолеть трудоёмкость измерений размеров, площадей и осуществлять статистическую обработку результатов наблюдений. Количественные характеристики пространственной пористой структуры невозможно определить непосредственно по плоскому изображению, полученному методами микроскопии. Плоское изображение содержит первичную и порой искажённую информацию об объёмной структуре. Воспроизведение или реконструкция пространственной структуры с помощью измерений на плоскости изображения осуществляется методами стереологии.

Типовой методикой компьютерного анализа изображения обычно предусматриваются преобразование и редактирование изображения методами фильтрации, выделение объектов

или фаз на изображении по яркости, цвету, текстурным признакам, измерение параметров в полуавтоматическом или автоматическом режиме, статистическая обработка результатов и классификация объектов, сохранение результатов анализа. Современные анализаторы позволяют проводить автоматические измерения площади, размеров, параметров формы, положения и ориентации, оптических параметров объектов на изображении, в том числе на изображениях микроструктур.

Современный анализатор изображений микроструктур позволяет, например, преобразовывать вид структурных морфологических элементов поверхности в монохроматическое изображение, на котором черные поля соответствуют различным углублениям и порам, белые поля – выступам и отдельным частицам, автоматически строить графики распределения размеров частиц и пор, изменения частоты размеров, вычислять статистические характеристики распределения элементов профиля. Вместе с тем возможности приспособить анализатор для конкретных объектов и задач исследования пористой структуры ограничены недоступностью корректировки программного обеспечения.

Уникальные возможности разработки функционального программного обеспечения анализа макропористой структуры предоставляет приложение IPT системы MATLAB. Реализованы наиболее известные алгоритмы обработки изображений, существует возможность просмотра программных кодов функций, которые реализует данные алгоритмы. Предусмотрена возможность развитие программного обеспечения оригинальными авторскими функциями выделения, обработки и распознавания изображений, воспроизведения или реконструкции пространственной структуры методами стереологии недоступными современным анализаторам изображений.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Анализаторы изображений – Материаловедение. Анализатор изображений SIAMS 700: [http://www.labor-microscopes.ru/production/analiz/image\\_analysis\\_met.html](http://www.labor-microscopes.ru/production/analiz/image_analysis_met.html).
2. Анализаторы изображений: [http://www.labor-microscopes.ru/production/analiz/image\\_analiz.html](http://www.labor-microscopes.ru/production/analiz/image_analiz.html).
3. Васильев П.В. Моделирование пространственных структур методами стохастической геометрии: [http://dspace.bsue.edu.ru/bitstream/123456789/1610/1/Vasilev\\_Modelirovanie.pdf](http://dspace.bsue.edu.ru/bitstream/123456789/1610/1/Vasilev_Modelirovanie.pdf).
4. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость: пер с англ. 2-е изд. – М.: Мир, 1984. – 306 с.
5. Епифанов С.В. Обзор современного состояния контроля параметров сыпучих материалов / С.В. Епифанов, Д.М. Мордасов // Труды ТГТУ: сб. научн. статей молодых учёных и студентов / Министерство образования и науки РФ, ГОУ ВПО «Тамб. гос. техн. ун-т». – Тамбов, 2008. – Вып. 21. – С. 114 – 117: <http://www.tstu.ru/education/elib/pdf/st/2008/epiphanov.pdf>.
6. Исакаев Э.Х., Мордынский В.Б., Сидорова Е.В., Терешкин С.А., Щербаков В.В., Подымова Н.Б. Сравнительный анализ методов измерения пористости газотермических покрытий // Технология машиностроения. – 2011. – №3. – С. 25 – 30: [http://www.ltc.ru/newsltc/2/1009\\_1.shtml](http://www.ltc.ru/newsltc/2/1009_1.shtml).
7. Классификация методов контроля пористости материалов / А.В. Медведева, Д.М. Мордасов, М.М. Мордасов // Вестник ТГТУ. – 2012. – Том 18. – №3. – С. 749 – 754: [http://vestnik.tstu.ru/rus/t\\_18/pdf/18\\_3\\_034.pdf](http://vestnik.tstu.ru/rus/t_18/pdf/18_3_034.pdf).
8. Компьютерный анализ изображений: общие сведения, системы, примеры использования: [http://www.akondmicro.ru/index.php?issue\\_id=88](http://www.akondmicro.ru/index.php?issue_id=88).
9. Никитаев В.Г., Проничев А.Н. Модель цифровой обработки изображений шлифов керамических материалов для оценки их пористости // Современные наукоемкие технологии. – 2009. – №9 – С. 114–115: [http://www.rae.ru/snt/?section=content&op=show\\_article&article\\_id=5544](http://www.rae.ru/snt/?section=content&op=show_article&article_id=5544).
10. О современных классификациях и методах исследования пористой структуры полимерных материалов. Обзор / О.П. Григорьева, К.Г. Гусакова, О.Н. Старостенко, А.М. Файнлейб. Институт химии высокомолекулярных соединений НАН Украины // Полімерний журнал. – Т 33. – №1. – С. 6 – 23.
11. Определение параметров пористой структуры в por-Si и por-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> путем компьютерной обработки данных растровой и атомно-силовой микроскопии / Ю.М. Спивак [и др.] // Молодой ученый. – 2012. – №5. – С. 1 – 4: <http://www.moluch.ru/archive/40/4835/>.
12. Оптический анализатор размеров частиц методами цифровой микроскопии BT-1600: <http://www.analizator.su/BT-1600.php>.
13. Пантелеев В.Г., Клыкова Е.И., Егорова О.В. Компьютерная микроскопия. – М.: Техносфера, 2005. – 304 с.

14. Пат. 2218601 Российская Федерация, МПК G06T7/60, G06T17/10. Способ стереологического определения размеров и размерных распределений объектов / Красноперов Р.А., Герасимов А.Н.; заявитель и патентообладатель Красноперов Р.А., Герасимов А.Н., Общество с ограниченной ответственностью «Проксима Текнолоджи» (RU). – № 2000132517/09, заявл. 26.12.2000; опубл. 10.12.2003.
15. Смирнов А.В., Толкачёв Н.Н. Поры. – Словарь нанотехнологических и связанных с нанотехнологиями терминов: <http://thesaurus.rusnano.com/wiki/article3810>.
16. Фандеев В.П., Самохина К.С. Конструирование протезов межпозвонковых дисков // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №6; URL: [www.science-education.ru/120-16338](http://www.science-education.ru/120-16338).
17. Фандеев В.П., Самохина К.С. Формирование пористой структуры поверхности материала межпозвонкового диска лазерной обработкой // Фундаментальные исследования. – 2015. – №3. – С. 148-152; URL: [www.rae.ru/fs/?section=content&op=show\\_article&article\\_id=10006368](http://www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10006368).
18. Хейфиц Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых телах. – М.: Химия, 1982. – 320 с.
19. Черемский П.Г. Методы исследования пористости твёрдых тел. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.

**Рецензент:** Мурашкина Татьяна Ивановна, доктор технических наук, профессор кафедры «Приборостроение» Пензенского государственного университета.

**Fandeev Vladimir Petrovich**

Penza State University  
Russia, Penza

E-mail: [lyudmilarotmanova@yandex.ru](mailto:lyudmilarotmanova@yandex.ru)

**Samokhina Kristina Sergeevna**

Penza State University  
Russia, Penza

E-mail: [skristina1990@rambler.ru](mailto:skristina1990@rambler.ru)

## Research methods of porous structures

**Abstract.** In article are considered questions of the study porous structures. The presented categorization parameter porous structure.

The main material of the article is dedicated to consideration of the questions to systematizations of the methods of the study porous structures, their value and defect. It is shown that porous structure is characterized by complex parameter sufficient for her studies. The form, volume and extent of the separate time usually hard to define. Together with that possible select the typical sizes of the time comparatively form idle time, which are defined characteristic of the porous structure. The main parameter of the porous structure under her statistical description are taken the function and density of the sharing the times on size and volume of the times on radius. The methods of the study of the porous structure must be founded on complex methodical approach, providing combination of the methods the injection coordinated with taxonomic group and feature of the porous structure.

In work is revealed that methods of the study of the porous structure must be founded on complex methodical approach, providing combination of the methods the injection coordinated with taxonomic group and feature of the porous structure. The study open the macro possible methods light microscopy, capillary, thermoporometry, liquid and gas volumetrie, filling the times by liquid, hydrostatic of the interaction of the liquids, master the injection. Practically reasonable combine the methods light microscopy, computer analysis of the scenes and the injection.

**Keywords:** volumeter; calorimetric method; method of testing; methods of small-angle scattering of radiation; microstructurally; picnometry; porous structure; size of micropores; mercury porometry; systematization; sorption methods; transpiration methods; chemical composition.

## REFERENCES

1. Analizatory izobrazheniy – Materialovedenie. Analizator izobrazheniy SIAMS 700: [http://www.labor-microscopes.ru/production/analiz/image\\_analysis\\_met.html](http://www.labor-microscopes.ru/production/analiz/image_analysis_met.html).
2. Analizatory izobrazheniy: [http://www.labor-microscopes.ru/production/analiz/image\\_analiz.html](http://www.labor-microscopes.ru/production/analiz/image_analiz.html).
3. Vasil'ev P.V. Modelirovanie prostranstvennykh struktur metodami stokhasticheskoy geometrii: [http://dspace.bsu.edu.ru/bitstream/123456789/1610/1/Vasilev\\_Modelirovanie.pdf](http://dspace.bsu.edu.ru/bitstream/123456789/1610/1/Vasilev_Modelirovanie.pdf).
4. Greg S., Sing K. Adsorbtsiya, udel'naya poverkhnost', poristost': per s angl. 2-e izd. – M.: Mir, 1984. – 306 s.
5. Epifanov S.V. Obzor sovremennogo sostoyaniya kontrolya parametrov sypuchikh materialov / S.V. Epifanov, D.M. Mordasov // Trudy TGTU: sb. nauchn. statey molodykh uchenykh i studentov / Ministerstvo obrazovaniya i nauki RF, GOU VPO «Tamb. gos. tekhn. un-t». – Tambov, 2008. – Vyp. 21. – S. 114 – 117: <http://www.tstu.ru/education/elib/pdf/st/2008/epiphanov.pdf>.
6. Isakaev E.Kh., Mordynskiy V.B., Sidorova E.V., Tereshkin S.A., Shcherbakov V.V., Podymova N.B. Sravnitel'nyy analiz metodov izmereniya poristosti gazotermicheskikh pokrytiy // Tekhnologiya mashinostroeniya. – 2011. – №3. – S. 25 – 30: [http://www.ltc.ru/newsltc/2/1009\\_1.shtml](http://www.ltc.ru/newsltc/2/1009_1.shtml).
7. Klassifikatsiya metodov kontrolya poristosti materialov / A.V. Medvedeva, D.M. Mordasov, M.M. Mordasov // Vestnik TGTU. – 2012. – Tom 18. – №3. – S. 749 – 754: [http://vestnik.tstu.ru/rus/t\\_18/pdf/18\\_3\\_034.pdf](http://vestnik.tstu.ru/rus/t_18/pdf/18_3_034.pdf).
8. Komp'yuternyy analiz izobrazheniy: obshchie svedeniya, sistemy, primery ispol'zovaniya: [http://www.akondmicro.ru/index.php?issue\\_id=88](http://www.akondmicro.ru/index.php?issue_id=88).
9. Nikitaev V.G., Pronichev A.N. Model' tsifrovoy obrabotki izobrazheniy shlifov keramicheskikh materialov dlya otsenki ikh poristosti // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. – 2009. – №9 – S. 114–115: [http://www.rae.ru/snt/?section=content&op=show\\_article&article\\_id=5544](http://www.rae.ru/snt/?section=content&op=show_article&article_id=5544).
10. O sovremennykh klassifikatsiyakh i metodakh issledovaniya poristoy struktury polimernykh materialov. Obzor / O.P. Grigor'eva, K.G. Gusakova, O.N. Starostenko, A.M. Faynleyb. Institut khimii vysokomolekulyarnykh soedineniy NAN Ukrainy // Polimerniy zhurnal. – T 33. – №1. – S. 6 – 23.
11. Opredelenie parametrov poristoy struktury v por-Si i por-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> putem komp'yuternoy obrabotki dannykh rastrovoy i atomno-silovoy mikroskopii / Yu.M. Spivak [i dr.] // Molodoy uchenyy. – 2012. – №5. – S. 1 – 4: <http://www.moluch.ru/archive/40/4835/>.
12. Opticheskiy analizator razmerov chastits metodami tsifrovoy mikroskopii BT-1600: <http://www.analizator.su/BT-1600.php>.
13. Panteleev V.G., Klykova E.I., Egorova O.V. Komp'yuternaya mikroskopiya. – M.: Tekhnosfera, 2005. – 304 s.

14. Pat. 2218601 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G06T7/60, G06T17/10. Sposob stereologicheskogo opredeleniya razmerov i razmernykh raspredeleniy ob"ektov / Krasnoperov R.A., Gerasimov A.N.; zayavitel' i patentoobladatel' Krasnoperov R.A., Gerasimov A.N., Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu «Proksima Teknologzhi» (RU). – № 2000132517/09, zayavl. 26.12.2000; opubl. 10.12.2003.
15. Smirnov A.V., Tolkachev N.N. Pory. – Slovar' nanotekhnologicheskikh i svyazannykh s nanotekhnologiyami terminov: <http://thesaurus.rusnano.com/wiki/article3810>.
16. Fandeev V.P., Samokhina K.S. Konstruirovaniye protezov mezhpozvonnokovykh diskov // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. – 2014. – №6; URL: [www.science-education.ru/120-16338](http://www.science-education.ru/120-16338).
17. Fandeev V.P., Samokhina K.S. Formirovaniye poristoy struktury poverkhnosti materiala mezhpozvonnokovogo diska lazernoy obrabotkoy // Fundamental'nye issledovaniya. – 2015. – №3. – S. 148-152; URL: [www.rae.ru/fs/?section=content&op=show\\_article&article\\_id=10006368](http://www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10006368).
18. Khefity L.I., Neymark A.V. Mnogofaznyye protsessy v poristykh telakh. – M.: Khimiya, 1982. – 320 s.
19. Cheremskiy P.G. Metody issledovaniya poristosti tverdykh tel. – M.: Energoatomizdat, 1985. – 112 s.