

УДК 676.038.2

## ИЗУЧЕНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ БУМАЖНОГО ПОЛОТНА ПРИ ПРЕССОВАНИИ

© *М.А. Агеев\**, *А.С. Шаклеин*

*Уральский государственный лесотехнический университет, Сибирский тракт, 37, Екатеринбург, 620100 (Россия), e-mail: m-ageev@yandex.ru*

Получены результаты распределения размеров пор бумажного полотна в зависимости от давления прессования. Данные исследования позволяют прогнозировать и регулировать эффективность процесса обезвоживания бумажного полотна при прессовании.

*Ключевые слова:* обезвоживание бумаги, прессование, пористость, коэффициент фильтрации, структура бумаги.

### **Введение**

Одним из основных свойств бумаги и бумагоподобных материалов является пористость. На этом свойстве основано применение различных видов бумаги (фильтровальной, промокатальной, санитарно-гигиенической и др.). Величина пористости, а также распределение пор по размерам существенно влияют на физико-механические показатели бумаги. Поэтому представляет интерес изучить влияние технологических операций при производстве бумаги на ее пористую структуру и изучить зависимости, влияющие на формирование пористой структуры бумаги и картона в процессе их изготовления.

Цель данной работы – изучение влияния процесса прессования на структуру бумажного полотна.

Бумажное полотно относится к капиллярно-пористым коллоидным материалам. Для таких материалов существенными технологическими и структурными параметрами, определяющими их поведение в технологических процессах, являются взаимодействие и формы связи влаги и твердых частиц, размеры пор и капилляров, функции их распределения, силы поверхностного натяжения и капиллярного давления.

До настоящего времени такой взгляд на процессы обезвоживания бумажного полотна практически не обсуждался.

В известных работах И.Д. Кугушева [1], В.И. Бирюкова [2], Н.Е. Новикова [3] обезвоживание бумажного полотна рассматривалось с позиции механики сплошных сред. Из двух взаимосвязанных процессов: формование и обезвоживание преимущество в исследованиях отдавалось гидродинамическим факторам и игнорировалось влияние на процесс формирования структуры бумажного листа коллоидно-химических факторов, например, таких как капиллярные явления, поверхностное натяжение, смачивание, распределение пор по размерам.

В результате удаления свободной и части адсорбированной влаги при сушке бумаги волокна сближаются друг с другом до расстояний в несколько ангстрем, на которых начинают действовать межмолекулярные силы, влияющие на формирование бумажного листа. В волокнах возникают напряжения, существенным образом влияющие на физико-механические показатели бумаги. Поэтому изменение размеров пор является решающим фактором формирования механических показателей бумаги.

Для того чтобы углубить знания о механизме структурообразования бумажного листа, необходимо иметь представления о силах, действующих на во-

---

*Агеев Максим Аркадьевич* – доцент кафедры химии древесины и технологии целлюлозно-бумажных производств, кандидат технических наук, тел./факс: (343) 262-97-65, e-mail: m-ageev@yandex.ru  
*Шаклеин Алексей Сергеевич* – аспирант кафедры химии древесины и технологии целлюлозно-бумажных производств, тел./факс: (343) 262-97-65, e-mail: m-ageev@yandex.ru

\* Автор, с которым следует вести переписку.

локну. Величина сил, действующих на волокна, определяется количеством жидкости, содержащейся в порах. Изменения в пористой структуре, обусловленные работой указанных сил, приводят к изменению линейных размеров и деформации волокнистого скелета (коробление, усадка, набухание).

### Экспериментальная часть

Для решения поставленной цели нами был использован прибор (рис. 1), обеспечивающий давление на бумажную отливку.

Испытываемый образец бумажной массы подвергали сжатию между двумя перфорированными пластинами 6 и 7. Величину сжатия регистрировали индикатором 4 с точностью до 0,01 мм.

В качестве испытуемых образцов использовали отливки из 100%-ной сульфатной целлюлозы, степень помола – 60 °ШР, с содержанием 2 г а.с.в. Ступенчато нагружая отливку, регистрировали ее деформацию, изменение фильтрационного напора и определяли скорость фильтрации.

Известно, что проницаемость пористой среды зависит преимущественно от размера поровых каналов, которые образуют поровое пространство.

Зависимости проницаемости от размера пор описывают законами Дарси и Пуазейля.

По закону Пуазейля расход жидкости через пористую среду составляет

$$Q = \frac{nS\pi R^4 \Delta p}{8\mu l}, \quad (1)$$

где  $n$  – число пор, приходящихся на единицу площади фильтрации;  $R$  – радиус поровых каналов (или средний радиус пор среды);  $S$  – площадь фильтрации;  $\Delta p$  – перепад давления;  $\mu$  – вязкость фильтрата (воды);  $l$  – длина пористой среды.

Коэффициент пористости выражается уравнением

$$m = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{обр}}} = \frac{nS\pi R^2 l}{Sl} = n\pi R^2, \quad (2)$$

где  $V_{\text{пор}}$  – объем пор;  $V_{\text{обр}}$  – объем образца.

Преобразовав уравнение (1) с учетом (2), получили

$$Q = \frac{mR^2 S \Delta p}{8\mu l}, \quad (3)$$

Согласно закону Дарси расход жидкости через эту же пористую среду имеет вид

$$Q = k \frac{\Delta p S}{l}, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент фильтрации.

Приравняв (3) и (4), получили уравнение для расчета среднего радиуса пор

$$R = \sqrt{\frac{8k\mu}{m}}. \quad (5)$$

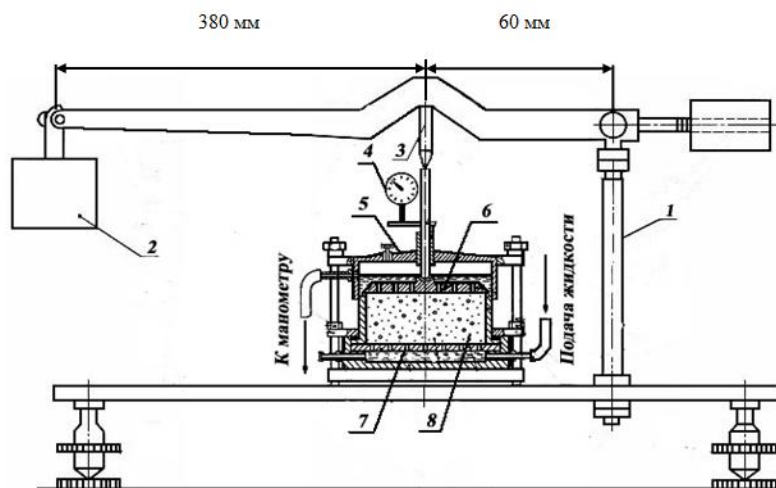


Рис. 1. Устройство для мокрого прессования бумажного образца: 1 – рычажный пресс; 2 – груз; 3 – конус пресса; 4 – индикатор; 5 – крышка; 6 – перфорированный штамп; 7 – фильтрующее сито; 8 – образец

Бумажное полотно характеризуется сложной конфигурацией поровых каналов, вследствие чего фильтрационный поток постоянно отклоняется от основного направления. Это приводит к удлинению действительного пути движения воды, что характеризуется коэффициентом извилистости.

Для учета извилистости в литературных источниках предлагается коэффициент 2,5. Тогда с учетом коэффициента получили

$$R = \sqrt{\frac{20k\mu}{m}}. \quad (6)$$

Коэффициент фильтрации рассчитывали по уравнению

$$k = \frac{v}{i}. \quad (7)$$

где  $v$  – скорость фильтрации;  $i$  – гидравлический уклон,

$$i = \frac{H_n - H_k}{l}. \quad (8)$$

где  $H_n, H_k$  – начальный и конечный фильтрационный напор;  $l$  – толщина отливки.

Пористость рассчитывали по уравнению

$$m = \frac{V_{от} - V}{V_{от}}, \quad (9)$$

где  $V_{от}$  – объем отливки;  $V$  – объем сухого волокна в отливке.

Результаты экспериментов и расчетов представлены в таблице.

Результаты экспериментов для расчета среднего радиуса пор

Давление на отливку ( $P$ ), кПа	Фильтрационный напор, см		Толщина отливки ( $l$ ), мм	Пористость отливки, $m$	Средний радиус пор ( $r$ ), мкм	Коэффициент фильтрации ( $K$ ), $\text{м/с} \cdot 10^{-6}$	Гидравлический уклон ( $i$ )	Скорость фильтрации ( $v$ ), $\text{м/с} \cdot 10^{-7}$
	$H_n$	$H_k$						
4,53	46	31,5	5,18	0,95	64,6	1980	27,99	554000
10,58	46	36,0	3,55	0,92	30,7	432	28,17	122000
19,64	46	39,5	2,75	0,90	12,0	64,9	23,64	15300
38,98	46	41,5	2,15	0,86	5,62	13,6	20,93	2980
82,50	46	42,5	2,00	0,81	2,54	2,61	17,50	630
124,51	46	43,0	1,95	0,78	1,23	0,59	15,42	142
166,21	46	44,0	1,90	0,75	0,93	0,33	13,21	74
205,27	46	44,5	0,85	0,66	0,44	0,065	18,52	12
250,36	46	44,8	0,46	0,46	0,22	0,011	25,87	2,1
410,31	46	45,6	0,44	0,40	0,20	0,008	9,12	0,9

### Обсуждение результатов

На рисунке 2 показано изменение среднего радиуса пор от давления в логарифмических координатах.

Видно, что с увеличением внешнего давления размеры пор уменьшаются. Пропорционально изменению радиуса пор снижается и скорость фильтрации (объем отжатой воды за единицу времени) (рис. 3). Это означает, что в процессе прессования волокна смещаются друг относительно друга. За счет этого крупные поры переходят в более мелкие, разброс пор по размерам снижается, структура бумажного полотна становится более равномерной, плотность отливки растет.

Из рисунка 3Б следует, что при внешнем давлении больше 160 кПа (табл.) кривая объема фильтрата тяготеет к прямолинейной зависимости. Выжимание воды из отливки независимо от внешнего давления становится несущественным. Коэффициент фильтрации по величине приближается к коэффициенту диффузии, и скорость фильтрации становится соизмеримой со скоростью диффузии, вследствие чего с технологической точки зрения процесс прессования при достижении внешнего давления на отливку более 160 кПа становится нерациональным (рис. 3Б).

По мере уменьшения радиуса пор в порах влажного бумажного полотна возникают силы капиллярного давления. Поскольку эти силы обратно пропорциональны размерам пор, капиллярное давление в бумажной отливке растет. Увеличение сил капиллярного давления препятствует отжиму воды из отливки.

На рисунке 4 представлены зависимости изменения радиуса пор от внешнего давления и рассчитанная по уравнению Жюрена (10) зависимость сил капиллярного давления от радиуса пор

$$p = \frac{2\sigma}{r} \cos\varphi, \quad (10)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости, н/м;  $r$  – радиус кривизны поверхности, м;  $\varphi$  – угол смачивания.

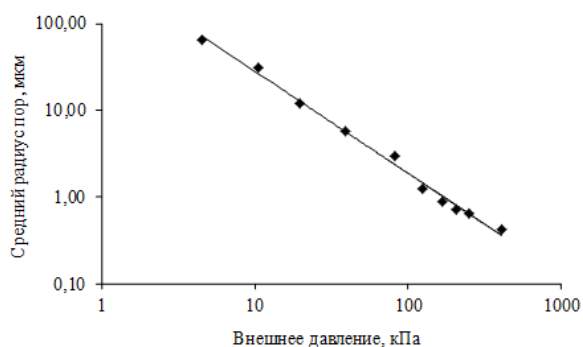


Рис. 2 Изменение среднего радиуса пор от давления

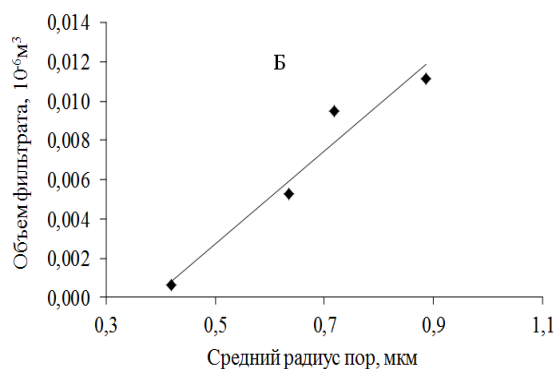
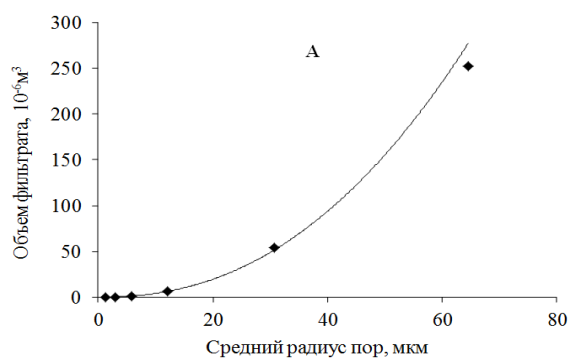


Рис. 3. Зависимость объема фильтрата от среднего радиуса пор

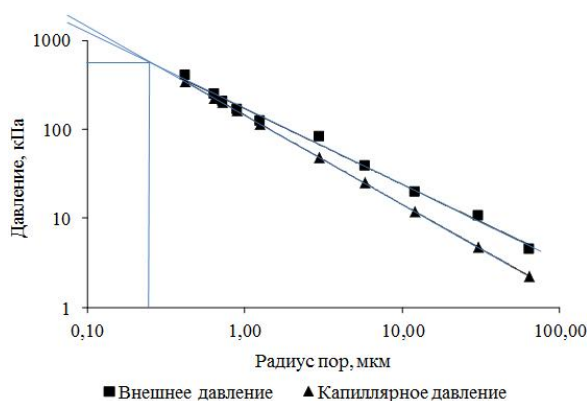


Рис. 4 Зависимость капиллярного давления от радиуса пор

Экстраполируя зависимости, представленные на рисунке 4, до их пересечения можно показать, что при увеличении внешнего давления до 700–800 кПа радиус пор составит величину порядка 0,3–0,4 мкм. При этом силы капиллярного давления станут равны внешнему давлению и при дальнейшем прессовании превысят внешнее давление, и отжим воды из бумажной отливки под действием механического давления полностью прекратится.

### Выводы

1. В процессе прессования бумажного или картонного листа происходит не только обезвоживание полотна, но и формирование его пористой структуры, причем однородность структуры возрастает. Разброс

пор по размерам уменьшается, и, следовательно, усадка бумаги в процессе дальнейшей сушки будет более равномерной.

2. По величине капиллярного давления, возникающего по мере изменения капилляров в бумажном полотне, можно судить о максимально возможных силах внешнего давления, обеспечивающих обезвоживание.

### **Список литературы**

1. Кугушев И.Д. Теория процессов отлива и обезвоживания бумажной массы. М., 1967. 261 с.
2. Бирюков В.И. Исследование условий моделирования процесса листообразования // Сборник трудов Свердловского государственного лесного университета. М., 1967. С. 3-21.
3. Новиков Н.Е. Прессование бумажного полотна. М., 1972. 240 с.

*Поступило в редакцию 13 июля 2013 г.*

*После переработки 14 августа 2014 г.*

*Ageev M.A.\*, Shaklein A.S. STUDYING OF POROUS STRUCTURE OF THE PAPER CLOTH WHEN PRESSING  
Ural State Forestry University, Sibirskii trakt, 37, Ekaterinburg, 620100 (Russia), e-mail: m-ageev@yandex.ru*

In work results of distribution of the sizes of a time of a paper cloth depending on pressure of pressing are received. The received results allow to predict and regulate efficiency of process of dehydration of a paper cloth when pressing.

Keywords: Paper dehydration, pressing, porosity, filtration coefficient, paper structure.

### **References**

1. Kugushev I.D. *Teoriia protsessov otлива i obezvozhvaniia bumazhnoi massy*. [Theory and dehydration processes tide pulp]. Moscow, 1967, 261 p. (in Russ.).
2. Biriukov V.I. *Sbornik trudov Sverdlovskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta pererabotki drevesiny*. [Collection of works of the Sverdlovsk Research Institute of wood processing]. Moscow, 1967, pp. 3–21. (in Russ.).
3. Novikov N.E. *Pressovanie bumazhnogo polotna*. [Pressing a paper web]. Moscow, 1972, 240 p. (in Russ.).

*Received June 13, 2013*

*Revised August 14, 2014*

---

\* Corresponding author.

