

Д.С. Русаков, А.Н. Чубинский, Г.С. Варанкина

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ

Введение. Известно, что строение древесины наряду с плотностью и влажностью существенно влияет на её прочность [Уголев, 2007; Ugolev, 2014]. Известно также, что строение древесины, включая её пористость, один из ключевых факторов влияния на качество формирования клеевых соединений [Чубинский, 1992]. От строения и состава древесины, в первую очередь – её поверхностного слоя, зависит способность древесины смачиваться и поглощать жидкости и газы [Русаков, Чубинский и др., 2019]. В этой связи представляет определённый интерес использование аппарата теории фракталов для исследования клеевого слоя при склеивании древесины.

Структуру веществ, характеристики отдельных частей которых подобны всей структуре в целом, называют фрактальной [Гелашвили и др., 2013; Гийон и др., 1991; Мандельброт, 2002; Ravikovitch et al., 2000; Rouquerol et al., 1994; Rouquerol et al., 2007]. Известно, что фрактальная структура характерна для ряда твердых тел [Антипов и др., 2009; Балханов, 2013; Божокин и др., 2001; Варанкина и др., 2019; Вишик, 1998; Гаврилова и др., 2015; Русаков, Чубинский и др., 2019; Русаков и др., 2019, Чубинский и др., 2004]. Самоподобие характерно и для строения древесины [Русаков, Чубинский и др., 2019; Чубинский и др., 2004; Ugolev, 2014] (рис. 1).

Известно также, что прочность клеевых материалов оценивается прочностью клеевого соединения при скалывании по клеевому слою [Чубинский, 1992], а разрушение в большинстве случаев – адгезионно-когезионное [Чубинский, 1992; Федяев, Чубинский, 2018]. В процессе склеивания в зоне клеевого слоя формируется новое вещество, вероятно, со своей фрактальной структурой, зависящей от вида и состава клея.

Скопления дислокаций формирующих стенки ячеек являются фракталами, размерность которых сначала увеличивается от $D = 1$ (равномерное распределение дислокаций) до $1 < D < 2$ (рыхлые скопления) и затем достигает $D = 2$ (геометрические стенки ячейки) [Антипов и др., 2009; Балханов, 2013]. Твердые тела, компактность которых близка к равновесной (рис. 2), могут обладать фрактальной структурой.

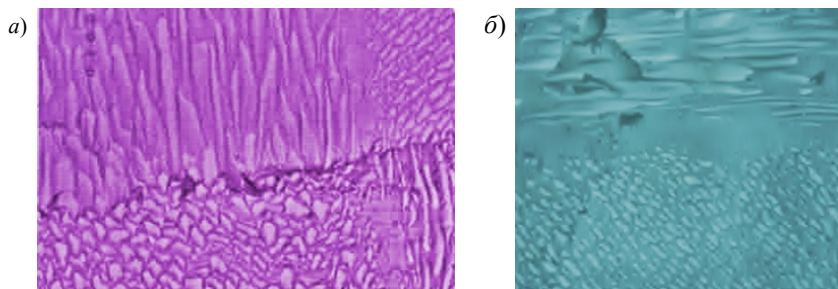


Рис. 1. Микрофотографии поздней древесины лиственницы, полученные на сканирующем электронном микроскопе [Русаков и др., 2019]
(а) ядровая часть, (б) заболонная часть

Fig. 1. Micrographs of late larch wood taken with a scanning electron microscope [Rusakov et al., 2019]: (a) heartwood, (b) sapwood

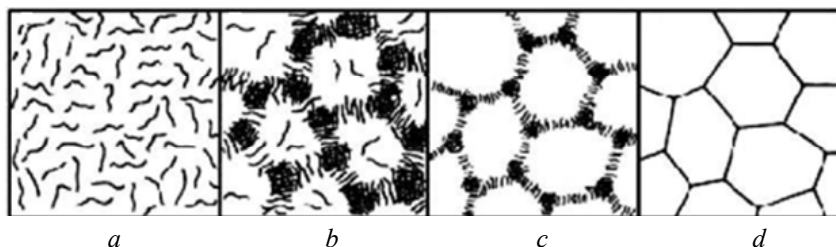


Рис. 2. Схематическое представление перестройки однородной дислокационной структуры в ячеистую: а – хаотическое распределение дислокаций; б, с – образование дислокационных клубков и рыхлых стенок; d – ячеистая структура

Fig. 2. Schematic representation of the transformation of a homogeneous dislocation structure into a cellular one: a – chaotic distribution of dislocations; b, c – formation of dislocation coils and loose walls; d – cellular structure

К фрактальным структурам относят твердые тела, имеющие высокие значения пористости. Так, распределение пор в древесине по размерам в пористом веществе определяется с помощью выражения [Антипов и др., 2009; Балханов, 2013]:

$$C(r) = \text{const} / r^a, \text{ при } a < r < R, \quad (1)$$

где R – размер фрактального агрегата; a – минимальный масштаб структуры (минимально возможная пора); $a = d - D_n$, где d – размерность пространства, D_n – фрактальная размерность пористости.

В последнее время на основе применения принципов фрактальной геометрии модифицируются уравнения топахимической кинетики. Такой подход позволяет обобщать существующие уравнения и получать более точные значения кинетических параметров. Будучи количественной интегральной характеристикой микроструктуры объекта, фрактальная размерность (D) позволяет находить его площадь поверхности или объем с заданным уровнем приближения. При этом взаимосвязь площади поверхности твердофазных реагентов и их фрактальной размерности дает возможность использовать величину D в формально-кинетическом анализе. Так, в том случае, когда скорость твердофазной реакции пропорциональна площади поверхности реакционной зоны, а ее величина D в ходе реакции остается неизменной, простая подстановка фрактальной размерности в формально-кинетические соотношения позволяет получить обобщенное уравнение, описывающее скорость твердофазной реакции, идущей в кинетическом режиме:

$$\frac{d\alpha}{dt} \sim (1 - \alpha)^{(D-1)/D}. \quad (2)$$

Аналогичным образом, могут быть получены уравнения, описывающие кинетику реакций, лимитируемых процессами диффузии, уравнение Гинстлинга–Броунштейна:

$$\frac{d\alpha}{dt} \sim \left[(1 - \alpha)^{(2-D)/D} - 1 \right]^{-1}. \quad (3)$$

Фрактальная размерность может быть применена в качестве универсальной постоянной, характеризующей структуру композита. В ряде случаев поверхность твердого тела может не иметь фрактальных свойств, но фрактальным является распределение реакционных центров по поверхности. Для описания кинетики процессов, идущих с участием реакционных центров, может использоваться «реакционная фрактальная размерность», т. е. размерность множества реакционных центров. Введение фрактальной размерности в уравнения топахимической кинетики позволяет количественно учитывать влияние состояния поверхности, а также – в перспективе – изменение ее морфологии во времени. Аналогичные уравнения позволяют описывать кинетику процессов, протекающих в твердой фазе [Selbo, 1975; Sing et al., 1975; Stoeckli et al., 1984; Ustinov et al., 2007; Walton et al., 2007].

Характеристикой пористого вещества может быть не только сама пористость, связанная в большей степени с размером пор, но и фрактальная размерность, определяемая распределением пор, см. рис. 3.

Зная и понимая принципы построения фрактальных систем, можно определить структуру и топографию поверхности пористых тел, в частности, клеевого соединения древесины, что и явилось целью данной работы.

Методика исследования. Для проведения эксперимента использовали березовый шпон с шероховатостью поверхности 64 мкм, на который наносили клей сразу после его приготовления. Для склеивания применяли карбамидо- и фенолоформальдегидные клеи без модификаторов и модифицированные шунгитами, лигносульфонатами и пектолом [Русаков, Чубинский и др., 2019], которые существенно изменяют свойства клея. Микрофотографии изображения поверхности получали через 5 и 20 мин после нанесения клея (рис. 3), что соответствует началу и концу времени набора пакетов шпона при производстве фанеры. Изображения анализировали с помощью программы Scan master (Professional scanning and analysis program for SPM).

Для определения фрактальной размерности поверхности использовали метод покрытия (рис. 4) [Гийон и др., 1991; Кулак, 1991; Мандельброт, 2002]. Диалоговое окно по определению фрактальной размерности и организация покрытия поверхности ячейками представлены на рис. 5, *a* и 5, *b*.

С целью определения количественных значений фрактальных систем, методом микроскопии в микрофотографиях различных пород древесины (сосна, лиственница, береза) были проведены измерения топографии поверхности. Из срезов фанеры толщиной в 0,25 мм получали микрофотографии (рис 1, 3), сканировали и анализировали по программе Scanmaster. Программный комплекс позволяет определить фрактальную размерность объекта, рис. 6.

Для построения структуры древесно-полимерного материала, использован способ определения фрактальной размерности, основанный на измерении законов распределения плотности в композитах [Кулак, 1991; Мандельброт, 2002].

Прочность фанеры при скалывании и при изгибе определяли по стандартным методикам.

Результаты исследования. Фрактальная размерность (рис. 3–5) поверхности березового шпона, пропитанного модифицированным шунгитами карбамидоформальдегидным клеем, после 20 мин выдержки – 2,47, тогда как поверхность березового шпона с поглощённым модифицированным шунгитами карбамидоформальдегидным клеем после 5 мин выдержки – 2,42, что позволяет предположить эффект консолидации, клей с течением времени проникает в полости древесины.

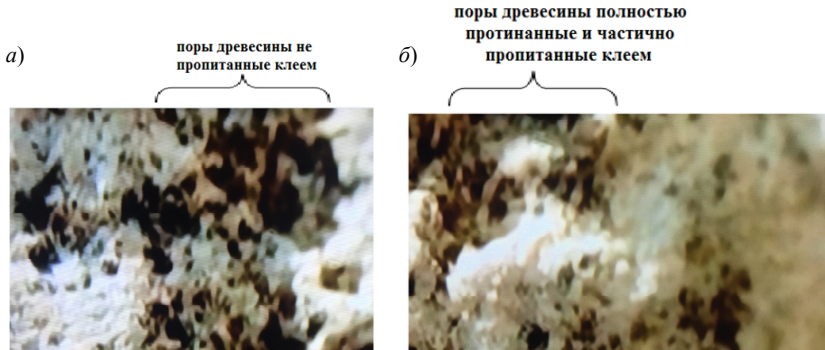


Рис. 3. Фрактальная размерность пористого вещества, поры древесины березы, пропитанные модифицированным шунгитами карбамидоформальдегидным клеем, через 5 мин после нанесения клея (а), через 20 мин после нанесения клея (б)

Fig. 3. Fractal dimension of a porous substance, birch wood pores impregnated with schungite-modified urea-formaldehyde glue, 5 minutes after applying the glue (a), 20 minutes after applying the glue (b)

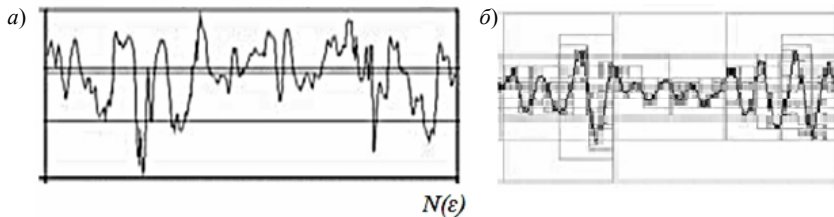


Рис. 4. Профилограмма профилей поверхности древесины березы, пропитанной модифицированным шунгитами карбамидоформальдегидным клеем (а) и организация покрытия поверхности ячейками (б)

Fig. 4. Profile of the surface of birch wood impregnated with schungite-modified urea-formaldehyde glue (a) and organization of surface coating with cells (b)

На основании проведенных измерений пришли к выводу о неоднородности структуры древесного композита в рамках теории фракталов. Основными факторами, указывающими на неоднородность структуры, являются процессы консолидации в том или ином виде, присутствующие при формировании клеевого соединения.

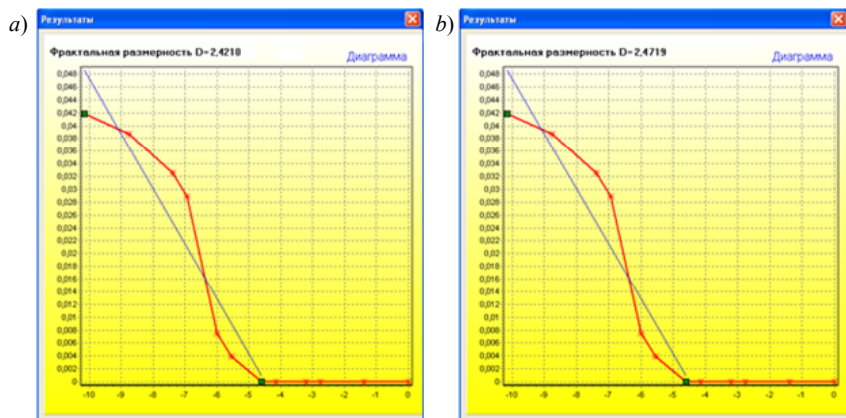


Рис. 5. Диалоговое окно по определению фрактальной размерности пористого вещества, поры древесины березы, пропитанные модифицированным шунгитами карбамидоформальдегидным клеем, через 5 мин после нанесения клея (а), через 20 мин после нанесения клея (б)

Fig. 5. Dialog box for determining the fractal dimension of a porous substance, birch wood pores impregnated with schungite-modified urea-formaldehyde glue, 5 minutes after applying the glue (a), 20 minutes after applying the glue (b)

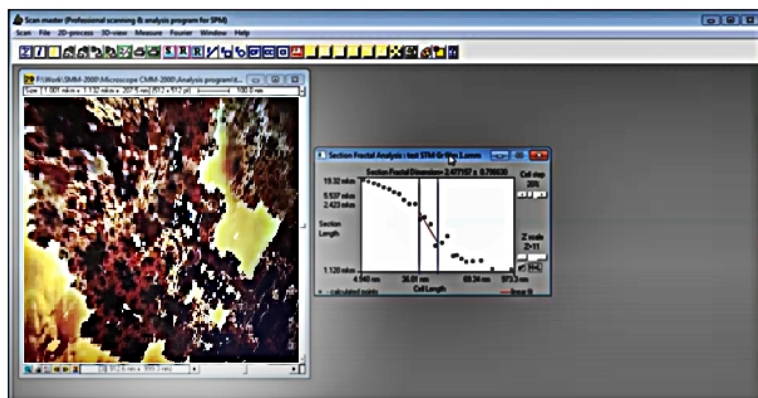


Рис. 6. Диалоговое окно программного комплекса Scanmaster (Professional scanning and analysis program for SPM), по определению фрактальной размерности образца фанеры (увеличение 50000 раз)

Fig. 6. Dialog window of the Scan master software package (Professional scanning and analysis program for SPM), for determining the fractal dimension of a plywood sample (magnification 50,000 times)

Известно, что фрактальная размерность одного из компонентов древесины – лигнина равна 2,68 [Кулак, 1991; Мандельброт, 2002]. Полученные нами результаты (см. таблицу) для древесно-клеевой композиции в области клеевого слоя на основе модифицированных клеев свидетельствуют, что при изменении природы и характера модификатора происходит изменение фрактальной размерности клеевого соединения, которая, вероятно, характеризует и прочность склеивания.

**Зависимость физико-механических показателей
от фрактальной размерности структуры древесно-полимерных композитов**

**Dependence of physical and mechanical parameters
on the fractal dimension of the structure of wood-polymer composites**

Наименование образца, связующее	Плотность, кг/м ³	Прочность фанеры при скалывании по клеевому слою, МПа	Прочность фанеры при статическом изгибе, МПа	Фрактальная размерность (расчетная)
ГОСТ 3916.1–2018	600–700	Не менее 1,5	Не менее 55	–
Фанера из шпона лиственных пород (береза), карбамидоформальдегидная смола +10 % шунгитов	720	1,66	65	2,47
ГОСТ 3916.2–2018	550–650	Не менее 1,0	Не менее 30	–
Фанера из шпона хвойных пород, фенолоформальдегидная смола (контрольный образец)	650	1,27	45	2,47
Фанера из шпона хвойных пород, фенолоформальдегидная смола +10% лигносульфонатов	650	1,55	58	2,65
Фанера из шпона хвойных пород, фенолоформальдегидная смола +10 % пектола	650	1,64	61	2,74
ДСтП, фенолоформальдегидная смола	675 [Кулак, 1991]	–	–	2,74 [Кулак, 1991]

Выводы

Фрактальная размерность вещества клеевого слоя на основе карбамидо- и фенолоформальдегидных смол находится в диапазоне от 2,47 до 2,74.

Введение модификаторов в состав клея способствует плотной упаковке фрагментов макромолекул, что, вероятно, позволяет повысить прочность клеевого соединения.

Библиографический список

Антипов О.И., Неганов В.А., Потапов А.А. Детерминированный хаос и фракталы в дискретно-нелинейных системах / под ред. и с предисл. акад. Ю.В. Гуляева и чл.-корр. РАН С.А. Никитова. М.: Радиотехника, 2009. 235 с.

Балханов В.К. Основы фрактальной геометрии и фрактального исчисления. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2013. 224 с.

Божокин С.В., Паришин Д.А. Фракталы и мультифракталы. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 128 с.

Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Формирование низкотоксичных клеевых древесных материалов : моногр. СПб.: Химиздат, 2014. 148 с.

Вишик М.И. Фрактальная размерность множеств // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 1. С. 122–127.

Гаврилова Н.Н., Назаров В.В. Анализ пористой структуры на основе адсорбционных данных. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. 132 с.

Гелашивили Д.Б., Иудин Д.И., Розенберг Г.С., Якимов В.Н., Солнцев Л.А. Фракталы и мультифракталы в биоэкологии: моногр. Н. Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2013. 370 с.

Гийон Э., Митеску К.Д., Юлен Ж.-П., Ру С. Фракталы и перколяция в пористой среде // УФН. 1991. Т. 161. № 10. С. 121–128.

Кулак М.И. Структурные аспекты фрактальной механики древесно-полимерных композитов // Вестник АН БССР. Серия физико-технических наук. 1991. № 2. С. 18–22.

Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Изд-во Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.

Русаков Д.С., Варанкина Г.С., Чубинский А.Н., Степанищева М.В. Влияние строения и структуры древесины различных пород на расход клея при производстве фанеры // Научный периодический журнал Братского государственного университета. Системы. Методы. Технологии. 2019. № 4 (44). С. 112–117.

Русаков Д.С., Чубинский А.Н., Варанкина Г.С. Совершенствование технологии склеивания древесных материалов модифицированными клеями. СПб.: СПбГЛТУ, 2019. 127 с.

Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. М.: МГУЛ, 2007. 351 с.

Федяев А.А., Чубинский А.Н. Исследование прочности склеивания хвойных пиломатериалов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. Вып. 225. С. 202–212.

Чубинский А.Н. Формирование клеевых соединений древесины. СПб., 1992. 162 с.

Чубинский А.Н., Герасюта С.М., Коваленко И.В. Пористость древесины с учетом её фрактальной структуры. Строение, свойства и качество древесины // Труды IV Междунар. симп. СПб.: СПбГЛТА, 2004. С. 384–386.

Ravikovitch P.I., Neimark A.V. Calculations of pore size distributions in nanoporous materials from adsorption and desorption isotherms // Stud. Surf. Sci. Catal. 2000. Vol. 129. P. 597–606.

Rouquerol J., Avnir D., Fairbridge C.W., Everett D.H., Haynes J.H., Pernicone N., Ramsay J.D.F., Sing K.S.W., Unger K.K. Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report) // Pure Appl. Chem. 1994. Vol. 66, no. 8. P. 1739–1758.

Rouquerol J., Llewellyn P., Rouquerol F. Is the BET equation applicable to microporous adsorbents? // Stud. Surf. Sci. Catal. 2007. Vol. 160. P. 49–56.

Selbo M.L. Adhesive bonding of wood. U. S. Dep. Agr., Tech. Bull. 1975. No. 1512. 124 p.

Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W., Moscou L., Pierotti R.A., Rouquerol J., Siemieniowska T. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984) // Pure Appl. Chem. 1985. Vol. 57, no. 4. P. 603–619.

Stoeckli H.F., Kraehenbuehl F. The external surface of microporous carbons, derived from adsorption and immersion studies // Carbon. 1984. Vol. 22, no. 3. P. 297–299.

Ugolev B.N. Wood as a natural smart material. Wood Science and Technology // Journal of the International Academy of Wood Science. 2014. Vol. 48, no. 3. P. 553–568. DOI 10.1007/s00226-013-0611-2.

Ustinov E.A., Fenelonov V.B., Yakovlev V.A., Eletsii P.I. Characterization of the porous structure of carbon materials by means of density functional theory // Kinet. Catal. 2007. Vol. 48, no. 4. P. 589–598.

Walton K.S., Snurr R.Q. Applicability of the BET method for determining surface areas of microporous metal–organic frameworks // J. Am. Chem. Soc. 2007. Vol. 129, no. 27. P. 8552–8556.

References

Antipov O.I., Neganov V.A., Potapov A.A. Determinirovannyj haos i fraktaly v diskretno-nelinejnyh sistemah [Deterministic chaos and fractals in discrete-nonlinear systems]. Pod red. i s predisloviem akad. Yu.V. Gulyaeva i chl.-korr. RAN S.A. Nikitova. M.: Radiotekhnika, 2009. 235 p. (In Russ.)

Balhanov V.K. Osnovy fraktal'noj geometrii i fraktal'nogo ischisleniya [Fundamentals of fractal geometry and fractal calculus]. Ulan-Ude: Izd-vo Buryatskogo gosuniversiteta, 2013. 224 p. (In Russ.)

Bozhokin S.V., Parshin D.A. Fraktaly i mul'tifraktaly [Fractals and multifractals]. Izhevsk: NIC «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika», 2001. 128 p. (In Russ.)

Varankina G.S., Chubinskii A.N. Formirovanie nizkotoksichnyh kleennyh drevesnyh materialov [Formation of low-toxic glued wood materials]; monografiya. SPb.: Himizdat, 2014. 148 p. (In Russ.)

Vishik M.I. Fraktal'naya razmernost' mnozhestv [Fractal dimension of sets]. *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal*, 1998, no. 1, pp. 122–127. (In Russ.)

Gavrilova N.N., Nazarov V.V. Analiz poristoj struktury na osnove adsorbcionnyh dannyh [Analysis of the porous structure based on adsorption data]. M.: RHTU im. D.I. Mendeleeva, 2015. 132 p. (In Russ.)

Gelashvili D.B., Iudin D.I., Rozenberg G.S., Yakimov V.N., Solncev L.A. Fraktaly i mul'tifraktaly v bioekologii [Fractals and multifractals in bioecology: Monograph]: monografiya. Nizhnij Novgorod: Izd-vo Nizhegorodskogo gosuniversiteta, 2013. 370 p. (In Russ.)

Gijon E., Mitesku K.D., Yulen ZH.-P., Ru S. Fraktaly i perkolyaciya v poristoj srede [Fractals and percolation in a porous medium]. *UFN*, 1991, vol. 161, no. 10, pp. 121–128. (In Russ.)

Kulak M.I. Strukturnye aspekty fraktal'noj mekhaniki drevesno-polimernyh kompozitov [Structural aspects of fractal mechanics of wood-polymer composites]. *Vestnik AN BSSR. Seriya fiziko-tehnicheskikh nauk*, 1991, no. 2, pp. 18–22. (In Russ.)

Mandel'brot B. Fraktal'naya geometriya prirody [Fractal geometry of nature]. – M.: Izd-vo Institut komp'yuternyh issledovaniy, 2002. 656 p. (In Russ.)

Rusakov D.S., Chubinskii A.N., Varankina G.S. Sovershenstvovanie tekhnologii skleivaniya drevesnyh materialov modificirovannyimi kleyami [Improvement of the technology of gluing wood materials with modified adhesives]. SPb.: SPbGLTU, 2019. 127 p. (In Russ.)

Rusakov D.S., Varankina G.S., Chubinskii A.N., Stepanishcheva M.V. Vliyanie stroeniya i struktury drevesiny razlichnyh porod na raskhod kleya pri proizvodstve fanery [Influence of the structure and structure of wood of various species on the consumption of glue in the production of plywood]. *Nauchnyj periodicheskij zhurnal Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2019, no. (44), pp. 112–117. (In Russ.)

Ugolev B.N. Drevesinovedenie i lesnoe tovarovedenie [Wood science and forest commodity science]. M.MGUL, 2007. 351 p. (In Russ.)

Fedyayev A.A., Chubinskij A.N. Issledovanie prochnosti skleivaniya hvoynyh pilomaterialov [Study of the bonding strength of softwood lumber]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2018, 2018, iss. 225, pp. 202–212. (In Russ.)

Chubinskii A.N., Gerasyuta S.M., Kovalenko I.V. Poristost' drevesiny s uchetom eyo fraktal'noj struktury. Stroenie, svojstva i kachestvo drevesiny [The porosity of wood, taking into account its fractal structure]. *Trudy IV Mezhdunar. Simp.*. SPb.: SPbGLTA, 2004, pp. 384–386. (In Russ.)

Chubinskii A. N. Formirovanie kleevyh soedinenij drevesiny [Formation of adhesive joints of wood]. SPb., 1992. 162 p. (In Russ.)

Ravikovitch P.I., Neimark A.V. Calculations of pore size distributions in nanoporous materials from adsorption and desorption isotherms. *Stud. Surf. Sci. Catal*, 2000, vol. 129, pp. 597–606. (In Eng.)

Rouquerol J., Avnir D., Fairbridge C.W., Everett D.H., Haynes J.H., Pernicone N., Ramsay J.D. F., Sing K.S. W., Unger K.K. Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report). *Pure Appl. Chem*, 1994, vol. 66, no. 8, pp. 1739–1758. (In Eng.)

Rouquerol J., Llewellyn P., Rouquerol F. Is the BET equation applicable to microporous adsorbents? *Stud. Surf. Sci. Catal*, 2007, vol. 160, pp. 49–56. (In Eng.)

Selbo, M.L. Adhesive bonding of wood. *U.S. Dep. Agr., Tech. Bull.*, 1975, no. 1512. 124 p. (In Eng.)

Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W., Moscou L., Pierotti R.A., Rouquerol J., Siemieniewska T. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984). *Pure Appl. Chem.*, 1985, vol. 57, no. 4, pp. 603–619. (In Eng.)

Stoeckli H.F., Kraehenbuehl F. The external surface of microporous carbons, derived from adsorption and immersion studies. *Carbon*, 1984, vol. 22, no. 3, pp. 297–299. (In Eng.)

Ugolev B.N. Wood as a natural smart material. *Wood Science and Technology. Journal of the International Academy of Wood Science*, 2014, vol. 48, no. 3, pp. 553–568. DOI 10.1007/s00226-013-0611-2. (In Eng.)

Ustinov E.A., Fenelonov V.B., Yakovlev V.A., Eletsii P.I. Characterization of the porous structure of carbon materials by means of density functional theory. *Kinet. Catal.*, 2007, vol. 48, no. 4, pp. 589–598. (In Eng.)

Walton K.S., Snurr R.Q. Applicability of the BET method for determining surface areas of microporous metal–organic frameworks. *J. Am. Chem. Soc.*, 2007, vol. 129, no. 27, pp. 8552–8556. (In Eng.)

Материал поступил в редакцию 30.08.2022

Русаков Д.С., Чубинский А.Н., Варанкина Г.С. Применение теории фракталов для исследования клеевого соединения // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 240. С. 197–210. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.240.197–210

Фракталы обнаруживаются в структуре твердых тел, самоподобие характерно и для строения древесины. Свойство отдельных частей быть подобными всей структуре в целом называют фрактальной. На основе применения принципов фрактальной геометрии модифицируются уравнения топочимической кинетики. Такой подход позволяет обобщать существующие уравнения и получать более точные значения кинетических параметров. Будучи количественной интегральной характеристикой микроструктуры объекта, фрактальная размерность позволяет находить его площадь поверхности или объем с заданным уровнем приближения. При этом взаимосвязь площади

поверхности твердофазных реагентов и их фрактальной размерности дает возможность ее использовать в формально-кинетическом анализе. Для описания кинетики процессов, идущих с участием реакционных центров, может использоваться «реакционная фрактальная размерность», т. е. размерность множества реакционных центров. Введение фрактальной размерности в уравнения топахимической кинетики позволяет количественно учитывать влияние состояния поверхности, а также – в перспективе – изменение ее морфологии во времени. Понимая принципы построения фрактальных систем, можно определить структуру и топографию поверхности пористых тел, в частности, клеевого соединения древесины (фанеры), что и явилось целью данной работы. На основании проведенных измерений пришли к выводу о неоднородности структуры древесины в рамках теории фракталов. Основным фактором, указывающим на неоднородность структуры древесины, являются процессы консолидации в том или ином виде, присутствующие в технологии производства фанеры. Предполагается, что композиционный древесный материал, в частности, фанера, имеет дисперсионную основу, т. е. скелет материала образован дисперсными частицами (древесинного вещества, частично заполненного клеем) и межчастичными порами. Производится идеализация древесно-полимерного материала, поскольку по природе своей такие материалы являются консолидированными дисперсными средами, при их изготовлении необходимо учитывать случайные отклонения и случайные взаимодействия технологических факторов. Для построения структуры древесно-полимерного материала (фанеры) используется способ определения фрактальной размерности, основанный на измерении законов распределения плотности в композитах. Фрактальная размерность может быть использована в качестве универсальной постоянной, характеризующей структуру композита. Полученные нами значения фрактальной размерности для фанеры на основе модифицированных клеев свидетельствуют, что при изготовлении имеет место быть так называемая суперпозиция (наложение) обоих типов компонентов (смолы и модификатора). Отметим, что фрактальная размерность чувствительна к изменениям технологических режимов, так, при изменении природы и характера модификатора происходит изменение фрактальной размерности, а также, по нашему мнению, физико-механических показателей фанеры.

Ключевые слова: фракталы, фрактальная размерность, структура древесно-полимерного материала, размерность пор древесины, адсорбционная способность пористых тел, шпон, модифицированная смола, прочность фанеры.

Rusakov D.S., Chubinsky A.N., Varankina G.S. Application of fractal theory to the study of adhesive bonding. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2022, iss. 240, pp. 197–210 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.240.197-210

Fractals are found in the structure of solids, self-similarity is also characteristic of the structure of wood. The property of individual parts to be similar to the entire structure as a whole is called fractal. Based on the application of the principles of fractal geometry, the equations of topochemical kinetics are modified. This approach makes it possible to generalize the existing equations and obtain more accurate values of the kinetic parameters. Being a quantitative integral characteristic of the microstructure of an object, the fractal dimension makes it possible to find its surface area or volume with a given level of approximation. At the same time, the relationship between the surface area of solid-phase reagents and their fractal dimension makes it possible to use it in a formal kinetic analysis. To describe the kinetics of processes involving reaction centers, the «reaction fractal dimension» can be used, i.e. the dimension of the set of reaction centers. The introduction of fractal dimension into the equations of topochemical kinetics makes it possible to quantitatively take into account the influence of the state of the surface, as well as, in the future, the change in its morphology with time. Understanding the principles of constructing fractal systems, it is possible to determine the structure and topography of the surface of porous bodies, in particular, the glue joint of wood (plywood), which was the goal of this work. Based on the measurements carried out, we came to the conclusion about the heterogeneity of the structure of wood, in the framework of the theory of fractals. The main factor indicating the heterogeneity of the wood structure is the consolidation processes in one form or another, present in the plywood production technology. It is assumed that the composite wood material, in particular plywood, has a dispersion base, i.e. the skeleton of the material is formed by dispersed particles (a wood substance partially filled with glue) and interparticle pores. The idealization of wood-polymer material is carried out, since by their nature such materials are consolidated dispersed media, in their manufacture it is necessary to take into account random deviations and random interactions of technological factors. To build the structure of a wood-polymer material (plywood), a method for determining the fractal dimension is used, based on measuring the laws of density distribution in composites. The fractal dimension can be used as a universal constant characterizing the structure of the composite. The values of the fractal dimension obtained by us for plywood based on modified adhesives indicate that the so-called superposition (overlay) of both types of components (resin and modifier) takes place during manufacture. Note that the fractal dimension is sensitive to changes in technological regimes, so when the nature and nature of the modifier change, the fractal dimension changes, as well as, in our opinion, the physical and mechanical parameters of plywood.

Keywords: fractals, fractal dimension, wood-polymer material structure, wood pore dimension, adsorption capacity of porous bodies, veneer, modified resin, plywood strength.

РУСАКОВ Дмитрий Сергеевич – доцент кафедры технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук, доцент.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: dima-ru25@mail.ru

RUSAKOV Dmitry S. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Materials Technology, designs and constructions of wood, St.Petersburg State Forestry University.

194021. Institutskii per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: dima-ru25@mail.ru

ЧУБИНСКИЙ Анатолий Николаевич – заведующий кафедрой технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук, профессор.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a.n.chubinsky@gmail.com

CHUBINSKY Anatoly N. – DSc (Technical), Professor, Head of the Department of materials technology, designs and constructions of wood, St.Petersburg State Forestry University.

194021. Institutskii per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: a.n.chubinsky@gmail.com

ВАРАНКИНА Галина Степановна – профессор кафедры технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета, доктор технических наук, профессор.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: varagalina@yandex.ru

VARANKINA Galina S. – DSc (Technical), Professor of the Department of Materials Technology, designs and constructions of wood, St.Petersburg State Forestry University.

194021. Institutskii per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: varagalina@yandex.ru