

Исследование параметров древесины, определяющих качество древесного угля

**Бирман А.Р., Белоногова Н.А., Локштанов Б.М., Соколова В.А.,
Теплов А.В., Алексеева Е.А., Зотова Е.А.**

Введение. Для получения древесных углей используется, как правило, уголь-сырец из древесины. В настоящее время предъявляют дополнительные требования к свойствам древесного угля и, следовательно, к технологии его получения, направленной на улучшение качества за счёт повышения прочности и плотности конечного продукта [1, 2].

Цели и задачи. Одна из задач, поставленная перед древесноугольной промышленностью, в использование технологий модификации древесины, с целью переработки малоиспользуемого природного сырья в промышленный материал с коренным улучшением его естественных физико-технических, технологических и потребительских свойств [3].

Проанализировав результатов исследований, проведённых в области модифицирования древесины, можно отметить целесообразность дальнейших исследований в этом направлении и создание на их базе новых технологий и оборудования для уплотнения и пропитки древесины.

Следует выделить один из наиболее оптимально продуктивных способов получения окисленных древесных углей путём тепловой обработки в капсуле с заполнением десятипроцентным водным раствором пероксида водорода, помещённой в поле центробежных сил.

Пропитка центробежным способом основывается на взаимодействии находящихся в поле центробежных сил пропитывающей жидкости и капиллярно-пористой структуры, например, древесины или древесного угля. При использовании центробежного способа значительно сокращается продолжительность пропитки, необходимой для интенсивного процесса окисления угля [4-7].

Параметром, определяющим процесс пропитки, принято считать линейную скорость торца материала, или параметр пропитки h :

$$h = \omega^2 \cdot R^2, \quad (1)$$

где ω – частота вращения; R – радиус дальнего торца материала [8].

В работе П. Хейцмана [9] представлена зависимость радиуса капилляра древесины r , по которому происходит движение жидкости в центробежном поле, от параметра пропитки:

$$r = \frac{8\sigma}{\rho\omega^2(R^2 - Rg^2)}, \quad (2)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения; ρ – плотность жидкости; Rg – радиус мениска в капилляре [10].

Высока эффективность для пропитки древесины центробежным способом (замещение пропитывающим составом свободных воздуха или влаги, находящихся в древесине) [4].

Методика исследования. Под теоретической моделью капиллярно-пористой структуры понимают воображаемое тело, состоящее из системы гипотетических капилляров, эквивалентное в отношении тех или иных свойств (гидродинамических, капиллярных и других) исследуемому пористому телу.

Простейшая капиллярная модель представляет собой систему параллельных прямых трубок одинакового радиуса и одинаковой длины, равной длине рассматриваемого тела, в направлении потока движущейся сквозь него жидкости.

Ряд авторов [11-14] предложили рассматривать древесину как систему капилляров, радиусы которых образуют непрерывную статистическую совокупность, характеризующуюся функцией распределения $f(r)$. В этом случае $f(r)$ – доля общего числа капилляров тела, радиусы которых заключены между r и $kr+dr$. При этом полная проницаемость определяется зависимостью:

$$k = \frac{n\pi}{8\sum_u^2} \cdot \int_0^\infty r^4 \cdot f(r) \cdot dr, \quad (3)$$

где n – число пор на единицу площади поперечного сечения; r – радиус капилляра; $8\sum_u^2$ – коэффициент извилистости, равный отношению $\frac{l}{l_0}$, (l – длина пути движения жидкости; l_0 – длина образца).

Описанная модель анизотропна, так как проницаема в одном направлении.

При допущении существования трёх систем капилляров, оси которых взаимно перпендикулярны, модель становится изотропной и численный коэффициент в формуле (3) принимает вид $1/24$.

Следующим этапом совершенствования капиллярной модели является предположение о переменном сечении капилляра по длине. Для этого случая получают значение проницаемости в виде

$$k = \frac{n^2 \pi^2}{8m \int_0^{\infty} f(r) \cdot \frac{dr}{r^6}}, \quad (4)$$

где m – коэффициент пористости, равный $n\pi r^2$.

При математическом описании структуры древесины удовлетворительные результаты [12, 14] показывает модель, состоящая из системы продольных и поперечных капилляров различных радиусов, распределённых в соответствии с функцией $F(r)$ и различных длин. В данной работе использована именно такая модель строения древесины.

Пористость древесных углей не находится в прямой зависимости от их прочности. Более пористый древесный уголь может быть более прочным, чем менее пористый, если стенки клеток прочны. Прочность же стенок клеток угля сильно возрастает с повышением температуры прокалывания угля при увеличении его пористости. Отношение между порами и плотной массой древесных углей зависит от толщины стенок клеток, благодаря чему это отношение бывает различно не только для разных пород, но даже для одной и той же породы.

Общая пористость не является постоянной величиной и кроме качества и породы древесины, а также способа получения угля, зависит также от гранулометрического состава угля. Так, при измельчении угля от размеров куска 2х2х4 см до размеров зёрен 0,3 см общая пористость его уменьшается на 7...10%, что происходит за счёт исчезновения крупных пор и трещин при измельчении угля. Это положение является важным для данных исследований, так как связано с анализом сорбционной способности кускового активированного угля и возможностью его регенерации, практически неосуществимой при использовании порошкообразных сорбентов.

Для получения сорбентов на базе окисленных углей необходимо ввести жидкий окислитель (исследуемый нами вариант) в поровое пространство угля-сырца методом пропитки.

Принимая допущение о сходном анатомическом строении исходной древесины и древесных углей, можно утверждать, что изучение пропитываемости капиллярно-пористой структуры связано с исследованием её проницаемости, которую обычно определяют, основываясь на эмпирическом законе Дарси [15, 16]. Движение несжимаемой жидкости при этом выражается уравнением [15-19]:

$$U = \frac{k}{\mu} \cdot A \cdot \frac{P_1 - P_2}{L}, \quad (5)$$

где U – скорость движения жидкости; k – коэффициент проницаемости; A – площадь сечения образца; L – длина образца; P_1-P_2 – градиент давления на концах образца; μ – вязкость жидкости.

При изучении проницаемости капиллярно-пористой структуры на примере древесины могут использоваться и другие зависимости, а именно: уравнение гидродинамики Эйлера, учитываться существование сложного типа связи между показателями пропитываемости и параметрами режима, нелинейные уравнения движения жидкостей в условиях нестационарного потока и другие [20-21].

Так как пропитываемый элемент является цилиндром, ось которого в центробежной установке совпадает с полярным радиусом вращающейся вокруг своего полюса системы координат, и задача сводится к дифференциальному уравнению, если не учитывать сжимаемость жидкости и древесного угля [22-24].

Наличие точных решений позволяет проверить сходимость и порядок точности методов решения, которые служат средством изучения процесса пропитки в условиях больших скоростей вращения и больших радиусов платформы центрифуги [25-27].

Задаёмся тем, что стержень и жидкость несжимаемы, продольная фильтрация в стержне подчиняется закону Дарси:

$$v(x,t) = -K \frac{dH}{dx}, \quad H(x,t) = u(x,t) - \frac{1}{2} \rho \omega^2 (a-x)(2s-a-x) \quad (6)$$

где K – коэффициент продольной фильтрации; $H(x,t)$ – гидравлический напор; x – продольная координата, начало которой $x=0$ совпадает с точкой А; $u(x,t)$ – поровое давление в образце; ρ – плотность жидкости; s – расстояние от точки А до оси L; v – скорость фильтрующейся поровой жидкости в направлении x .

Подчиняясь закону Дарси, вычислив скорость движения границы пропитки, из условия $a(0)=0$ или из более общего условия $a(0)=a_*$, где a_* – глубина пропитки в момент $t=0$, возникшая, например, за время разгона центрифуги до скорости ω , мы можем найти глубину пропитки $a(t)$, время t_1 , необходимое для пропитки на глубину a_1 , и другие физические характеристики всего процесса.

При решении уравнений формула выражения скорости пропитки примет вид

$$\frac{da}{dt} = \frac{k}{a} \left[\frac{1}{2} \rho \omega^2 (h-a)(2s-h-a) - P_a \right] \quad (7)$$

Отсюда следует, что скорость максимальна при $a=0$, в начале процесса и при $P_a=0$ обращается в нуль, если $h=a$. Таким образом, неэффективна пропитка сортиментов, длина которых близка к радиусу платформы центрифуги.

Пусть $P_a=0$. Тогда имеем при $h=s$

$$t = \frac{2}{k\rho\omega^2} \int \frac{ada}{(s-a)^2} = \frac{2}{k\rho\omega^2} \left[\ln(s-a) + \frac{s}{s-a} \right] + c \quad (8)$$

При $h<s$:

$$t = \frac{2}{k\rho\omega^2} \int \frac{ada}{(h-a)(2s-h-a)} = \frac{2}{k\rho\omega^2} \left[\frac{2s-h}{2(s-h)} \ln(2s-h-a) - \frac{h}{2(s-h)} \ln(h-a) \right] + c \quad (9)$$

Из условия $a=0$ при $t=0$ следует, что

$$c = -2(k\rho\omega^2)^{-1} (\ln s + 1), \quad h = s$$

$$c = \frac{2}{k\rho\omega^2} \left[\frac{h}{2(s-h)} \ln h - \frac{2s-h}{2(s-h)} \ln(2s-h) \right], \quad h < s \quad (10)$$

Таким образом, окончательно

$$t = 2(k\rho\omega^2)^{-1} \left[\ln(s-a)s^{-1} + a(s-a)^{-1} \right], \quad h = s$$

$$t = \frac{2}{k\rho\omega^2} \left[\frac{2s-h}{2(s-h)} \ln \frac{2s-h-a}{2s-h} - \frac{h}{2(s-h)} \ln \frac{h-a}{h} \right], \quad h < s \quad (1.11)$$

Более громоздкие выкладки позволяют вычислить интеграл из уравнения (11) и при $P_a \neq 0$. В этом случае

$$t = \frac{1}{k\rho\omega^2} \ln \left[\frac{\rho\omega^2(s-a)^2 - 2P_a}{\rho\omega^2 s^2 - 2P_a} \right] - \frac{s}{k\omega\sqrt{2\rho P_a}} \ln \left[\frac{\rho\omega^2 s^2 - 2P_a - \sqrt{\rho\omega a}(\sqrt{\rho\omega s} + \sqrt{2P_a})}{\rho\omega^2 s^2 - 2P_a - \sqrt{\rho\omega s} - \sqrt{2P_a}} \right], \quad h = s \quad (12)$$

Обратную зависимость $a=a(t)$ можно построить в виде номограмм, построив кривые $t=t(a)$.

Результаты и обсуждение исследований. Проанализируем методику определения коэффициента фильтрации [28]. Коэффициент фильтрации k , входящий в расчётные формулы, представленные выше, можно найти экспериментально. Для этого в формулу

$$k = \frac{2}{\rho\omega^2 t} \left[\ln \frac{s-a}{s} + \frac{a}{s-a} \right], \quad h = s \quad (13)$$

Следующую из (12) или в аналогичную громоздкую формулу, следующую из (11), нужно подставить величины ρ, ω, t, s, a . Однако определение величины a опытным путём требует извлечения образца древесного угля из центробежной установки, раскалывания образца с целью визуального определения глубины проникновения пропитывающей жидкости. При этом граница проникновения жидкости в образец может быть размыта или трудно определена по причине прозрачности жидкости, что имеет место при пропитке древесного угля не подкрашенным раствором пероксида в воде.

Для практики можно предложить методику, основанную на замерах расходов пропитывающей жидкости. Выпишем расчётные формулы, ориентированные на этот метод и на сравнительно простое соотношение (14). Полагая, что время эксперимента должно быть невелико и, следовательно, a мало по отношению к s , получим в первом приближении

$$\ln \frac{s-a}{s} \approx -\frac{a}{s} \quad (14)$$

При одинаковой пористости образца по x объем θ поглощённой жидкости, т.е. расход, пропорционален глубине пропитки a :

$$\theta = a\gamma, a = \frac{\theta}{\gamma} \quad (15)$$

$$k \approx \frac{2a^2}{\rho\omega^2ts(s-a)}, h = s; k \approx \frac{a^2}{\rho\omega^2th(2s-h)}, h < s$$

где γ – постоянная.

Пусть θ_1 – расход жидкости, a_1 – глубина в момент t_1 , θ_2 и a_2 – расход и глубина в момент t_2 .

Величина k также не зависит от x . Подставив в (14) выражение (15) и приравняв величины k для a_1 и a_2 , получим

$$\frac{2}{t_1} \left[-\frac{\theta_1}{\gamma s} + \frac{\theta}{\gamma s - \theta_1} \right] = \frac{2}{t_2} \left[-\frac{\theta_2}{\gamma s} + \frac{\theta}{\gamma s - \theta_2} \right] \quad (16)$$

Отсюда, величина γ определяется формулой

$$\gamma = \frac{\theta_1\theta_2(\theta_1t_2 - \theta_2t_1)}{s(\theta_1^2t_2 - \theta_2^2t_1)} \quad (17)$$

и может быть вычислена по двум замерам расходов в моменты t_1 и t_2 .

Вычислив теперь $a_1 = \frac{\theta_1}{\gamma}$ и, подставив в (14), получим

$$k = \frac{2}{\rho\omega^2t_1} \left[\ln \frac{s-a_1}{s} + \frac{a_1}{s-a_1} \right], k \approx \frac{2a_1^2}{\rho\omega^2t_1s(s-a_1)}, h = s \quad (18)$$

Величина k для проверки взятых гипотез может быть найдена и по нескольким замерам расходов.

Аналогично, используя формулу (13), можно найти экспериментальным путём две величины k и P_a . Расчётные формулы выписываются по той же схеме.

Заключение и выводы. Полученное решение задачи может быть расширено и обобщено в разных направлениях. Сама задача может быть сформулирована в соответствии с другими технологическими и конструктивными решениями [22-24, 29-30]. При этом допустимы иные, более сложные, законы взаимодействия твёрдой и жидкой фаз, неоднородности в физических свойствах. Задачи можно рассматривать для трёхфазной среды, учитывая наличие в материале пузырьков воздуха, сжимаемость всех фаз и влияние температурного фактора. Исследование решений таких задач для нелинейных систем параболического типа дифференциальных уравнений в частных производных на основе применения конечно-разностных методов является темой дальнейшего исследования процессов пропитки древесного угля в поле центробежных сил.

Библиографический список

1. Юрьев Ю.Л. Древесный уголь. Справочник /автор и составитель Ю.Л. Юрьев. Екатеринбург: Издательство «Сократ», 2007. – 184 с.
2. Бирман А.Р., Белоногова Н.А. Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы Международной научно-технической конференции // Новые направления использования древесины осины и её отходов. – Вологда: ВоГТУ, 2009, – 217 с.
3. Бирман А.Р., Соколова В.А., Кривоногова А.С. Борирование древесины пропиткой с целью повышения её нейтронозащитных свойств. // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии: Вып. 208. – СПб.: СПбГЛТУ, 2014. – С. 130-138.
4. Кацадзе В.А., Виноградов Д.В. Центробежная пропитка древесины. Архангельск: Лесной журнал, №3, 2007. – С. 17-21.
5. Куницкая О.А., Бурмистрова С.С., Костин И.В. Результаты экспериментальных исследований центробежной пропитки древесины // Системы. Методы. Технологии, 2012. № 3. С. 95-101.
6. Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьев Г.В., Есин Г.Ю. Исследование кинетики центробежной пропитки древесины // ИВУЗ Лесной журнал, № 2, 2013. С. 60-70.
7. Гончаров Ю.А., Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н., Куницкая О.А. Модель процесса пропитки древесины центрифугированием с учётом вязкости пропиточной жидкости. Научное обозрение, № 6, 2014. С. 329 – 336.

8. Кулимин В.В. Исследование процесса обезвоживания пиломатериалов в центробежном поле [Текст] / В.В. Кулимин // Науч. тр. МЛТИ. – 1980. – Вып. 124. – 125 с.
9. Heizemann, P. Holz als Roch – und Werkstoff [Текст] / P.Heizemann. – 1970. №8. – P. 295-309.
10. Бирман А.Р., Соколова В.А., Кривоногова А.С Торцовая пропитка длинномерных сортиментов. // Научное обозрение. № 7/2014. – М.-Саратов: ООО «Буква», 2014. – С. 281-286.
11. Николаевский В.М. Капиллярная модель диффузии в пористых средах. // Известия АН СССР, №4 – М., 1979. – с. 210.
12. Серговский П.С. Гидротермическая обработка древесины. – М.: Лесная промышленность, 1981. – 304 с.
13. Харук Е.В. Проницаемость древесины газами и жидкостями. – Новосибирск: Наука, 1976. – 190 с.
14. Пятякин В.И., Тишин Ю.Г., Базаров С.М. Техническая гидродинамика древесины. – М.: Лесная промышленность, 1990. – 304 с.
15. Bramhall G. The Validity of Darcy Law in the Axial Penetration of Wood. – Wood Sci. and Tehnol., 1971, V 5, №2, P. 121-134.
16. Baily P.J., Preston R.D. Some Aspects of Softwood Permeability. II Flow of Polar and Non Polar liquids Sapwood and Heartwood of Douglas Fir. // Holzforschung. 1970. В 24, Н 2, P. 34-45.
17. Харук Е.В. Проницаемость древесины газами и жидкостями. – Новосибирск: Наука, 1976. – 190 с.
18. Бирман А.Р. Критический анализ использования способов пропитки с целью повышения качественных характеристик древесного сырья / Бирман А.Р., Локштанов Б.М., Кривоногова А.С., Тоан Нгуен Ван // Актуальные проблемы развития лесного комплекса – Вологда: ВоГУ, 2016. – С. 58-60.
19. Расев А.И. Некоторые задачи в области исследования процессов пропитки древесины. В кн. Химическая модификация древесины. – Рига: Знание, 1975. – С. 161-180.
20. Гусев Н.Ф. Движение жидкости в древесине. – В кн.: Труды МЛТИ. Т.1. Вып. 1. – М., 1950. – 48 с.
21. Бирман А.Р. Технологическое устройство для пропитки капиллярно-пористых тел / Бирман А.Р., Кривоногова А.С., Соколова В.А., Нгуен Ван Т.Актуальные проблемы развития лесного комплекса – Вологда: ВоГУ, 2017. – С. 99-101.
22. Куницкая О.А., Ржавцев А.А., Григорьев И.В., Соколова В.А. Устройство для пропитки деревянных заготовок. Патент на полезную модель № 91927, опубл. 10.3.2010.
23. Куницкая О.А., Бурмистрова С.С., Тихонов И.И., Григорьев И.В. Устройство для пропитки древесины. Патент на полезную модель № 119283, опубл. 20.8.2012.

24. *Литвинов, В.В, Ширишков, В.И., Пиялкин, В.Н.* Химия и технология брикетирования древесного угля // ИВУЗ. Лесной журнал: №6 2012. – Архангельск, 2012. – С. 101-108.
25. *Бирман А.Р.* Торцовая пропитка длинномерных сортиментов / Бирман А.Р., Соколова В.А., Кривоногова А.С. // Научное обозрение. 2014 № 7 – М.: «Буква», 2014. – С. 281-285.
26. *Кривоногова А.С.* Актуальность разработки модели установки для пропитки капиллярно-пористых тел / Кривоногова А.С., Бирман А.Р., Нгуен Ван Тоан // Инновационные процессы в научной среде: сборник статей МНПК. 2016, Ч. 3 – Уфа: МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2016. – С. 54-56.
27. *Бирман А.Р.* Пропитка древесины гидростатическим способом / Бирман А.Р., Соколова В.А., Кривоногова А.С. // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: Сборник науч. труд. по материал. заоч. НПК, 2014 г. №5 ч. 4 (10-4). – Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГЛТА», 2014. – С. 33-38.
28. *Бирман А.Р.* Определение коэффициента фильтрации и параметров процесса пропитки древесных углей в поле центробежных сил / Бирман А.Р., Кривоногова А.С., Соколова В.А. // Научное обозрение. 2015 №7 – М.: «Буква», 2015. – С. 238-243.
29. *Кривоногова А.С.* Моделирование процесса пропитки капиллярно-пористых структур в производстве древесно-угольных сорбентов / Кривоногова А.С., Бирман А.Р., Соколова В.А., Нгуен Ван Тоан, Белоногова Н.А. // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы НТК – СПб.: СПбГЛТУ, 2016. – С. 204-205.
30. *Кривоногова А.С.* Пропитка капиллярно-пористых структур встречно-центробежным способом / Кривоногова А.С., Бирман А.Р. // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сборник трудов по материалам международной заочной НПК, 2015. - № 2, ч.1 (13-1). Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГЛТА», 2015. – С. 236-240.

Сведения об авторах

ФИО	Бирман А.Р.
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	3247-9904
e-mail	Birman1947@mail.ru
ФИО	Белоногова Н.А.
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	8883-9771
e-mail	graph@spbftu.ru
ФИО	Локштанов Б.М.
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	4014-2820
e-mail	blokshtanov@mail.ru
ФИО	Соколова В.А.
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	5116-5102
e-mail	sokolova_vika@inbox.ru
ФИО	Тепноев А.В.
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	4451-4059
e-mail	avt01@inbox.ru
ФИО	Алексеева Е.А.
Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	3535-5149
e-mail	olgakameneva@mail.ru
ФИО	Зотова Е.А.

Организация	Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
Адрес организации	194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия
SPIN-код	3605-7529

Аннотация

Представлен анализ способов пропитки древесного угля. Построена математическая модель процесса пропитки капиллярно-пористых структур в поле центробежных сил. Исследована взаимосвязь проницаемости и пропитываемости капиллярно-пористых структур. Выявлены зависимости проницаемости капиллярно-пористых структур. Разработана методика определения коэффициента фильтрации. Проводится исследование поведение объекта процесса пропитки на основе его математической модели. Предложена методика расчёта экспериментального определения расхода пропитывающей жидкости и вычисление величины и зависимости коэффициента фильтрации.

Ключевые слова: древесный уголь, капиллярно-пористая структура, пропитка в поле центробежных сил, математическая модель пропитки, коэффициент фильтрации, charcoal or, capillary-porous structure, impregnation of the centrifugal force, the mathematical model of imbibition, filtration coefficient.

УДК 630*867.5:630*867.21: 544.022.537:66.011

Разделы рубрикатора ГРНТИ 66.43.99; 66.03.03