

## Представление трех безразмерных геометрических характеристик пищевых пористых систем в форме статистических функций

Валерий Г. Жуков	<sup>1</sup>	z-v-gr@mail.ru
Николай Д. Лукин	<sup>1</sup>	vniik@arrisp.ru
Валерий М. Чесноков	<sup>1</sup>	vmches@yandex.ru

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт крахмалопродуктов, ул. Некрасова, 11, Красково, 140051, Россия

**Аннотация.** В статье рассматривается методика представления трех безразмерных геометрических характеристик пористых материалов в форме статистических функций. Методика позволяет получать формулы для конкретных гистограмм пористых материалов. Исследование относится к аналитической разработке методики определения безразмерных параметров пищевых пористых сред. В качестве примера рассмотрен пористый материал, близкий по геометрическим характеристикам типовому пищевому продукту с однородной и изотропной пористой средой, подобной крахмалу, мелкодисперсным пищевым добавкам, муке. Исследование основано на статистическом логнормальном распределении случайных величин и аналитической взаимосвязи между тремя безразмерными интегральными параметрами пористых систем. Аналитически получены формулы трех безразмерных геометрических параметров пористой среды: прерывистости, просветности и пористости. Ими учитывается статистика случайного распределения пор по размерам. Формулы включают экспериментальный интегральный параметр пористости, определяемый стандартными методиками. Он корректирует результаты автоматизированного определения распределения размеров пор. Формулы позволяют проводить вычисление влияния отдельных размерных групп пор или всего их размерного ансамбля, что является важным в расчетах тепло- и массообменных процессов в пористых средах пищевых, химических и других технологий. Рассмотренная методика позволяет применять ее в подобных исследованиях для статистических задач различного вида.

**Ключевые слова:** пористые материалы, поры, геометрические безразмерные параметры, прерывистость, просветность, пористость, случайная величина, логнормальное распределение, статистические формулы параметров

## Presentation of three dimensional geometric characteristics of food porous systems in the form of statistical functions

Valery G. Zhukov	<sup>1</sup>	z-v-gr@mail.ru
Nikolay D. Lukin	<sup>1</sup>	vniik@arrisp.ru
Valeriy M. Chesnokov	<sup>1</sup>	vmches@yandex.ru

<sup>1</sup> All-Russian Research Institute of Starch Products, Nekrasova, 11, Kraskovo, 140051, Russia

**Abstract.** The article discusses the method of representing the three dimensionless geometric characteristics of porous materials in the form of statistical functions. The technique allows to obtain formulas for histograms of porous materials. The study relates to the analytical development of a method for determining the dimensionless parameters of food porous media. As an example, we consider a porous material similar in geometrical characteristics to a typical food product with a homogeneous and isotropic porous medium similar to starch, finely divided food additives, and flour. The study is based on the statistical lognormal distribution of random variables and the analytical relationship between the three dimensionless integral parameters of porous systems. The formulas of three dimensionless geometric parameters of a porous medium are obtained analytically: discontinuity, transparency, and porosity. They take into account the statistics of random pore size distribution. The formulas include an experimental integral parameter of porosity, defined by standard techniques. It corrects the results of the automated determination of the pore size distribution. The formulas allow calculating the influence of individual size groups of pores or of their entire size ensemble, which is important in calculating heat and mass transfer processes in porous food, chemical and other technologies. The considered technique allows to apply it in similar studies for statistical tasks of various types.

**Keywords:** porous materials, pores, geometric dimensionless parameters, discontinuity, transparency, porosity, random variable, log-normal distribution, statistical formulas of parameters

### Введение

Исключительное многообразие материалов, имеющих поровую структуру, объясняет использование почти в любом производстве процессов, связанных с тепло-и массо-обменом в этих сложных системах. Это сушка, влагонаполнение и любые другие фильтрационные

процессы в пищевых, медицинских, химических, нефте- и газодобывающих технологиях, в агро-секторе, сохранении и дренировании грунтовых вод и др., где перерабатывается дисперсная среда или твердые пористые материалы [1–7].

Реальные пористые среды имеют сложную систему порового пространства, которую

Для цитирования

Жуков В.Г., Лукин Н.Д. Чесноков В.М. Представление трех безразмерных геометрических характеристик пищевых пористых систем в форме статистических функций // Вестник ВГУИТ. 2019. Т. 81. № 2. С. 22–26. doi:10.20914/2310-1202-2019-2-22-26

For citation

Zhukov V.G., Lukin N.D., Chesnokov V.M. Presentation of three dimensional geometric characteristics of food porous systems in the form of statistical functions. *Vestnik VGUET* [Proceedings of VSUET]. 2019. vol. 81. no. 2. pp. 22–26. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2019-2-22-26

невозможно полностью формализовать с одновременным учетом всех ее особенностей. Поэтому для расчетов фильтрационных задач с определением скоростей движения фильтра, эффективности промывки, растворения, сушки осадка или любого пористого материала используют экспериментальные геометрические параметры пористых материалов. В их числе три базовых безразмерных геометрических параметра в виде коэффициентов прерывистости, просветности и пористости [6]. Эти коэффициенты относятся ко всей совокупности полиразмерной поровой структуры и потому являются интегральными осредненным физическими параметрами, характеризующими пористую систему в целом [3, 6].

Исследования геометрии пористого пространства имеют долгую историю. Много публикаций со статистическими исследованиями появлялось в последние два десятилетия, о чем свидетельствуют объемные обзоры, например, в [8, 9]. В публикациях направленность исследований с учетом полиразмерной микроструктуры порового пространства связана со стыковкой статистических функций случайного распределения размеров пор с экспериментальными результатами, например, с гистограммами, и определением на этой основе интегральных характеристик порового пространства [10]. Ими нельзя оценивать вклад пор отдельных размеров или размерных групп. При этом понятно, что поток в мелких порах движется медленнее по сравнению с потоком в крупных, и в реализуемом процессе проявляется неоднородность, например, в условиях промывки, сушки, экстракции, вытеснения. Отсюда следует актуальность разработки таких геометрических безразмерных коэффициентов, в которых отражались бы функции статистического распределения пор по размерам в полиразмерной структуре пористых материалов.

**Цель работы** – получение формул геометрических безразмерных коэффициентов прерывистости, просветности и пористости, которые должны содержать функции статистического распределения пор по размерам в полиразмерной структуре пористых материалов.

### Материалы и методы

Исследование относится к аналитической разработке методики определения безразмерных параметров пищевых пористых сред. В качестве примера рассмотрен пористый материал, близкий по геометрическим характеристикам типовому пищевому продукту с однородной и изотропной пористой средой, подобной крахмалу, мелкодис-

персным пищевым добавкам, муке. Исследование основано на статистическом логнормальном распределении случайных величин и аналитической взаимосвязи между тремя безразмерными интегральными параметрами пористых систем.

Для кубика пористого материала с ребром  $l$  коэффициент прерывистости  $\alpha$  (в дальнейшем – прерывистость) представляет собой отношение величины отрезка  $\Delta$  (м), составленного из стянутых в линию всех пор, отнесенную к длине ребра  $l$  (м), на которой производится подсчет пор. Коэффициент просветности  $\beta$  (в дальнейшем – просветность) представляет собой отношение величины площади пор  $S_n$  (м<sup>2</sup>) к квадратной площади грани кубика  $S$  (м<sup>2</sup>), являющейся счетным полем при экспериментальном построении гистограммы. Коэффициент пористости  $\gamma$  (в дальнейшем – пористость) – это отношение объема стянутых воедино пор кубика  $V_n$  (м<sup>3</sup>) к объему кубика  $V$  (м<sup>3</sup>):

$$\alpha = \Delta/l, \beta = S_n/S, \gamma = V_n / V, \text{ б/р.} \quad (1)$$

Существует теорема об аналитической взаимосвязи между этими тремя коэффициентами [1]. Ею доказывается, что для пористых материалов со статистически упорядоченной, однородной и изотропной пористой системой пор

$$\alpha = \gamma^{1/3}, \beta = \gamma^{2/3}, \gamma = \alpha^3 = \beta^{3/2}, \text{ б, р.} \quad (2)$$

Для неоднородных и анизотропных сред эти соотношения корректируются [11].

Отметим, что в представленном формулами (1) и (2) виде эти коэффициенты являются числами и отражают интегральные характеристики пористого материала. Требуется преобразовать функции коэффициентов (2) таким образом, чтобы ими можно было бы учитывать в полиразмерной поровой структуре долю влияния пор каждого размера на основе статистического распределения пор по их размерам. Примем без потери общности методики распределение логнормальным [3, 8, 12]. Будем основывать на нем дальнейшие рассуждения, которые могут быть распространены и на пористые системы с нормальным распределением размеров пор.

Логнормальное распределение описывает формула

$$y(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \ln a}{\sigma}\right)^2}, \text{ б/р} \quad (3)$$

где параметр  $x$  – случайная величина;  $y(x)$  – частота распределения параметра  $x$  в безразмерных долях;  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение;  $a$  – коэффициент.

В (3) все параметры записаны в безразмерном виде для соответствия правой части равенства безразмерной функции  $y(x)$ .

Дальнейшее исследование проводим с использованием примера гистограммы статистического логнормального распределения пор.

В качестве примера имеем:

- гистограмму распределения пор по размерам в пористом теле (рисунок 1), близкую к логарифмическому, в безразмерных координатах:  $x$  – ось абсцисс,  $y(x)$  – ось ординат в долях от количества;

- всего на квадратном счетном поле количество пор составляет  $N_{\Sigma} = 3066$  шт.;

- экспериментальное значение пористости равно  $\gamma_{\Sigma} = 0,35$ .

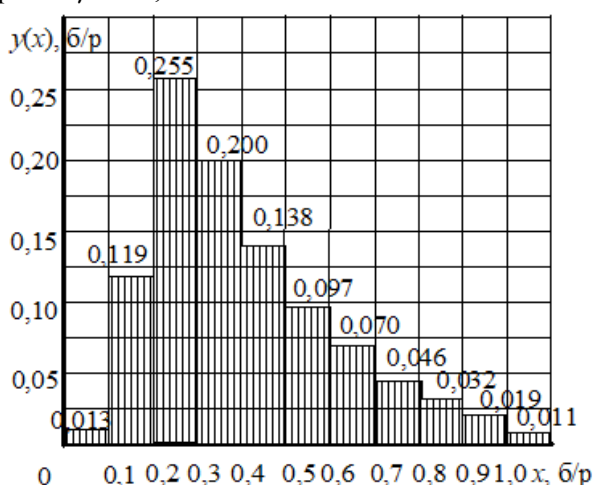


Рисунок 1. Гистограмма частотного распределения пор по характерному размеру:  $y(x)$ , б/р – доля пор каждого размера;  $x$ , б/р – безразмерный характерный параметр пор

Figure 1. The histogram of the frequency distribution of the pore size characteristic:  $y(x)$ ,  $d/l$  – the proportion of pores of each size;  $x$ ,  $d/l$  is the dimensionless characteristic parameter

### Аналитическая часть

Для определения коэффициентов (2) должны быть известны два размерных параметра:  $\Delta$  и  $l$ . Их следует найти на основании экспериментальной гистограммы (рисунок 1), полученной в результате сканирования поверхности площадью  $l_2$  образца. Для этого по рисунку 1, имеющему безразмерные координаты, должна быть построена гистограмма с размерными координатами осей, где высота прямоугольников  $\phi_i(b)$  (м) соответствует величинам отрезков из стянутых в непрерывную прямую пор для каждого размера  $b_i$  (м). Их значения вычисляем по формулам:

$$b_i = b_1 x_i, a_{0i} = b_{1a}, \quad (4)$$

$$\phi(b)_i = y(b)_i b_i N_{\Sigma}, \quad (5)$$

где  $b_1$  – пока неизвестная линейная величина, м.

Гистограмма в координатах  $\phi(b) - b$  будет иметь вид, аналогичный показанному на рисунке 1. На нем ордината гистограммы  $\phi(b)_i$

рассчитывается по (5) со средним значением  $b_{cp\,i} = (b_i + b_{i+1})/2$ .

Размерную непрерывную аналитическую функцию  $\phi(b)$  получаем с помощью формул (4) и (5), в которых дискретные параметры  $\phi(b)_i$  и  $b_i$  заменяем на текущие  $\phi(b)$  и  $b$ . Значит, функция  $\phi(b)$  будет иметь вид

$$\phi(b) = \frac{N_{\Sigma} \cdot b_1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left[ \frac{\ln \frac{b}{a_0}}{\sigma} \right]^2}. \quad (6)$$

В (6) три константы  $a_0$ ,  $b_1$  и  $\sigma$  пока неизвестны. Их определяем с использованием трех характерных точек на ниспадающей кривой гистограммы в координатах  $\phi(b) - b$ : на вершине, посередине и на конце гистограммы. Их координаты  $A_1(6,437 \cdot 10^{-3}; 9,5 \cdot 10^{-6})$ ,  $A_2(4,193 \cdot 10^{-3}; 18,3 \cdot 10^{-6})$  и  $A_3(1,103 \cdot 10^{-3}; 31,5 \cdot 10^{-6})$  подставляем в (6). В результате получаем три уравнения с тремя неизвестными. Решая их, получаем значения трех неизвестных:  $a_0 = 1,061 \cdot 10^{-5}$  (м),  $b_1 = 3,089 \cdot 10^{-5}$  (м) и  $\sigma = 0,576$  (б/р). Таким образом, формула (6) принимает вид:

$$\begin{aligned} \phi(b) &= \frac{3066 \cdot 3,089 \cdot 10^{-6}}{0,576 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left[ \frac{\ln \frac{b}{1,061 \cdot 10^{-5}}}{0,576} \right]^2} = \\ &= 0,00656 \cdot e^{-\frac{1}{2} \left[ \frac{\ln \frac{b}{1,061 \cdot 10^{-5}}}{0,576} \right]^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Функция  $\phi(x)$  является первой производной от кумулятивной функции  $\psi(b)$ . Значит,  $d[\psi(b)] = \phi(b)db$  и с учетом (7) имеем:

$$\begin{aligned} \psi(b) &= \frac{N_{\Sigma} \cdot b_1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \int_0^b e^{-\frac{1}{2} \left[ \frac{\ln \frac{b}{a_0}}{\sigma} \right]^2} db = \\ &= 0,00656 \int_0^b e^{-\frac{1}{2} \left[ \frac{\ln \frac{b}{1,061 \cdot 10^{-5}}}{0,576} \right]^2} db. \end{aligned} \quad (8)$$

Проинтегрированная функция  $\psi(b)$  соответствует площади, занимаемой всеми порами размеров, меньших  $b$ .

Для кубика счетное поле (поле, где считали поры) является квадратным. Значит, сторона, занимаемая для статистически упорядоченной однородной и изотропной системы, является тоже квадратной. Тогда на ней площадь поверхности всех пор от нуля до  $b_{\max}$  будет равна по (8)

$$\Delta_{\max} = \sqrt{\int_0^{b_{\max}} \psi(b) db} = 1,397 \cdot 10^{-6}. \quad (9)$$

По (1) и (2)

$$\alpha_{\max} = \frac{\Delta_{\max}}{l} = \sqrt[3]{\gamma_{\Sigma}}. \quad (10)$$

Прерывистость  $\alpha$  по (1) пока не можем определить, поскольку не знаем в рассматриваемом эксперименте величину длины стороны  $l$  квадрата счетного поля. Поэтому прибегнем к ее расчету с использованием экспериментального значения пористости  $\gamma_{\Sigma}$ , определение которого является стандартной процедурой. По условию рассматриваемого примера имеем  $\gamma_{\Sigma} = 0,35$ . Поэтому по (10) получаем  $l = 1,983 \cdot 10^{-6}$  м.

Теперь, зная численное значение  $l$ , по (1) и (2) можем получить в общем виде функции  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и построить по данным примера их графики для пор  $0 \dots b$ .

$$\alpha = \frac{\Delta}{l} = \sqrt[3]{\gamma_{\Sigma}} \frac{\sqrt{\int_0^b \psi(b) db}}{\sqrt{\int_0^{b_{\max}} \psi(b) db}} = \frac{\sqrt{\int_0^b \psi(b) db}}{1,983 \cdot 10^{-6}}, \quad (11)$$

$$\beta = \left(\frac{\Delta}{l}\right)^2 = \gamma_{\Sigma}^{2/3} \left(\frac{\sqrt{\int_0^b \psi(b) db}}{\sqrt{\int_0^{b_{\max}} \psi(b) db}}\right)^2 = \frac{\int_0^b \psi(b) db}{3,932 \cdot 10^{-12}}, \quad (12)$$

$$\gamma = \left(\frac{\Delta}{l}\right)^3 = \gamma_{\Sigma} \left(\frac{\sqrt{\int_0^b \psi(b) db}}{\sqrt{\int_0^{b_{\max}} \psi(b) db}}\right)^3 = \frac{\left(\int_0^b \psi(b) db\right)^{3/2}}{7,798 \cdot 10^{-18}}. \quad (13)$$

Параметры в (11)–(13) являются безразмерными функциями (рисунок 2).

### Результаты и обсуждение

Экспериментальная величина пористости входит в (11)–(13). Она как интегральный параметр является коррелирующей результаты приведенного аналитического решения. Аналогичным образом можно получить формулы, основанные на других типах случайного распределения размеров пор, например, для нормального распределения.

Рассмотренная методика позволяет учитывать долю влияния пор отдельных размерных групп на геометрические параметры, что существенно уточняет вычисления в расчетах тепло- и массообменных процессов пищевых сред.

### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Теоретические основы пищевых технологий: В 2-х книгах. Книга 1; Отв. редактор В.А. Панфилов. М.: КолосС, 2009. 608 с.
- 2 Чуешов В.И. и др. Промышленная технология лекарств: в 2-х томах. Харьков: Издательство НФАУ МТК, 2002. Т. 1, 2.
- 3 Аксельруд Г.А., Альтшулер М.А. Введение в капиллярно-химическую технологию. М.: Химия, 1983. 263 с.
- 4 Devold H. Oil and gas production handbook. An introduction to oil and gas production, transport, refining and petrochemical industry. Oslo: ABB AS, 2013. 152 p.

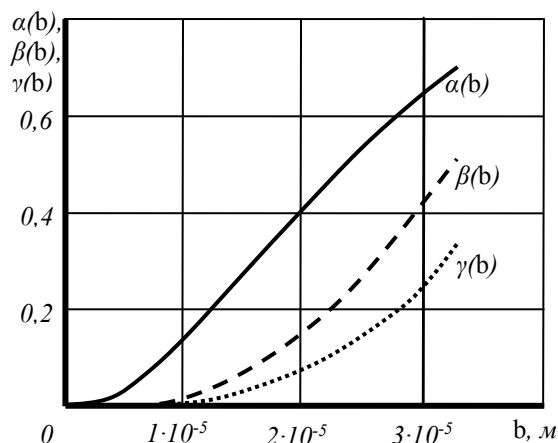


Рисунок 2. Графики функций  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ , рассчитанные по (11)–(13)

Figure 2. Graphs of functions  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  calculated by (11)–(13)

### Заключение

Предложена методика представления трех безразмерных геометрических характеристик пористых материалов в форме статистических функций. Методика позволяет получать формулы для конкретных гистограмм пористых материалов.

Аналитически получены формулы трех безразмерных геометрических параметров пористой среды: прерывистости, просветности и пористости. Ими учитывается статистика случайного распределения характерного размера пор. Формулы включают экспериментальный интегральный параметр пористости, определяемый стандартными методиками. Он корректирует результаты автоматизированного определения распределения размеров пор. Формулы позволяют проводить вычисление влияния отдельных размерных групп пор или всего их размерного ансамбля, что является важным в расчетах тепло- и массообменных процессов в пористых средах.

Данная методика позволяет применять ее в подобных исследованиях для статистических задач различного вида.

5 Сельскохозяйственные гидротехнические мелиорации: Учебное пособие; под ред. С.М. Гончарова, С.М. Коробченко. Львов: Вища шк.: Изд-во при Львов. гос. ун-те, 1988. 350 с.

6 Бэр Я., Заславски Д., Имрей С. Физико-математические основы фильтрации воды. М.: Мир, 1971. 452 с.

7 Роде А.А. Водные свойства почв и грунтов. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 132 с.

8 Фандеев В.П., Самохина К.С. Методы исследования пористых структур // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2015. Т. 7. № 4. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/34TVN415.pdf>

9 Xiong Q., Baychev T.G., Jivkov A.P. Review of pore network modelling of porous media: Experimental characterisations, network constructions and applications to reactive transport // *Journal of Contaminant Hydrology*. 2016. V. 192. P. 101–117. doi: 10.1016/j.jconhyd.2016.07.002

10 Пантелеев В.Г., Клыкова Е.И., Егорова О.В. Компьютерная микроскопия. М.: Техносфера, 2005. 304 с.

11 Жуков В.Г. Геометрические характеристики пористых тел // *Теоретические основы химической технологии*. 2000. Т. XXXIV. № 2. С. 134–137.

12 Грег С., Скиннг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость: 2-е изд. М.: Мир, 1984. 306 с.

13 Khan M.I.H., Joardder M.U.H., Kumar C., Karim M.A. et al. Multiphase porous media modelling: A novel approach to predicting food processing performance // *Critical reviews in food science and nutrition*. 2018. V. 58. № 4. P. 528–546.

14 Cuadros T.R., Aguilera J.M. Gels as precursors of porous matrices for use in foods: a review // *Food Biophysics*. 2015. V. 10. № 4. P. 487–499.

15 Haller P., Dec D., Zúñiga F., Thiers O., Ivelic-Sáez, J. et al. Effect of hydraulic and mechanical stresses on the functional resistance and resilience of the porous system of a Ñadi (Aquands) under different land uses // *Agro Sur*. 2015. V. 43. № 2. P. 41–52.

16 Udenni Gunathilake T., Ching Y., Ching K., Chuah C. et al. Biomedical and microbiological applications of bio-based porous materials: A review // *Polymers*. 2017. V. 9. № 5. P. 160.

17 Kanimozhi K., Basha S.K., Kumari V.S. Processing and characterization of chitosan/PVA and methylcellulose porous scaffolds for tissue engineering // *Materials Science and Engineering: C*. 2016. V. 61. P. 484–491.

## REFERENCES

1 Teoreticheskiye osnovy pishchevykh tekhnologiy [Theoretical foundations of food technology: In 2 x books. Book 1; Editor V.A. Panfilov]. Moscow, KolosS, 2009. 608 p. (in Russian).

2 Chueshov V.I. et al. Promyshlennaya tekhnologiya lekarstv [Industrial technology of drugs: in 2 volumes]. Kharkov: publishing house NFAU MTK, 2002. vol. 1,2. (in Russian).

3 Axelrud G.A., Altshuler M.A. Vvedeniye v kapillyarno-khimicheskuyu tekhnologiyu [Introduction to capillary-chemical technology]. Moscow, Khimiya, 1983. 263 p. (in Russian).

4 Devold H. Oil and gas production handbook. An introduction to oil and gas production, transport, refining and petrochemical industry. Oslo, ABB AS, 2013. 152 p.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Валерий Г. Жуков** д.т.н., профессор, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмалопроductов, ул. Некрасова, 11, Красково, 140051, Россия, z-v-gr@mail.ru

**Николай Д. Лукин** д.т.н., профессор, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмалопроductов, ул. Некрасова, 11, Красково, 140051, Россия, vniik@arrisp.ru

**Валерий М. Чесноков** к.т.н., Всероссийский научно-исследовательский институт крахмалопроductов, ул. Некрасова, 11, Красково, 140051, Россия vmches@yandex.ru

## КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 15.04.2019

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 23.05.2019

5 Sel'skokhozyaystvennyye gidrotekhnicheskiye melioratsii [Agricultural hydraulic engineering reclamation: a Training manual; ed. by CM. Goncharova, S.M. Korobchenko]. Lviv, Vishka shk., Publishing House at the Lviv State University, 1988. 350 p. (in Russian).

6 Baer Ya., Zaslavsky D., Imrey S. Fiziko-matematicheskiye osnovy fil'tratsii vody [Physical and mathematical foundations of water filtration]. Moscow, Mir, 1971. 452 p. (in Russian).

7 Rode A.A. Vodnyye svoystva pochv i gruntov [Water properties of soils and soils]. Moscow, Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1955. 132 p. (in Russian).

8 Fandeev V.P., Samokhina K.S. Research Methods for Porous Structures. *Internet-zhurnal "NAUKOVEDENIYe"* [Internet Journal "SCIENCE"]. 2015. vol. 7. no. 4. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/34TVN415.pdf> (in Russian).

9 Xiong Q., Baychev T.G., Jivkov A.P. Review of pore network modelling of porous media: Experimental characterisations, network constructions and applications to reactive transport. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2016. vol. 192. pp. 101–117. doi: 10.1016/j.jconhyd.2016.07.002

10 Panteleev V.G., Klykova E.I., Egorova O.V. Komp'yuternaya mikroskopiya [Computer microscopy]. Moscow, Tekhnosfera, 2005. 304 p. (in Russian).

11 Zhukov V.G. Geometric characteristics of porous bodies. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Technology]. 2000. vol. XXXIV. no. 2. pp. 134–137. (in Russian).

12 Greg S., Sking K. Adsorbtsiya, udel'naya poverkhnost', poristost' [Adsorption, specific surface area, porosity: 2nd ed.]. Moscow, Mir, 1984. 306 p. (in Russian).

13 Khan M.I.H., Joardder M.U.H., Kumar C., Karim M.A. et al. Multiphase porous media modelling: A novel approach to predicting food processing performance. *Critical reviews in food science and nutrition*. 2018. vol. 58. no. 4. pp. 528–546.

14 Cuadros T.R., Aguilera J.M. Gels as precursors of porous matrices for use in foods: a review. *Food Biophysics*. 2015. vol. 10. no. 4. pp. 487–499.

15 Haller P., Dec D., Zúñiga F., Thiers O., Ivelic-Sáez, J. et al. Effect of hydraulic and mechanical stresses on the functional resistance and resilience of the porous system of a Ñadi (Aquands) under different land uses. *Agro Sur*. 2015. vol. 43. no. 2. pp. 41–52.

16 Udenni Gunathilake T., Ching Y., Ching K., Chuah C. et al. Biomedical and microbiological applications of bio-based porous materials: A review. *Polymers*. 2017. vol. 9. no. 5. pp. 160.

17 Kanimozhi K., Basha S.K., Kumari V.S. Processing and characterization of chitosan/PVA and methylcellulose porous scaffolds for tissue engineering. *Materials Science and Engineering: C*. 2016. vol. 61. pp. 484–491.

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Valery G. Zhukov** Dr. Sci. (Engin.), professor, All-Russian research Institute of starch products, Nekrasova, 11, Kraskovo, 140051, Russia, z-v-gr@mail.ru

**Nikolay D. Lukin** Dr. Sci. (Engin.), professor, All-Russian research Institute of starch products, Nekrasova, 11, Kraskovo, 140051, Russia, vniik@arrisp.ru

**Valeriy M. Chesnokov** Cand. Sci. (Chem.), All-Russian research Institute of starch products, Nekrasova, 11, Kraskovo, 140051, Russia vmches@yandex.ru

## CONTRIBUTION

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

## CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 4.15.2019

ACCEPTED 5.23.2019