

Научная статья
УДК 676.2.026.1

ОБЗОР РЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ БУМАЖНОЙ МАССЫ

**Александр Сергеевич Малых¹, Сергей Николаевич Исаков²,
Валерий Павлович Сиваков³**

^{1, 2, 3} Уральский государственный лесотехнический университет,
Екатеринбург, Россия

¹ malykhas@m.usfeu.ru

² isakovsn@m.usfeu.ru

³ sivakovvp@m.usfeu.ru

Аннотация. В статье представлен обзор реологических свойств бумажной массы для низких и высоких концентраций. Рассмотрено влияние на производительность насоса содержание воздуха различной концентрации. Описано реологическое уравнение для бумажной массы низкой концентрации.

Ключевые слова: бумажная масса, реология, концентрация

Для цитирования: Малых А. С., Исаков С. Н., Сиваков В. П. Обзор реологических моделей бумажной массы // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России = Scientific creativity of youth to the forest complex of Russia : материалы XXI Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов. Екатеринбург : УГЛТУ, 2025. С. 582–587.

Original article

REVIEW OF RHEOLOGICAL MODELS OF PAPER PULP

Alexander S. Malykh¹, Sergey N. Isakov², Valery P. Sivakov³

^{1, 2, 3} Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russia

¹ malykhas@m.usfeu.ru

² isakovsn@m.usfeu.ru

³ sivakovvp@m.usfeu.ru

Abstract. This article provides an overview of the rheological properties of paper pulp for low and high concentrations. The influence of air content of various concentrations on pump performance is considered. The rheological equation for low concentration paper pulp is described.

Keywords: paper pulp, rheology, concentration.

For citation: Malykh A. S., Isakov S. N., Sivakov V. P. (2025) Obzor reologicheskikh modelej bumazhnoj massy [Review of rheological models paper pulp]. Nauchnoe tvorchestvo omolodezhi – lesnomu kompleksu Rossii [Scientific creativity of youth to the forest complex of Russia] : proceedings of the XXI All-Russian (national) Scientific and Technical Conference of undergraduate and postgraduate students. Ekaterinburg : USFEU, 2025. Pp. 582–587. (In Russ).

Для проектирования технологического оборудования важно знать характеристики среды, с которой работает данное оборудование: насосы, очистители, сортировки, деаэраторы, рафинеры и т. д. Одна из ключевых характеристик – реология. Реология изучает все виды деформаций или течения различных веществ, она объединяет законы гидравлики, теории упругости и пластичности [1].

Исследовались зависимости КПД и потерь напора древесной массы (разных концентраций) при различных подачах (рис. 1). Описано влияние газосодержания на характеристику центробежного насоса (рис. 2).

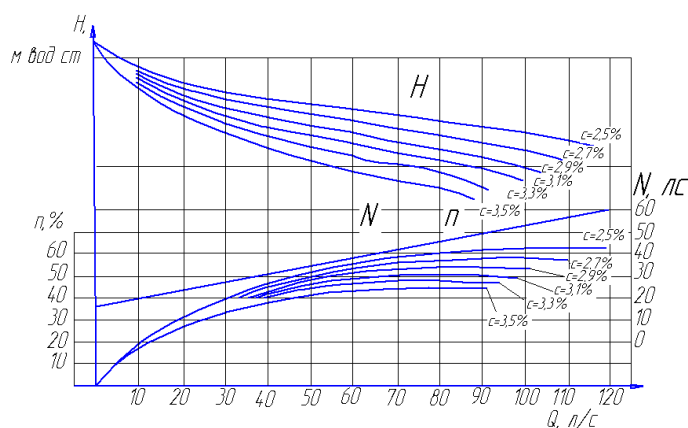


Рис. 1. Характеристика насоса при перекачивании массы различной концентрации

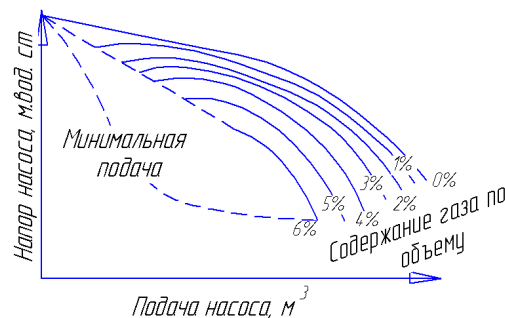


Рис. 2. Характеристика центробежного насоса при различном содержании газа (от 0 до 6 %)

Терентьев О. А. [2] сопоставил реологические характеристики для волокнистой суспензии низкой (1) и повышенной концентрации (2), эта зависимость представлена на рис. 3. Напор (H), создаваемый насосом, его КПД (η) и мощность (N) зависят от производительности насоса. В работе [3] исследованы характеристики водоволокнистой суспензии концентрацией от 0,04 до 2 % (рис. 4).

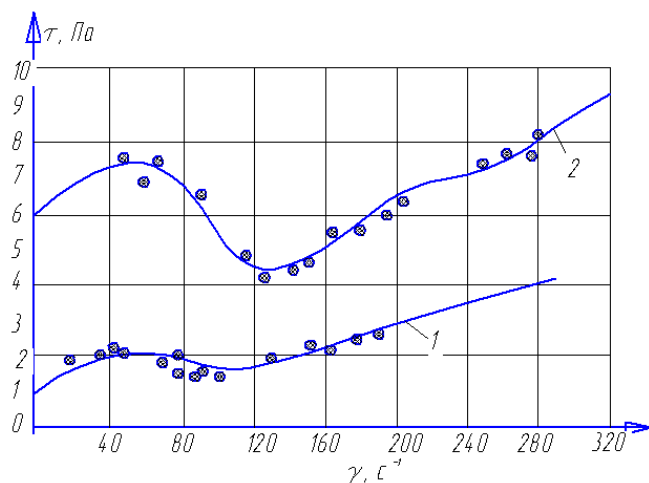


Рис. 3. Реологические характеристики для волокнистой суспензии низкой (1) и повышенной концентрации (2)

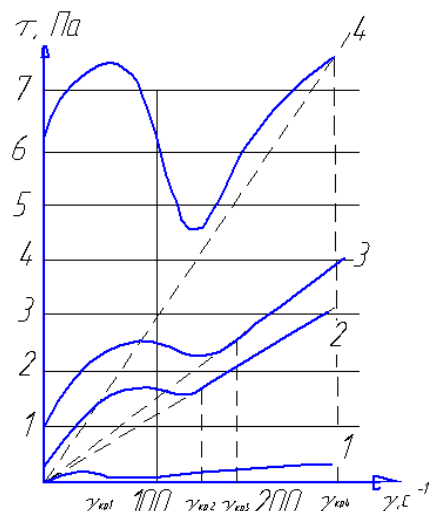


Рис. 4. Экспериментальные реологические характеристики водоволокнистых суспензий:
1 – 0,04 %; 2 – 0,8 %;
3 – 1 % ; 4 – 2 %

Особенность бумажной массы в том, что ее реология изменяется в зависимости от концентрации, т. е. содержания волокна вещества в единице массы суспензии. Бумажная масса по мере обезвоживания проходит через следующие реологические состояния: вязкое (В), вязкопластичное (ВП), вязкопластичное упругое (ВПУ), пластически вязкое упругое (ПВУ), пластически упругое вязкое (ПУВ), пластически упругое (ПУ), упругопластическое (УП) [4]. Разделяют массы суспензий низкой концентрации (до 5%) и высокой (до 7–16 %). В выше приведенной классификации к нам подходят состояния от ВП до ПВУ и они описаны в табл. 1.

Таблица 1

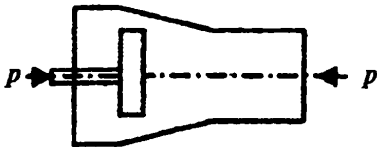
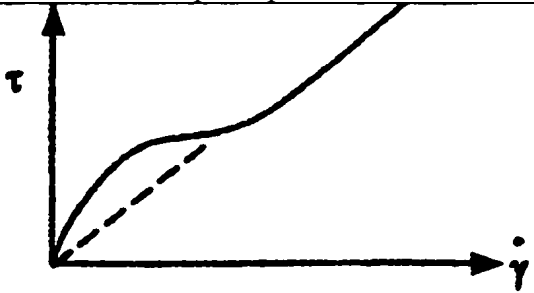
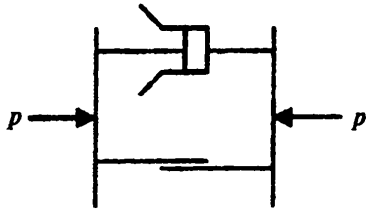
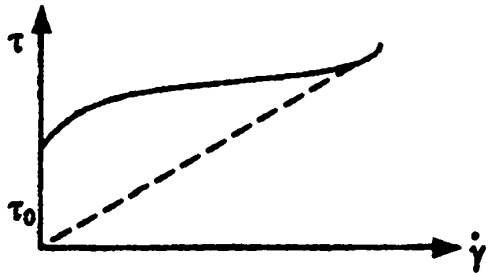
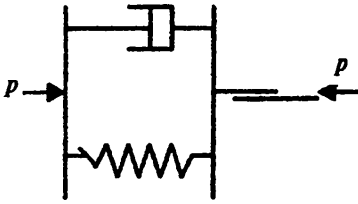
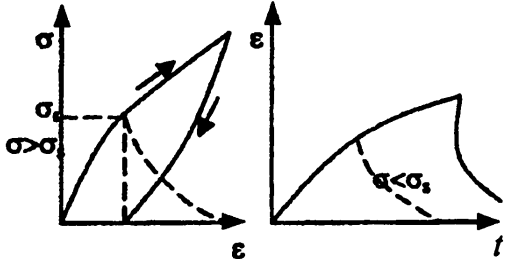
Описание реологических состояний для концентрации до 20 %

Стадия обезвоживания	Фазное состояние	Вид свойств	Концентрация, %	Способ обезвоживания	Части машины
Водоволокнистая суспензия	Жидкость	В	≤ 1	Гидростатическое давление и слабое разряжение	Напорный ящик и регистровая часть
Сгущенная бумажная масса (осевший слой)	Переходные состояния от жидкого к твердому телу	ВП	1–7	Разряжение	Регистровая часть и отсасывающие ящики
		ВПУ	7–20	Разряжение и механическое давление	Отсасывающий вал и прессовая часть

Механические реологические модели бумажной массы [1] представлены в табл. 2, а также представлены их характеристики зависимостей для В и ВП – касательных напряжений (τ) от градиента скорости ($\dot{\gamma}$). Для ВПУ – напряжения в бумажной массе (σ) от деформации (ε) и времени деформации (t), с переходом через напряжения пластических деформаций (σ_s).

Таблица 2

Модели реологических состояний для концентрации до 20 %

Состояние	Модель	Характеристика
Вязкое (В)		
Вязкопластическое (ВП)		
Вязкопластическое упругое (ВПУ)		

Реологические характеристики водно-волоконистых суспензий исследованы в [4]. В данной работе наряду с изучением основного процесса аномалии вязкости водно-волоконистых суспензий показано, что с увеличением концентрации суспензии значительно возрастает напряжение сдвига (рис. 5). Закономерности возрастания напряжения сдвига в зависимости от концентрации бумажной массы авторами не исследовано, так как не связано с темой статьи.

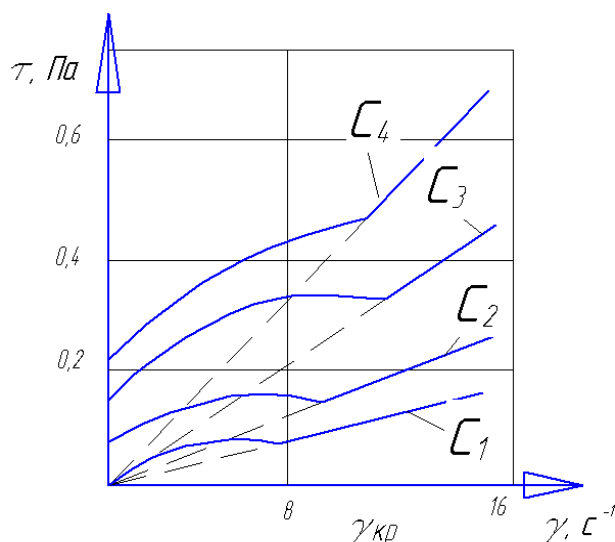


Рис. 5. Зависимость напряжения сдвига бумажной массы от концентрации ($C_1 < C_2 < C_3 < C_4$)

Реологическое уравнение [5] для низкой концентрации бумажной массы при ее турбулентном движении, представлено ниже

$$\tau_{ij} = A_1' I^{-\alpha_1 \cdot \dot{\gamma}_{ij}} + A_1'' I^{-\alpha_3 \cdot \dot{\gamma}_{ij}} + A_2 I^{-\alpha_2 \cdot \dot{\gamma}_{ij}} + (\mu + \mu_T) \dot{\gamma}_{ij}, \text{ Па}$$

где A_1' , A_2'' , A_2 – коэффициенты реологического уравнения, зависящие от трения водяной прослойки о стенки канала и структуру, а также зависящие от вязкости;

α_1 , α_2 , α_3 – временные факторы структурных изменений;

μ – коэффициент динамический вязкости в диспергированном режиме, $\text{Па} \cdot \text{с}$;

μ_T – коэффициент динамический турбулентной вязкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$;

$\dot{\gamma}_{ij}$ – скорость сдвига, с .

Вопросы напряжений сдвига, времени обработки, суспензии давлением и концентрации суспензии при разработке методов расчета насосов для перекачки бумажной массы недостаточно изучены. Известно, что с увеличением концентрации бумажной массы резко снижается расход воды и размеры технологического оборудования (насосов, бассейнов и др.) и трубопроводов. По указанным причинам исследование процессов транспортирования насосами бумажной массы при повышенных концентрациях (7–16 %) представляется актуальным. Работы по данному направлению проводятся в УГЛТУ.

Список источников

1. Климов В. И. Гидротранспорт волокнистых материалов в целлюлозно-бумажном производстве. М. : Лесн. пром-сть, 1971, 280 с.
2. Терентьев О. А. Гидродинамика волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве. М. : Лесн. пром-ть, 1980. 248 с.
3. Терентьев О. А. Массоподача и равномерность бумажного полотна. М. : Лесн. пром-сть, 1986. 264 с.
4. Теория и конструкция машин и оборудования отрасли. Бумаго- и картоноделательные машины : учебное пособие ; под ред. В. С. Курова, Н. Н. Кокушина. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 588 с.
5. Куров В. С., Тихонов Ю. А. Гидродинамика процессов массоподачи на бумагоделательную машины. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 264 с.