

по свойствам к сульфатной целлюлозе. Экологичность кислородно-щелочной варки и возможность оптимизации варочного процесса создают хорошие перспективы для ее использования в промышленности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Abson D., Stockmann E. V. Fundamental properties of soda-oxygen and kraft pulps // Tappi. — 1979. — Vol. 62, N 2. — P. 69—72. [2]. Broderson A. B. et al. Modernized laboratory installation for oxygen-alkali wood delignification. Revolution or evolution. The Environmental Future of the Pulp and Paper Industry // The world pulp and paper Environmental Conference, Leningrad, 16—17 April 1991. — 12 p. [3]. Chang H. M. et al. Some sheet properties of soda-oxygen pulps // Tappi. — 1976. — Vol. 59, N 7. — P. 72—75. [4]. Huang M. I. et al. Diffusion of dissolved oxygen in liquid-saturated Douglas fir sapwood // Wood Science and Technology. — 1977. — N 11. — P. 225—236. [5]. Ivanov Yu. S. et al. Oxygen-alkali pulping of wood chips // Cellulosics: Pulp, fibre and environmental aspects. — New York — London — Toronto: Ellis, Horwood, 1993. — P. 25—29. [6]. Marton R., Leopold B. Oxygen-alkali pulping of conifers // Appita. — 1973. — Vol. 27, N 2. — P. 112—118. [7]. Minor A. G., Sanyer I. Oxygen pulping of shortleaf pine with sodium carbonate // Tappi. — 1975. — Vol. 58, N 3. — P. 116—119. [8]. Outlook of oxygen utilization at pulp cooking / Yu. S. Ivanov, L. O. Ioffe, Yu. P. Vorobiev et al. // Paperi ja puu. — 1991. — N 10. — P. 940—945. [9]. Pulp process is sulfur-, chlorine-free / L. O. Ioffe, Yu. S. Ivanov, Yu. P. Vorobiev et al. // Pulp and Paper International. — 1989, December. — P. 50—52. [10]. Rothenberg S., Robinson D. H., Johnson D. K. Bleaching of oxygen pulps with ozone // Tappi. — 1975. Vol. 58, N 8. — P. 182—185. [11]. Rydholm S. Pulping processes. — New York — London — Sydney: Interscience, 1962. — P. 1269. [12]. Seth R. S., Page D. H. Fiber properties and tearing resistance // Int. pap. phys. conference. — Quebec, 1987. — Vol. 1. — P. 9—16.

Поступила 12 августа 1994 г.

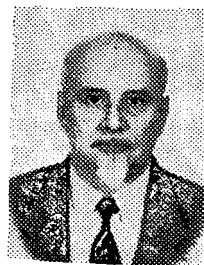
УДК 676.017

А. К. ВЕРЕТНОВ, А. В. БЫВШЕВ, И. М. КОЛЬЦОВА

Веретнов Анатолий Константинович родился в 1942 г., кандидат технических наук, старший научный сотрудник проблемной лаборатории Сибирского технологического института. Имеет 31 печатную работу в области физико-химической механики диспергирования волокнистых материалов, техники и технологии размола.



Бывшей Анатолий Викторович родился в 1933 г., окончил в 1958 г. Красноярский лесотехнический институт, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой целлюлозно-бумажного производства Сибирского технологического института, заслуженный изобретатель Российской Федерации. Имеет 115 научных трудов в области механических видов воздействия на различные материалы, создания механизмов воздействия при производстве полуфабрикатов сверхвысокого выхода с использованием пульсации.





Кольцова Ирина Михайловна родилась в 1940 г., окончила в 1963 г. Сибирский технологический институт, научный сотрудник проблемной лаборатории на кафедре целлюлозно-бумажного производства Сибирского технологического института. Имеет 12 печатных работ в области физики и химии целлюлозы.

## СТРОЕНИЕ ВОЛОКНИСТОЙ СТРУКТУРЫ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ СУСПЕНЗИЙ

Выявлено четыре периода в формировании волокнистой структуры: первый — бесструктурный, когда волокна свободно взвешены в жидкости; второй — связанный с образованием пространственного каркаса и приобретением системой свойств бингамовского пластика; третий — переходный от однородной структуры к неоднородной, комкообразной; четвертый — с четко выраженной флокулярной структурой.

Four periods of fibrous structure formation have been revealed: first - structureless when fibres are freely suspended in liquid; second - related to forming a spacial shell acquiring a system of Bingham plastic properties; third - transferable from homogeneous structure to heterogeneous, clumpy; fourth - with particularly pronounced floccular structure.

Основные процессы бумажного производства связаны с перемещениями водно-волокнистых суспензий с широким диапазоном концентраций, начиная от минимальных, близких к нулю, до предельных, когда система теряет свою текучесть. Водные суспензии целлюлозы можно отнести к вязкопластичным бингамовским жидкостям [1, 2], отличающимся структурной вязкостью и предельным напряжением сдвига [3, 5]. Кроме этого, суспензии обладают такими свойствами реологически нестационарных жидкостей, как тиксотропия и реопексия [2, 7].

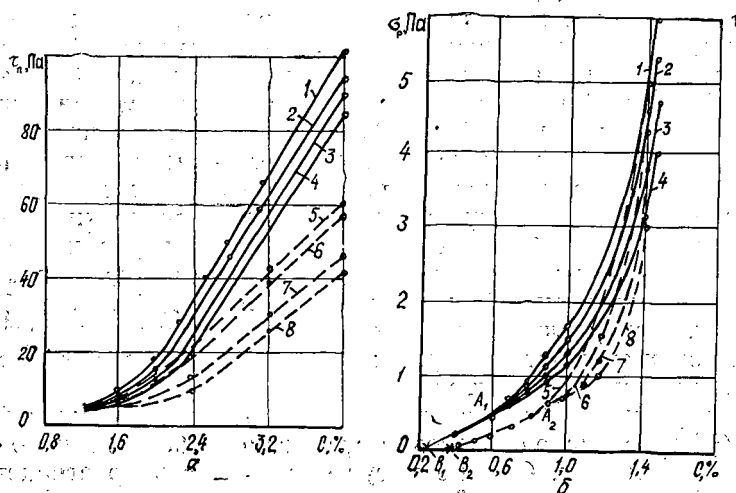
Реологические характеристики волокнистых суспензий следует учитывать и использовать при разработке техники перемешивания, размола, очистки и отлива бумажной массы. Бингамовский характер текучести волокнистых суспензий объясняется тем, что начиная с некоторой концентрации образуется пространственная внутренняя структура, состоящая из отдельных волокон и упруго сопротивляющаяся внешним усилиям до тех пор, пока напряжение сдвига не достигает некоторого предельного значения. Если напряжение превышает предельное, то структура претерпевает разрушение, а система приобретает текучесть, которая в отличие от ньютоновских жидкостей характеризуется величиной структурной или пластической вязкости. Из реологического уравнения бингамовской жидкости

$$\tau = \eta \dot{\gamma} - \tau_n, \quad (1)$$

где  $\tau$  — напряжение сдвига;  
 $\eta$  — пластическая вязкость;  
 $\dot{\gamma}$  — градиент скорости;  
 $\tau_n$  — предельное напряжение сдвига,

следует, что измеряя предельное напряжение сдвига, можно оценить прочность волокнистого каркаса целлюлозной суспензии и характер взаимодействия между волокнами.

Для определения предельного напряжения сдвига суспензий беле-ной сульфатной целлюлозы из древесины лиственницы и березы был использован ротационный вискозиметр «Реотест РV», снабженный гребенчатым ротором, обеспечивающим сцепление волокнистой массы с измерительной поверхностью. Целлюлозу размалывали в лабораторном ролле до 20; 40; 60 и 80 °ШР. Методика работы с ротационным вискозиметром позволяет проводить реологические измерения предельных напряжений сдвига целлюлозных суспензий с концентрациями от 1,0 до 4,5 %. Результаты измерений представлены на рисунке а.



Предельное напряжение сдвига (а) и напряжение разрыва (б) волокнистых суспензий сульфатной беле-ной целлюлозы ХБ-3 из древесины лиственницы (1—4) и ЛБ-0 из древесины березы (5—8) при различной степени помола: 1—21 °ШР; 2—42; 3—69; 4—81; 5—22; 6—36; 7—64; 8—78 °ШР

Полученные зависимости предельного напряжения сдвига от концентрации суспензии  $C$  (рисунок а) типичны для бингамовских жидкостей [6, 7]. Они линейны и начинают искривляться только вблизи оси концентрации. Значения предельного напряжения сдвига лиственничной целлюлозы примерно в два раза больше лиственничной, поскольку длинные толстостенные волокна лиственничной целлюлозы образуют более прочный каркас по сравнению с коротковолокнистой лиственничной целлюлозой. При увеличении степени помола происходит укорочение волокон, прочность каркаса целлюлозной суспензии снижается. Вследствие снижения концентрации происходит сближение графиков зависимости  $\tau_n = f(C)$ . При экстраполяции они должны пересечься на оси концентраций в точке, где  $\tau_n = 0$ . Эта точка соответствует критической концентрации  $C_k$ , начиная с которой в волокнистой суспензии образуется устойчивый внутренний пространственный каркас, способный упруго сопротивляться внешним напряжениям, не превышающим по величине  $\tau_n$ . При более низких концентрациях волокна остаются свободно взвешенными в воде. Низкая чувствительность ротационного вискозиметра при  $C < 1$  % не позволяет определить величину критической концентрации. Для оценки прочности суспензий при низких концентрациях был использован гидравлический динамометр, конструкция которого разработана ВНПОбумпром совместно с Калининским политехническим институтом [4]. Динамометр позволяет определять напряжение разрыва  $\sigma_p$  структуры суспензий целлюлозы в диапазоне концентраций от 0,2 до 1,4 %.

На рисунке б приведены зависимости напряжения разрыва волокнистой структуры суспензии от концентрации. Как и для предельного напряжения сдвига (см. рисунок а), при снижении концентрации происходит сближение графиков зависимости  $\sigma_p = f(C)$ . Для лиственничной ( $C = 0,6\%$ ) и лиственной ( $C = 0,9\%$ ) целлюлозы линии сходятся в точке А и сливаются в одну прямую, которая пересекает ось концентраций в точке В, где напряжение разрыва волокнистого каркаса равняется нулю. Положение точки В и соответствующее ей значение  $C_k$  не зависит от степени помола, а определяется видом целлюлозы; для лиственничной  $C_k = 0,21\%$ , для лиственной  $C_k = 0,36\%$ .

Таким образом, в ходе зависимостей прочности структуры от концентрации целлюлозной суспензии наблюдается два линейных участка: один существует при низких концентрациях от точки В до точки А (рисунок б), другой начинается вслед за переходным криволинейным участком при концентрациях более 2,0...2,5% (см. рисунок а). Наличие линейных участков, по-видимому, зависит от характера связи волокон между собой в сетке каркаса. Если на первом участке, при низких концентрациях, эта связь осуществляется через прослойки воды, то на втором участке, когда большое количество волокон в единице объема приводит к упругому их сжатию, связь реализуется через прямые контакты между волокнами. На переходном участке действуют оба механизма связи. При увеличении степени помола, когда возрастает гибкость волокон и снижается их упругость, переходный участок смещается в сторону высоких концентраций.

Из полученных данных следует, что при малых концентрациях (участок ОА на рисунке б) волокна суспензии свободны и находятся во взвешенном состоянии. Они не могут образовывать пространственный структурный каркас, который появляется, начиная с  $C_k$ . На участке ВА каркас довольно разряженный, волокна в нем слабо связаны между собой через прослойки воды. Эта структура достаточно однородна и легко разрушается внешними гидродинамическими нагрузками. По мере роста концентрации от точки А в структуре появляются упруго сжатые волокна. На этом криволинейном переходном участке однородная структура суспензии начинает разделяться на отдельные комкообразные элементы — флокены. Этот процесс завершается при переходе ко второму линейному участку. Дальнейший рост концентрации приводит только к уплотнению флоконов, увеличению трения между ними при движении суспензии. Суспензия теряет свою текучесть, когда упругое сжатие волокон в структуре делает силы межфлокулярного взаимодействия равными силам внутрифлокулярных связей.

Полученные результаты позволяют проследить изменение прочностных показателей водно-волокнистых суспензий целлюлозы в широком диапазоне концентраций и приводят к выводу, что в текущем состоянии системы целлюлоза — вода можно выделить четыре периода. Первый — при концентрации ниже критической ( $C < C_k$ ), когда волокна взвешены в жидкости и не образуют устойчивого каркаса. Их взаимодействие в потоке слабо сказывается на вязкости суспензии, оценить которую можно уравнением [3]

$$\mu_c = \mu_{ж}(1 + a\varphi), \quad (2)$$

где  $\mu_{ж}$  — вязкость жидкости;  
 $a$  — коэффициент, зависящий от формы частиц;  
 $\varphi$  — объемная концентрация.

Второй период (участок ВА на рисунке б) связан с образованием устойчивого волокнистого каркаса с относительно слабыми связями между волокнами. Структура суспензий здесь однородна и легко де-