

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

УДК 676.1.026 : 532

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА МАССОПОДАЧИ
НА БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНУЮ МАШИНУ

О. А. ТЕРЕНТЬЕВ, В. С. КУРОВ, Э. А. СМЕРНОВА

Технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности
(г. Санкт-Петербург)

Особенность бумажной массы при подаче на бумагоделательную машину (БДМ) — относительно низкая концентрация (до 15 г/л). По тракту массоподачи масса движется со скоростью до 5 м/с, т. е. практически в переходном режиме. Поскольку массоподводящая система представляет собой ряд последовательно расположенных аппаратов, которые соединены трубопроводными коммуникациями и имеют проточные каналы различных размеров и конфигураций, то при движении по ним бумажная масса претерпевает глубокие структурные изменения. Последним элементом массоподводящей системы является напорный ящик, где происходит организация напуска бумажной массы на сеточный стол БДМ в диспергированном режиме. Диспергирование достигается созданием высокой степени турбулентности, генерируемой специальными устройствами различных конструкций. Турбулентность — это пульсационное движение, сопровождающееся изменениями давления и скорости, причем низкочастотные пульсации давления вызывают колебания массы 1 м² бумаги, а высокочастотные способствуют диспергированию бумажной массы.

Таким образом, указанные технологические особенности процесса массоподачи могут быть успешно реализованы только с применением законов внутреннего структурообразования при движении потока, т. е. на основе реологических характеристик бумажной массы.

Волокнистые суспензии ЦБП, представляющие собой сложные полидисперсные системы и образующие в пространстве трехмерный волокнистый каркас, в процессе перехода от структурированного режима к диспергированному претерпевают изменения структурного состояния.

Закономерности структурообразования волокнистых суспензий отражаются в общем виде реологической моделью и предложенным уравнением [3]. Обзор последних разработок в этой области приведен в работе [5].

Однако до настоящего времени нет реологической модели, в полной мере отражающей все многообразие структурных и энергетических изменений волокнистых суспензий при ламинарном и турбулентном движении, включая слоистое течение с наличием трения водяной прослойки о стенку канала и волокнистую структуру.

В отличие от предложенных ранее моделей [5] и реологических уравнений формула для определения касательных напряжений τ включает два положительных экспоненциальных члена ($A_1' e^{-\alpha_1 \dot{\gamma}}$ и $A_1'' e^{-\alpha_1' \dot{\gamma}}$):

$$\tau = (A_1' + A_1'') e^{-\alpha_1 \dot{\gamma}} + A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}} + \mu \dot{\gamma}, \quad (1)$$

где A_1' и A_1'' — напряжения трения водяной прослойки о стенку канала и волокнистую структуру;

A_2 — напряжения внутренней прочности структуры;

α_1, α_2 — факторы времени, характеризующие длительность существования структурированного состояния в потоке;

$\dot{\gamma}$ — градиент скорости сдвига в потоке волокнистой суспензии;

μ — динамическая вязкость диспергированного течения.

В данной модели существенное внимание обращено на образование пристенного слоя и наличие слоистого течения, которое характеризуется компонентами $A_1' e^{-\alpha_1 \dot{\gamma}}$ и $A_1'' e^{-\alpha_1 \dot{\gamma}}$. С увеличением скорости сдвига экспоненциальные члены, отражающие аномальную часть реологической характеристики, асимптотически приближаются к оси абсцисс и наступление диспергированного режима течения сопровождается выходом реологической кривой на прямую линию, которая при дальнейшем возрастании скорости заменяется параболическим участком, свидетельствующим о развитии турбулентного режима [4].

Реологическое уравнение с учетом турбулентного участка реологической кривой представляется следующим образом [4]:

$$\tau_{xy} = \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \dot{\gamma}} + (\mu + \mu_T) \dot{\gamma}, \quad (2)$$

где τ_{xy} — касательное напряжение;

A_k, α_k — коэффициенты реологического уравнения;

μ_T — динамическая турбулентная вязкость в диспергированном потоке.

Член уравнения $\sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \dot{\gamma}}$ характеризует аномальный участок реологической кривой, отражающий значительные структурные изменения в суспензии.

На основании формулы (1), учитывающей трение водяной прослойки о стенку канала и волокнистую структуру, уравнение (2) запишем как

$$\tau = (A_1' + A_1'') e^{-\alpha_1 \dot{\gamma}} + A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}} + (\mu + \mu_T) \dot{\gamma}. \quad (3)$$

В ранее разработанных моделях [3, 5] особое внимание обращалось на неоднородную прочность волокнистой структуры, состоящей из флокул и стержня и характеризующейся отрицательными экспоненциальными членами $A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}}$ и $A_3 e^{-\alpha_3 \dot{\gamma}}$.

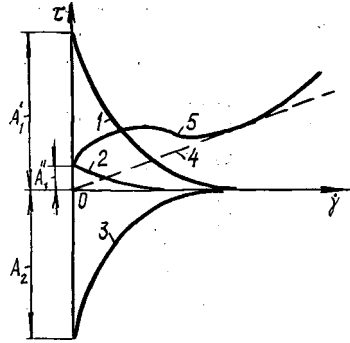
В предлагаемой реологической модели бумажной массы, соответствующей уравнению (3), трение волокнистой структуры о стенку канала разделяется на трение водяной прослойки о стенку канала и волокнистую структуру. Причем, так как в этих слоях содержатся различные по масштабам единицы течения, есть основание вместо одного времени релаксации α_1 ввести два: α_1' и α_3 . Тогда уравнение (3) принимает следующий вид:

$$\tau = (A_1' e^{-\alpha_1' \dot{\gamma}} - A_1'' e^{-\alpha_3 \dot{\gamma}}) + A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}} + (\mu + \mu_T) \dot{\gamma}. \quad (4)$$

На рис. 1 данное теоретическое уравнение изображено графически.

Выбор реологической модели бумажной массы в значительной степени зависит от свойств волокнистой структуры. Например, коротковолокнистая масса, полученная в условиях режущего размола, является более однородной по сравнению с длиноволокнистой, легче обезвоживается. Поэтому можно не выделять отдельно внутреннюю прочность стержня и прочность флокул, которые характеризуются экспоненциальными членами $A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}}$ и $A_3 e^{-\alpha_3 \dot{\gamma}}$ [5], а заменить их экспоненциаль-

Рис. 1. Графическое представление теоретического уравнения; 1 — $-A_1' e^{-\alpha_1' \dot{\gamma}}$; 2 — $-A_1'' e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}}$; 3 — $-A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}}$; 4 — $\mu \dot{\gamma}$; 5 — $\mu_T \dot{\gamma}$



ным членом $A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}}$, определяющим внутреннюю прочность волокнистой структуры в соответствии с уравнением (4).

Реологическая характеристика в таком случае представляет собой либо монотонно возрастающую кривую, либо линию с небольшим первым максимумом. (Значение первого максимума реологической кривой чаще соответствует длиноволокнистой структуре.)

Таким образом, уравнение (4) наиболее точно отражает изменения волокнистой структуры в ламинизированном и турбулентном режимах с учетом трения водяной прослойки о стенку канала и волокнистую структуру.

Уравнение (4) можно записать как

$$\tau = (A_1' e^{-\alpha_1' \dot{\gamma}} + A_1'' e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}} + A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}} + \mu \dot{\gamma}) + \mu_T \dot{\gamma}. \quad (5)$$

В этом уравнении коэффициент турбулентной вязкости определяется непосредственно из реологической кривой [4].

Часть уравнения (5) $(A_1' e^{-\alpha_1' \dot{\gamma}} + A_1'' e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}} + A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}} + \mu \dot{\gamma})$, характеризующая аномальные свойства бумажной массы и значительные изменения волокнистого каркаса, может быть решена также, как известное реологическое уравнение волокнистых суспензий повышенной концентрации, т. е. с помощью методики определения коэффициентов реологического уравнения [2].

В нашем случае использовано положительное значение коэффициента A_3 , полученное с применением указанной методики.

В качестве примера приведено аналитическое выражение для реологической характеристики суспензии небеленой сульфатной целлюлозы концентрацией 15 г/л при степени помола 72 °ШР (рис. 2, кривая 2).

Для выполнения расчета выбраны следующие параметры: динамическая вязкость диспергированного потока $\mu = 0,1493 \text{ Па} \cdot \text{с}$; координаты точки максимума $\tau_{\max} = 32,8 \text{ Па}$, $\dot{\gamma}_{\max} = 80 \text{ с}^{-1}$; координаты точки минимума $\tau_{\min} = 32,4 \text{ Па}$, $\dot{\gamma}_{\min} = 125 \text{ с}^{-1}$; первоначальное напряжение сдвига $\tau_0 = 9 \text{ Па}$. Выбраны коэффициенты $\alpha_1' = 0,0105 \text{ с}$; $\alpha_2 = 0,043 \text{ с}$; $\alpha_3 = 0,055 \text{ с}$.

В результате получено реологическое уравнение

$$\tau = 51,89 e^{-0,0105 \dot{\gamma}} + 8,71 e^{-0,055 \dot{\gamma}} - 51,60 e^{-0,043 \dot{\gamma}} + 0,1403 \dot{\gamma}. \quad (6)$$

Как следует из рис. 2, расчетная кривая 1 хорошо описывает экспериментальную реологическую характеристику. Корреляционное отношение $\Theta = 0,968$, т. е. близко к единице, что свидетельствует о достаточной точности расчета.

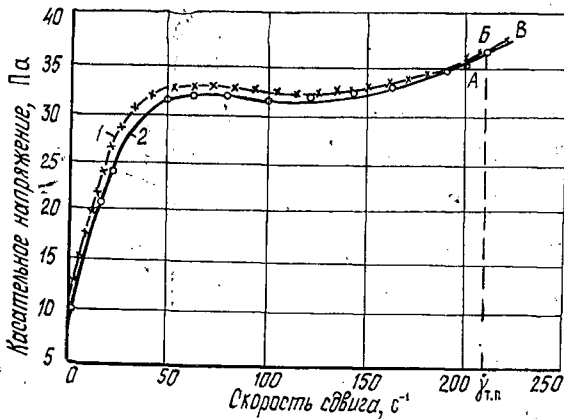


Рис. 2. Реологическая характеристика суспензии небеленой сульфатной целлюлозы: 1 — расчет; 2 — эксперимент

Анализ уравнения (6) показывает, что трение водяной прослойки о стенку канала (член $51,89 e^{-0,0105\dot{\gamma}}$) значительно больше, чем о волоконистую структуру ($8,71 e^{-0,055\dot{\gamma}}$). Действительно, экспериментальная реологическая характеристика (кривая 2) построена на основании результатов, полученных в вискозиметре с шероховатыми измерительными поверхностями [1], где имеет место значительное трение о стенки. Характеристика имеет участок развития турбулентного течения АВ ввиду достаточно высокой концентрации массы (15 г/л). Поэтому в конечной точке В динамическая турбулентная вязкость незначительна: $\mu_{т.кон} = 0,00454 \text{ Па} \cdot \text{с}$. Воспользуемся ранее разработанной методикой определения турбулентной вязкости с помощью коэффициента β [4]:

$$\beta = \frac{\mu_{т.кон} - \mu_{т.п}}{\dot{\gamma}_{т.кон} - \dot{\gamma}_{т.п}}, \quad (7)$$

где $\mu_{т.кон}$, $\dot{\gamma}_{т.кон}$ — координаты какой-либо конечной точки, $\dot{\gamma}_{т.кон} = 220 \text{ с}^{-1}$;

$\mu_{т.п}$, $\dot{\gamma}_{т.п}$ — турбулентная вязкость и скорость сдвига в точке перегиба Б; $\mu_{т.п} = 0,00243 \text{ Па} \cdot \text{с}$, $\dot{\gamma}_{т.п} = 210 \text{ с}^{-1}$.

Тогда $\beta = 0,000211$.

Рассчитаем реологическое уравнение для кривой 2 с учетом турбулентного участка [4]:

$$\tau = 51,89 e^{-0,0105\dot{\gamma}} + 8,71 e^{-0,055\dot{\gamma}} - 51,60 e^{-0,043\dot{\gamma}} + [0,1493 + 0,000211(\dot{\gamma} - 210)] \dot{\gamma}. \quad (8)$$

Таким образом, предложена и подтверждена экспериментально модель, характеризующая глубокие структурные изменения в потоке бумажной массы при подаче на бумагоделательную машину. Предложенные теоретические зависимости позволяют учитывать деформационные процессы в суспензии бумажной массы при ее движении в проточных каналах гидравлического оборудования и соединяющих его трубопроводных коммуникациях массоподводящей системы в целях обеспечения технологически необходимой внутренней структуры потока непосредственно при массоподаче и напуске. Это дает возможность уменьшить колебания массы 1 м^2 бумаги и повысить равномерность распределения волокна в формируемом бумажном потоке.