

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики
Кафедра процессов и аппаратов химической технологии**

ГИДРОДИНАМИКА ВОЛОКНИСТЫХ СУСПЕНЗИЙ

Выполнение контрольной работы

Методические указания для студентов заочной формы обучения
по направлению подготовки
15.03.02 — Технологические машины и оборудование

Составитель
Ю. А. Тотухов

Санкт-Петербург
2023

Утверждено
на заседании кафедры ПиАХТ
28.10.2022 г., протокол № 2

Рецензент Н. П. Мидуков

Методические указания соответствуют программе и учебному плану дисциплины «Гидродинамика волокнистых суспензий» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование». В методических указаниях представлен порядок выполнения и оформления контрольной работы.

Методические указания предназначены для бакалавров и магистров заочной формы обучения.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД
в качестве методических указаний

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 28.03.2023 г. Рег.№ 5081/22

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Рекомендации по выполнению контрольной работы.....	6
Рекомендации по оформлению контрольной работы	8
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	10
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	11
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	13

ВВЕДЕНИЕ

Контрольная работа содержит одно задание, выполнение которого побуждает студентов осмыслить информацию по реологии неньютоновских сред и освоить знания в области гидродинамики волокнистых суспензий.

При проектировании и эксплуатации оборудования целлюлозно-бумажной промышленности важной является проблема оценки потерь энергии потоком, которая обусловлена состоянием структуры волокнистой суспензии.

В контрольной работе используются экспериментальные реологические характеристики волокнистых суспензий. Эти суспензии, как правило, составляют основу композиции разных видов бумаги. Реологические характеристики даны в Приложении 2 в графическом виде, который является наиболее наглядным для анализа, но требует определенных навыков в работе с ними.

Данные индивидуальных заданий представлены в Приложении 1. Для выполнения используются задания I и II. Варианты заданий студенты получают в установочной лекции.

В этих методических указаниях изложены в качестве дополнения методы анализа и оценки состояния волокнистой суспензии.

Выполнение контрольной работы закрепляет знания по реологии неньютоновских сред и гидродинамике волокнистых суспензий.

Расчеты необходимо сопровождать анализом, пояснениями, необходимыми рисунками и ссылками на использованные источники.

Перед выполнением задачи контрольной работы необходимо изучить теоретический материал в разделе 2.2 и 3.1, 3.2, 3.3 и 3.4 монографии [1, стр. 63-70 и стр. 98-107, 107-111, 112-118 и 118-123].

Отчет контрольной работы должен содержать четыре раздела: 1. Формулировка задачи. 2. Расчетная схема, методика расчета. 3. Результаты расчета, анализ. 4. Выводы и рекомендации.

Задание контрольной работы содержит два пункта: 1. Построить эпюру (поле) скоростей в сечении 1-1 канала, изображенного на рисунке, используя реологическое уравнение волокнистой суспензии [1], реологическую характеристику (Приложение 2) и формулы расчет скорости потока в сечении канала [1]. 2. Оценить состояние потока в канале по виду поля скоростей.

Формулировка задачи – это этап выявления всех проблем, которые необходимо преодолеть, решая поставленную задачу. Из механики жидкости и газа известно, что режимам движения жидкости соответствуют поля скоростей: ламинарному – параболическое, турбулентному – логарифмическое. Следовательно, по виду поля скоростей потока можно судить о режиме движения.

Волокнистая суспензия содержит два основных компонента: воду и древесные волокна. Древесные волокна в присутствии воды способны

образовывать структуру, которая трансформируется с увеличением скорости потока [1].

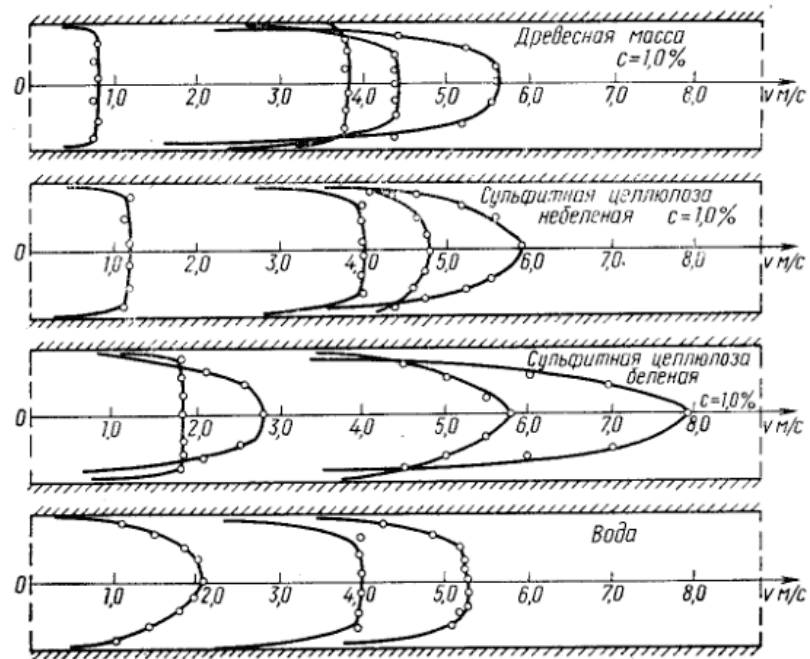


Рис. 1. Результаты экспериментальных измерений полей скоростей

Рисунок 1 показывает динамику изменения поля скоростей в канале круглого сечения для суспензий разных волокон в сопоставлении с водой. Видно, что поле скоростей волокнистых суспензий трансформируется от равноскоростного до параболического. В гидродинамике волокнистых суспензий принято режимы движения подразделять на структурированный, переходный и диспергированный. Структурированному режиму соответствует равноскоростное поле скоростей, переходному – частично равноскоростное, а диспергированному – параболическое.

Рисунок 1 нужно использовать для ответа на второй вопрос задания о соответствии построенного теоретического поля скоростей режиму движения суспензии.

Расчетную схему канала копируем из Приложения 1.

а) для задания I

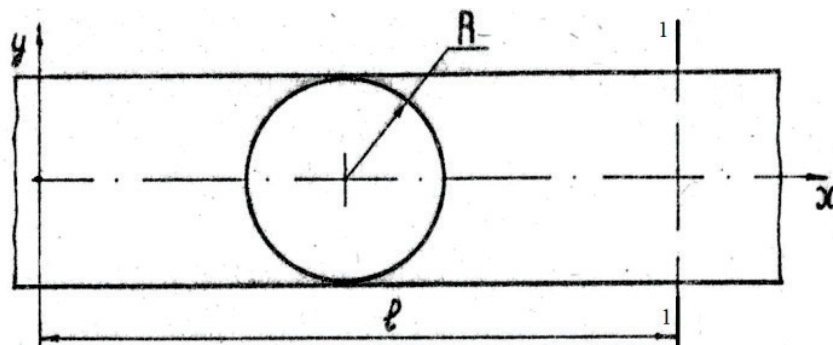


Рис. 2. Схема проточной части канала круглого сечения

б) для задания II

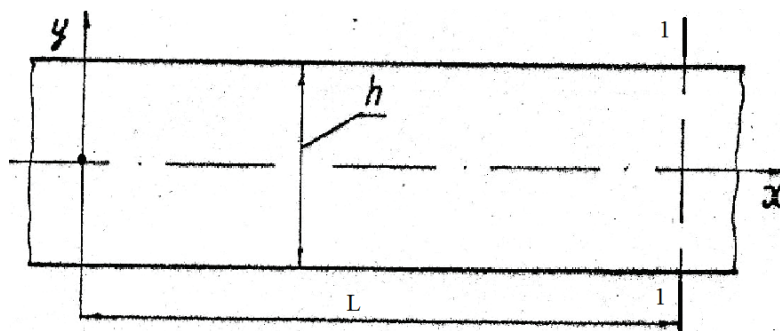


Рис. 3. Схема проточной части канала с параллельными стенками

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Для ответа на первый вопрос задания необходимо графически отобразить функцию расчета поля скоростей в канале заданной конфигурации: для круглого канала формула [1, (5.6)], для плоского канала формула [1, (5.17)]. Указанные формулы содержат параметры: μ_T — динамический коэффициент вязкости диспергированной суспензии, A_1, A_2 — начальные значения напряжений страгивания структуры и её прочности, α_1, α_2 — значения отрезков времени, отражающие период действия этих напряжений. Численные значения этих параметров необходимо определить, используя способ II [1, стр. 113–116]. Пример применения этого способа изложен на [1, стр. 118–123]. Эти параметры входят в реологическое уравнение $\tau = A_1 e^{-\alpha_1 \dot{\gamma}} + A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}} + \mu_T \dot{\gamma}$, которое получено профессором О. А. Терентьевым и является аналитической зависимостью для экспериментальной реологической характеристики волокнистой суспензии. Экспериментальные реологические характеристики необходимо заимствовать из Приложения 2. Экспериментальная реологическая характеристика волокнистой суспензии выбирается по совпадению трех признаков: вид массы, степень помола, концентрация. Выбранную кривую течения нужно скопировать (сделать ксерокопию или сканировать из приложения) и использовать для необходимых построений при выполнении контрольной работы.

Вычислить масштабы по осям кривой течения $m_\tau = \tau/L$ и $m_{\dot{\gamma}} = \dot{\gamma}/L$, чтобы использовать при определении величины реологических параметров, здесь τ — максимальное значение по оси ординат на реологической характеристике, Па; L — величина расстояния, соответствующая значению τ в миллиметрах. Вычисление μ_T — динамического коэффициента вязкости диспергированной суспензии основано на использовании реологического уравнения Ньютона–Петрова $\tau = \mu d U/d y$ и графика.

Определение величин реологических параметров с использованием реологической характеристики показано на рисунке 4.

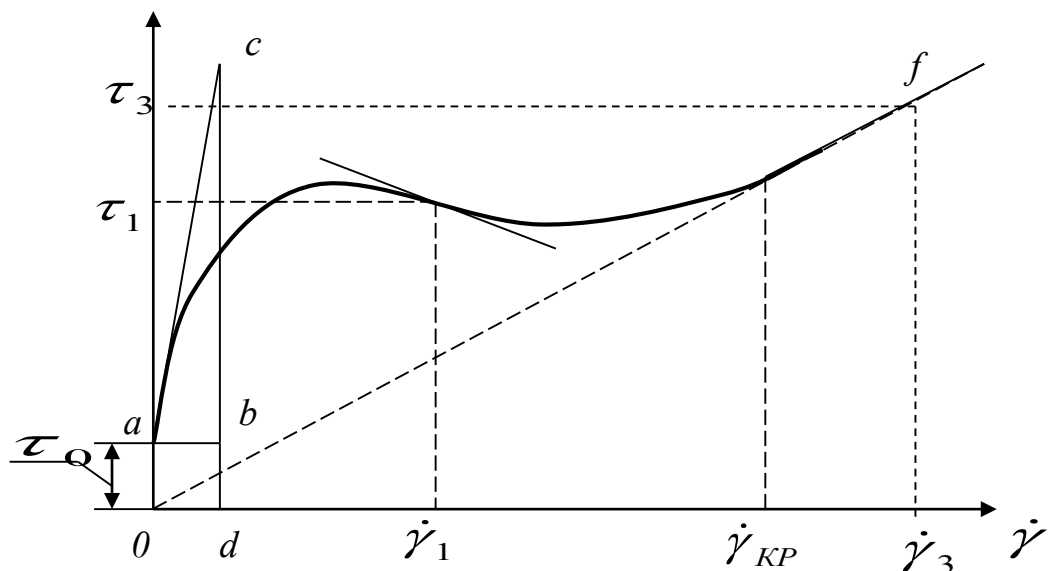


Рис. 4. Реологическая характеристика

$$\mu_T = \frac{\tau_3}{\gamma_3} = \frac{L_\tau m_\tau}{L_{\dot{\gamma}} m_{\dot{\gamma}}} \text{ — пример определения величины динамического}$$

коэффициента вязкости волокнистой суспензии в диспергированном режиме.

Для определения величины коэффициента начальной вязкости μ_0 , нужно построить треугольник abc . Величина коэффициента начальной вязкости в геометрической интерпретации определяется касательной к начальному участку графика в точке $(0, \tau_0)$. Графическое определение положения касательной затруднено, т.к. строго не формализована процедура ее построения. Можно воспользоваться графо-аналитическим способом для решения этой проблемы. Вначале рекомендуется уточнить положение начальной точки реологической характеристики, используя эмпирическую формулу $\tau_0^p = 0,3k C^{3,2}$, где C — весовая концентрация суспензии, %, k — эмпирический коэффициент: $k=0,9$ — для сульфитной беленой целлюлозы (СФИ); $k=1,0$ — для сульфитной небеленой целлюлозы (СФИНБ); $k=1,2$ — для сульфатной беленой целлюлозы (СФАБ); $k=1,4$ — для сульфатной небеленой целлюлозы и древесной массы. Волокна в суспензии образуют структуру, например, при концентрации $C=0,116$ % и менее, в зависимости от вида волокна [1, стр. 12]. Следовательно, в диапазоне производственных концентраций волокнистые суспензии будут иметь структуру, а значит, и величину предельного напряжения сдвига τ_0 , отличную от нулевого значения. В монографии [1, стр. 107] отмечено, что на начальном участке реологическая характеристика имеет выпуклость вверх и значит $\mu_0 > \mu_T$. Поэтому, после вычисления величины τ_0^p следует построить «новое» положение начальной точки, с помощью лекала «реконструировать» начальный участок характеристики в диапазоне градиентов скорости 0-20.

Для аналитического определения величины коэффициента начальной вязкости необходимо начальный участок кривой преобразовать в табличный вид, определив с возможно большей точностью ординаты для градиентов скорости 10 и 20 на реологической характеристике, используя линейку и масштабные коэффициенты по методике, изложенной выше.

$\dot{\gamma}, 1/c$	0	10	20
τ, Pa	τ_0^p	?	?

Координаты трех точек из этой таблицы можно использовать для аналитического определения величины динамического коэффициента начальной вязкости. Наиболее точный результат дает способ аппроксимации кубическим сплайном. Этот способ можно найти в виде примера в математических пакетах для компьютеров «MathCAD» в разделе «DATA ANALYSIS». Производная от аппроксимирующей функции при аргументе, равном нулю, даст величину динамического коэффициента начальной вязкости.

Для студентов заочной формы обучения допускается в уравнении, по которому строится поле скоростей, использовать только значение величины коэффициента начальной вязкости взамен других параметров вязкости [1].

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Отчет в разделе 3 должен содержать исходные данные, график реологической характеристики с необходимыми построениями и обозначениями, таблицу реологических параметров, формулировки первого и второго вопросов с ответами на них. В ответе на первый вопрос нужно записать расчетную формулу с численными значениями и результатом для одного вычисления. Результаты всех вычислений следует оформить в виде таблицы. График функции $U = f(y)$, где U – скорость, м/с, y – координата, м следует построить так, чтобы ось ординат была осью скорости. График нужно строить по пяти точкам. Под графиком скорости построить график зависимости для градиента скорости сдвига $\dot{\gamma} = f(y)$, где $\dot{\gamma}$ – градиент скорости сдвига, так, чтобы оси ординат были на одной линии. Такое расположение графиков дает возможность для анализа профиля поля скоростей с использованием условия $\dot{\gamma}_p > \dot{\gamma}_{кр}$ для функции $\dot{\gamma} = f(y)$, т.к. градиент скорости более объективно отражает состояние суспензии.

Анализ нижнего графика (рис. 5) показывает, что возможно противоречие между формой поля скоростей и графиком градиента скорости. В варианте "а" (рис. 5) видно, что реальное состояние суспензии структурированное, т.к. везде $\dot{\gamma}_p < \dot{\gamma}_{кр}$. В варианте "б" точка $R_{ст}$ (радиус стержня), точка пересечения $\dot{\gamma}_p(y)$ (расчетного градиента скорости в канале) и $\dot{\gamma}_{кр}$ – критического градиента скорости (см. реологическую

характеристику) дают реальный, усеченный профиль поля скорости для переходного режима. График градиента скорости свидетельствует, что часть потока находится в диспергированном состоянии. Чтобы построить график $\dot{\gamma}_p(y)$, нужно вычислить производную от функции поля скоростей при условии $y=R$ или $y=h/2$.

Рисунок 5 позволяет сделать предварительный и окончательный выводы о том, в каком состоянии находится волокнистая суспензия в канале заданной конфигурации и при заданных условиях, т.е. ответить на первую часть второго вопроса задания.

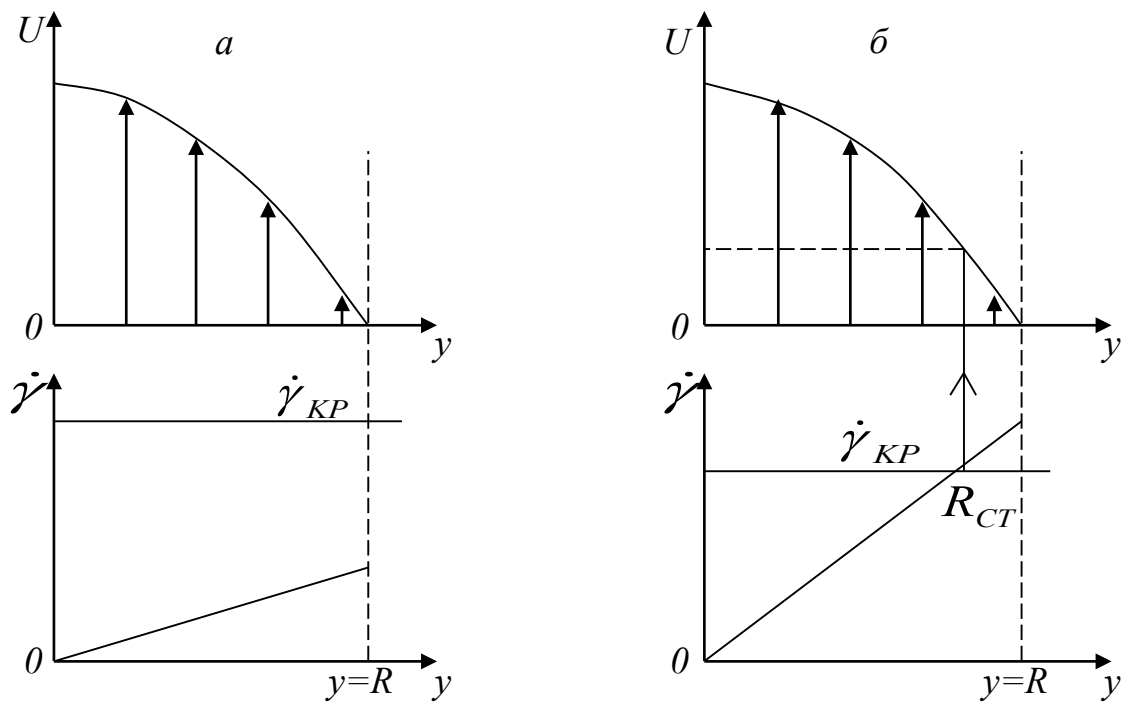


Рис. 5. Поле скоростей и градиентов скорости в сечении канала

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Терентьев, О. А. Гидродинамика волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве [Текст] / О. А. Терентьев. – М.: Лесная промышленность, 1980. – 248 с.
2. Терентьев, О. А. Массоподача и равномерность бумажного полотна [Текст] / О. А. Терентьев. – М.: Лесная промышленность, 1986.
3. Климов, В. И. Расчет и проектирование массоподводящих коммуникаций целлюлозно-бумажного производства [Текст]: учебное пособие / В. И. Климов. – Л.: ЛТА, 1986. – 31 с.
4. Александров, А. В. Реология и гидродинамика процессов отлива и формования бумаги [Текст]. Часть I. Реология и гидродинамика волокнистых суспензий : учеб. пособие / А. В. Александров, Т. Н. Александрова. – СПб.: СПбГТУРП, 2015. – 132 с.: ил. 47.
5. Мидуков, Н. П. Гидродинамика волокнистых суспензий [Текст]: учебное пособие / Н. П. Мидуков, В. С. Куров. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2020. – 88 с.

ЗАДАНИЕ I

1. Построить эпюру скоростей в сечении 1-1 канала, изображенного на рисунке, используя реологическое уравнение и формулу скорости [1, с.104, 151].
2. Оценить состояние потока в канале по виду поля скоростей.

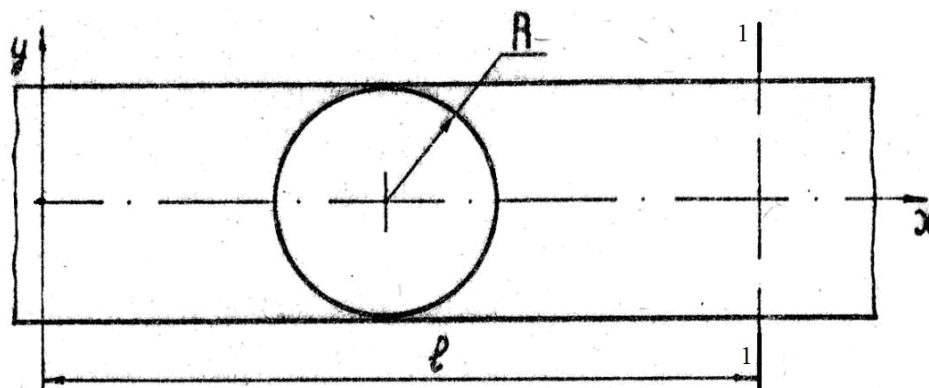


Рис. Схема проточной части канала круглого сечения

Таблица – Исходные данные для расчета

Вариант	Перепад давления P , Па	Длина участка, l , м	Радиус трубы, R , м	ВИД массы	Концентрация массы C , %	Степень помола, °ШР
1	300	3.0	0.16	СФАНБ	1.0	17
2	400	1.3	0.13	СФИБ	0.5	25
3	500	4.5	0,17	СФИБ	0.8	25
4	200	3.0	0.18	СФАНБ	1.5	20
5	200	6,0	0,12	СФИБ	1.0	20
6	500	2.0	0.10	СФИБ	0.8	25
7	300	1.4	0.15	СФИБ	0.8	20
8	220	3.5	0.095	др.мас.	0.7	50
9	200	6,0	0.11	СФИБ	0,6	56

Для расчетов необходимо выбрать реологическую характеристику по сочетанию трех показателей: «Вид массы; Концентрация массы C , %; Степень помола, ° ШР», где СФАНБ – масса сульфатная небеленая, СФИБ – сульфитная беленая, др.мас. – древесная масса.

ЗАДАНИЕ II

1. Построить эпюру скоростей в сечении 1-1 плоского канала, изображенного на рисунке.
2. Оценить состояние потока в канале по виду поля скоростей.

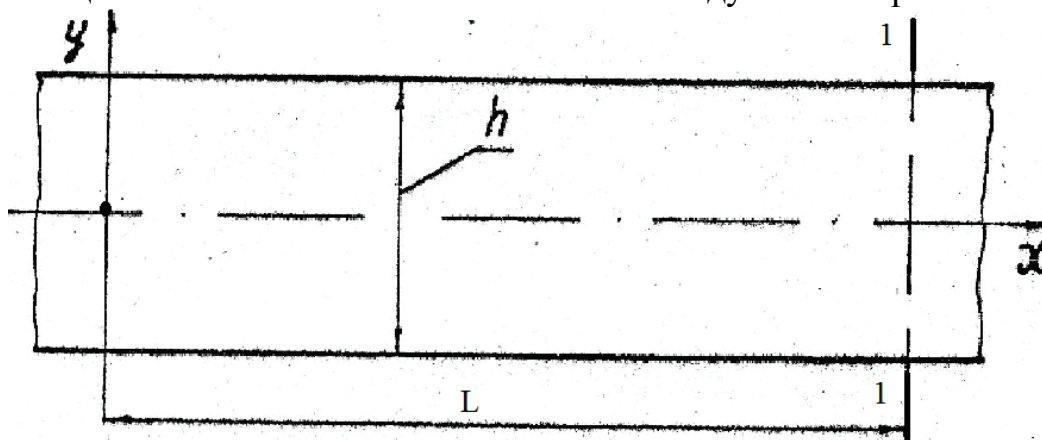


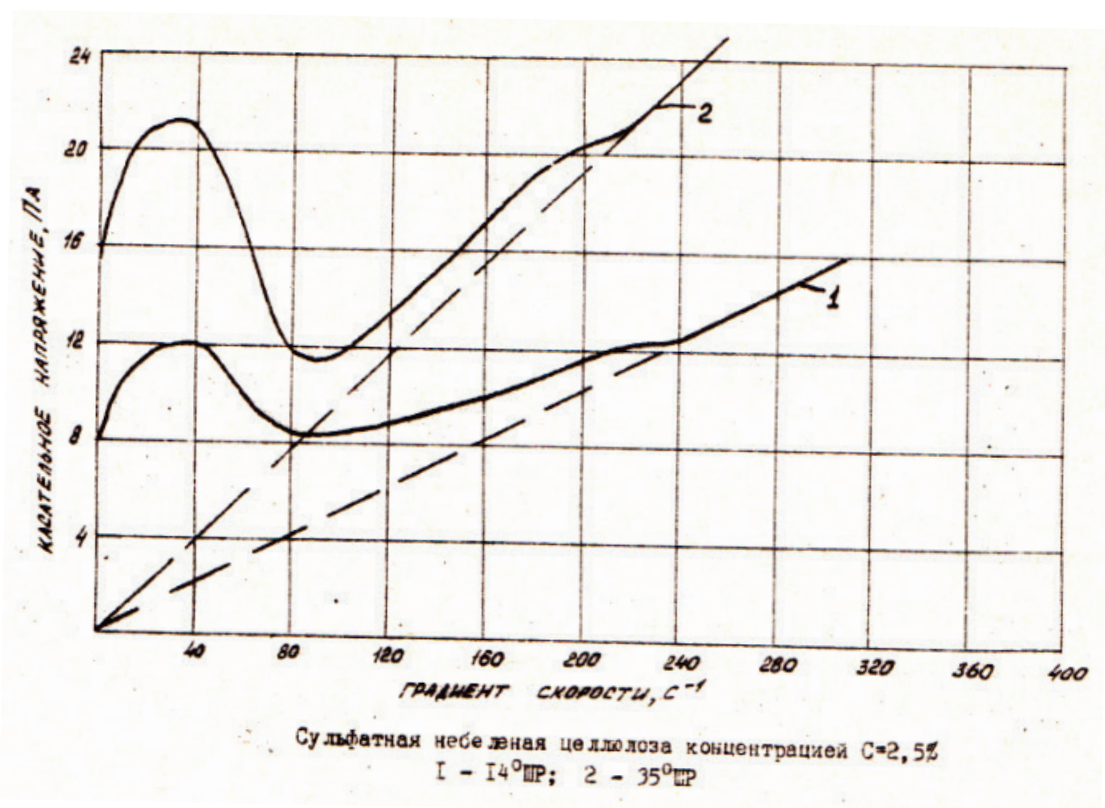
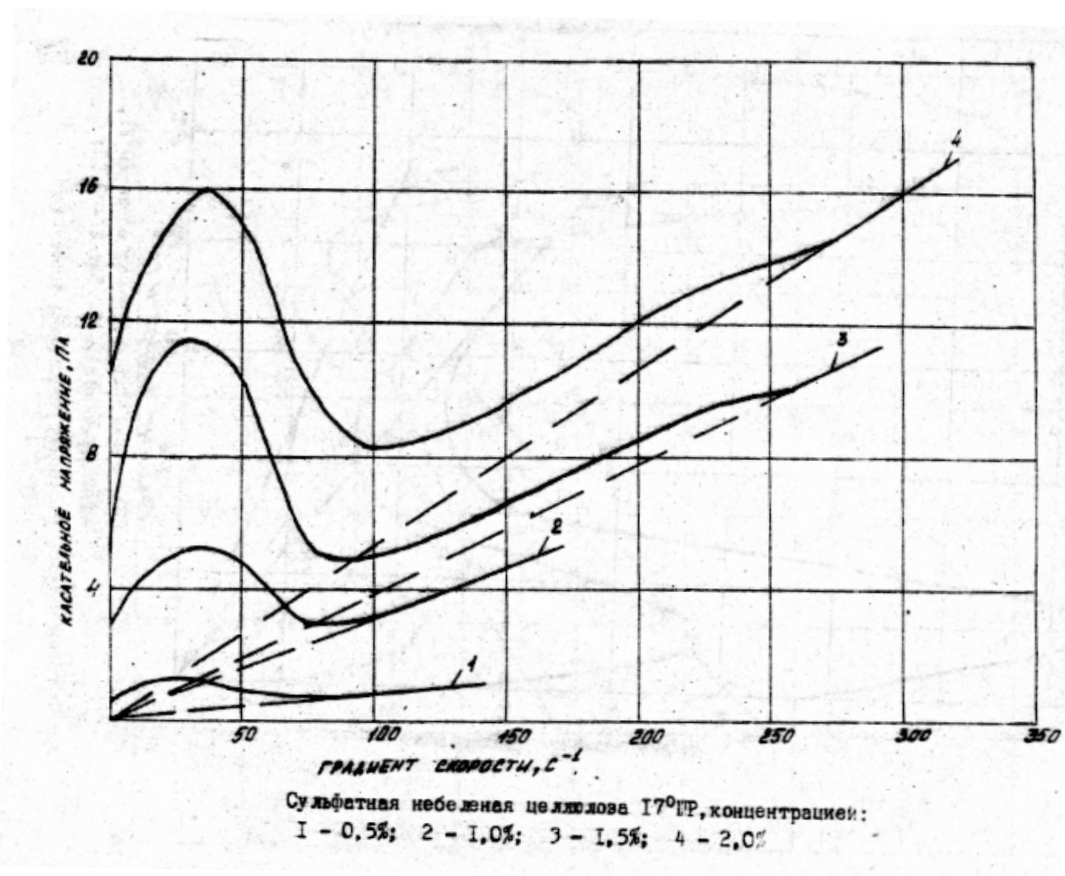
Рис. Схема участка проточной части с параллельными стенками

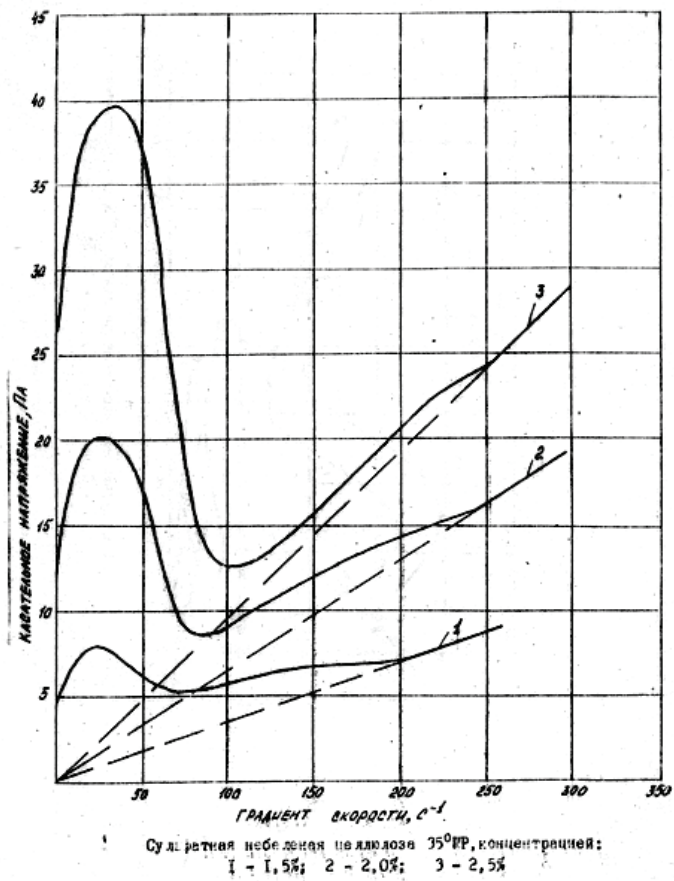
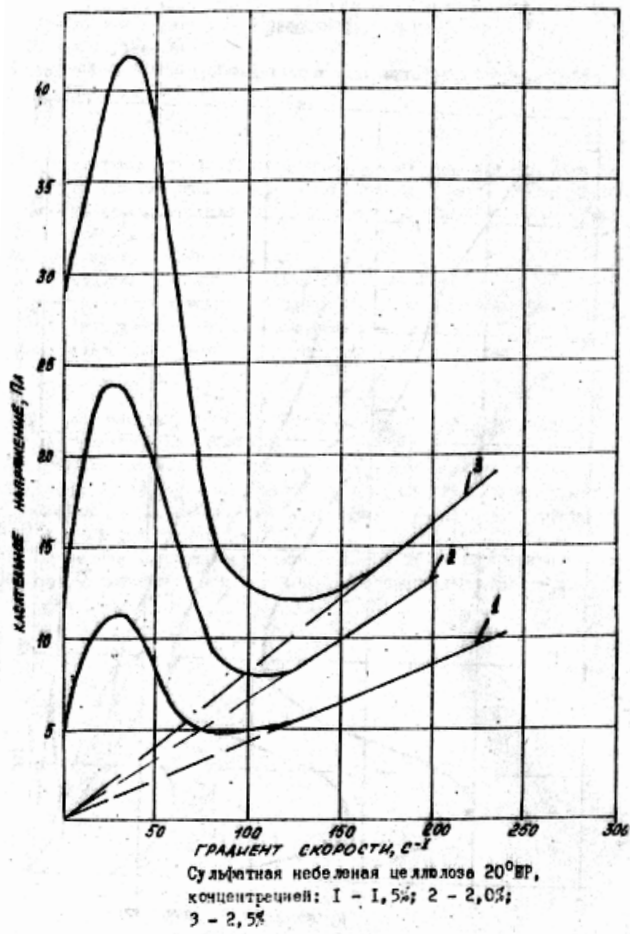
Таблица – Исходные данные для расчета

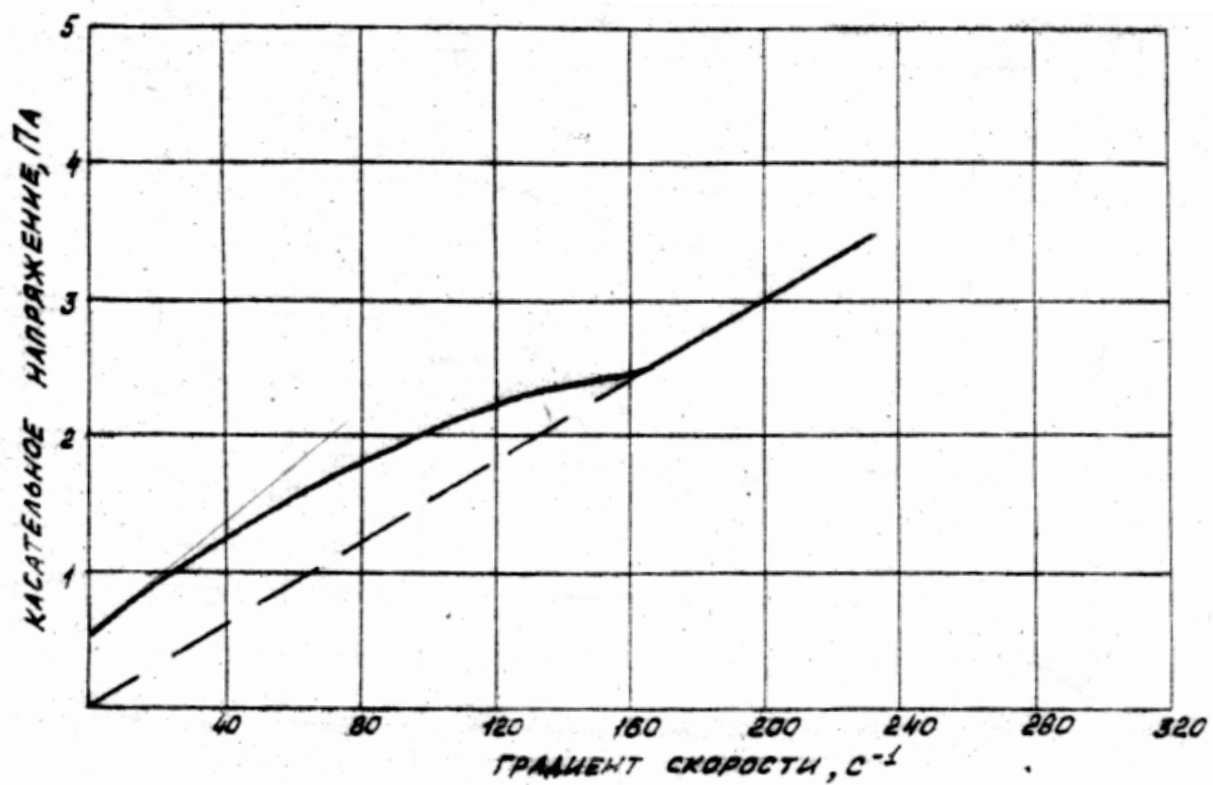
Вариант	Перепад давления P , Па	Длина участка, L , м	Высота канала h , м	Вид массы	Концентрация C , %	Степень помола, $^{\circ}\text{ШР}$
1	250	4,0	0,15	СФИБ	0,4	56
2	200	6,0	0,20	СФИБ	0,5	25
3	300	8,0	6,30	СФИБ	0,8	25
4	400	3,8	0,10	СФИНБ	0,9	17
5	400	4,0	0,50	СФИБ	1,0	20
6	300	1,2	0,30	ЦВВ	0,8	40
7	300	3,5	0,40	СФАНБ	1,5	20

Где СФИНБ – сульфитная небеленая масса, ЦВВ – масса с целлюлозой высокого выхода.

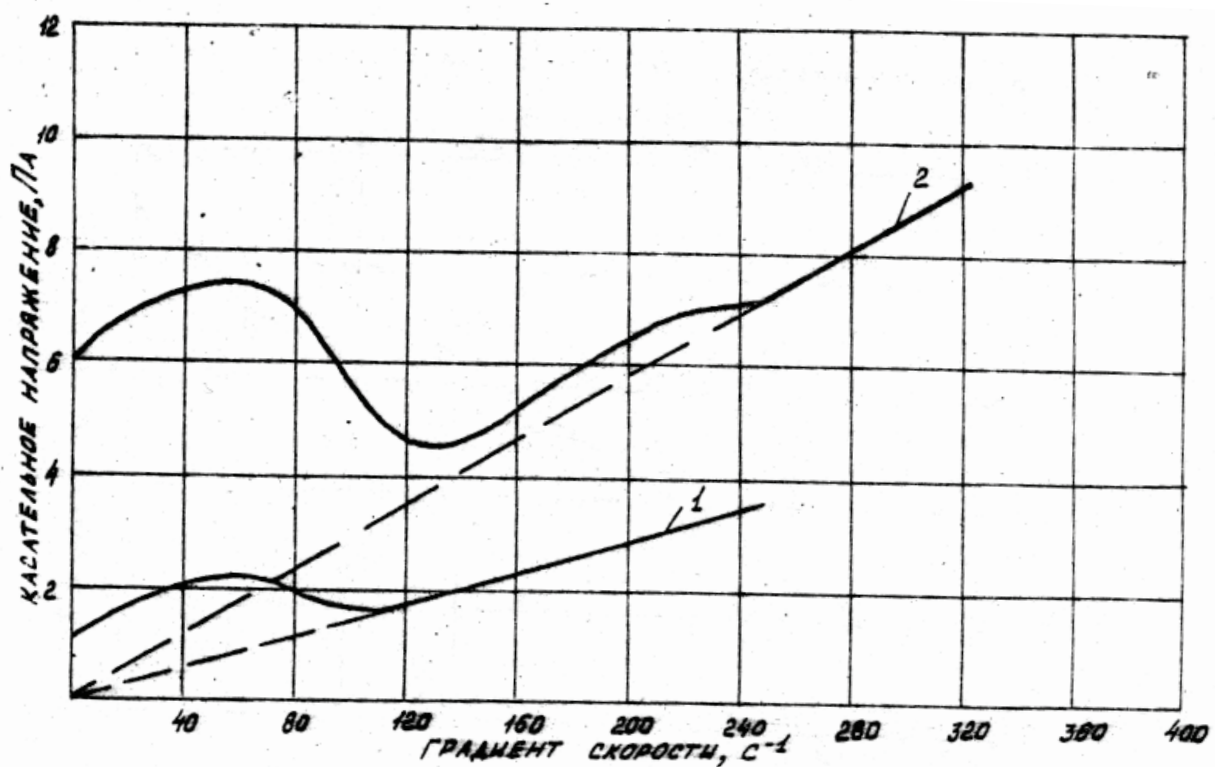
Приложение 2. Экспериментальные реологические характеристики



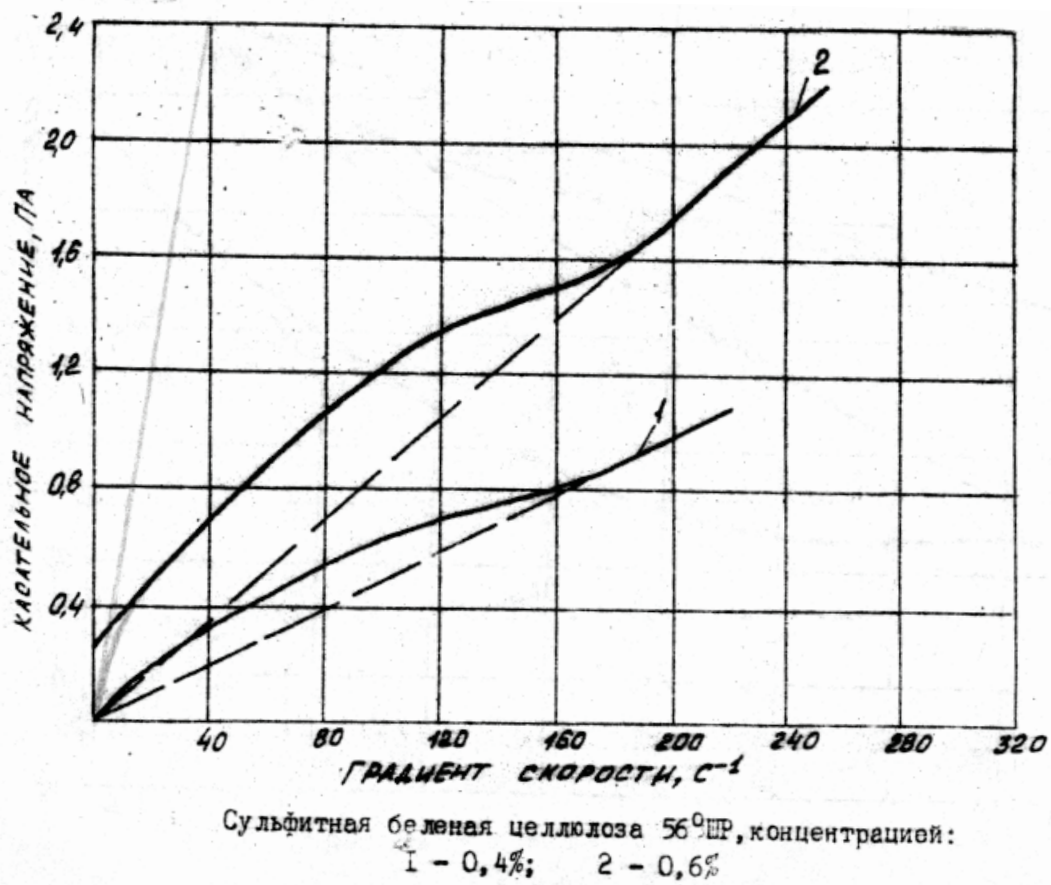
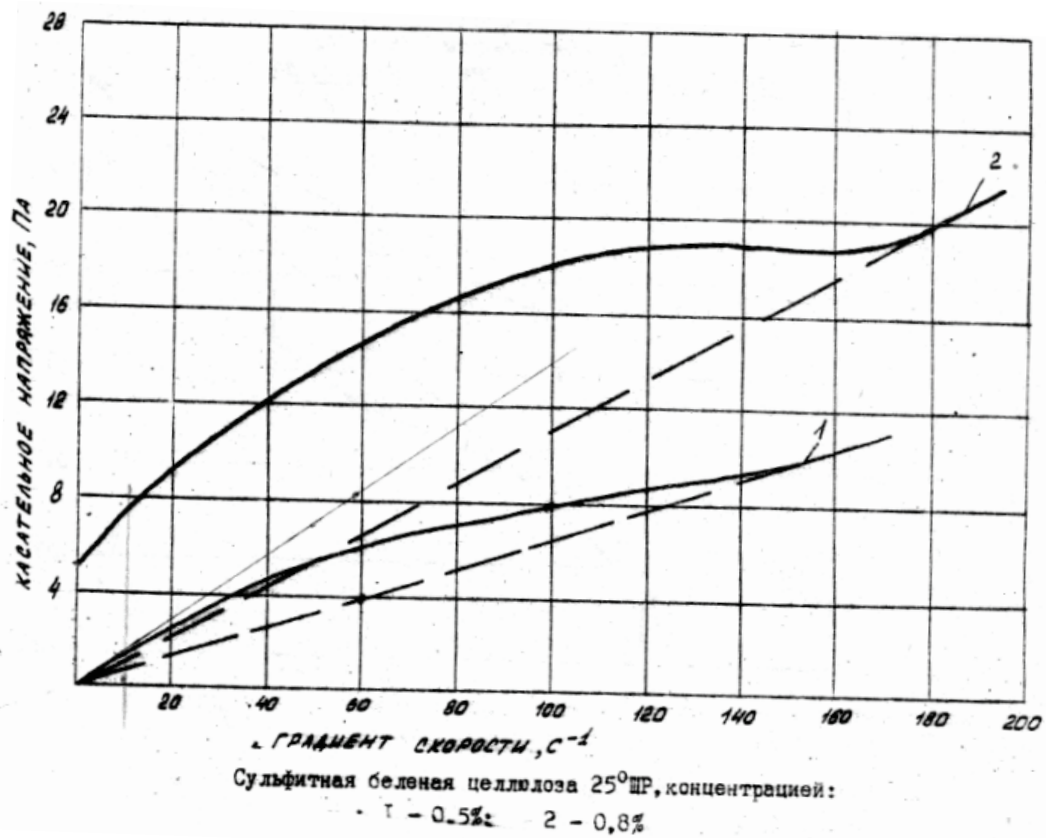


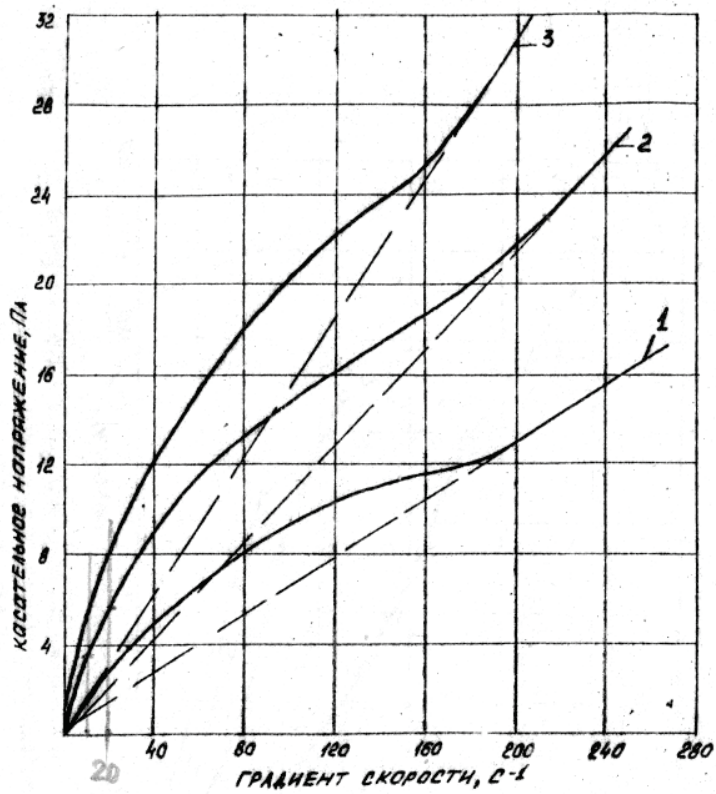


Сульфитная белая целлюлоза 20⁰ШР, концентрацией $C=0,8\%$

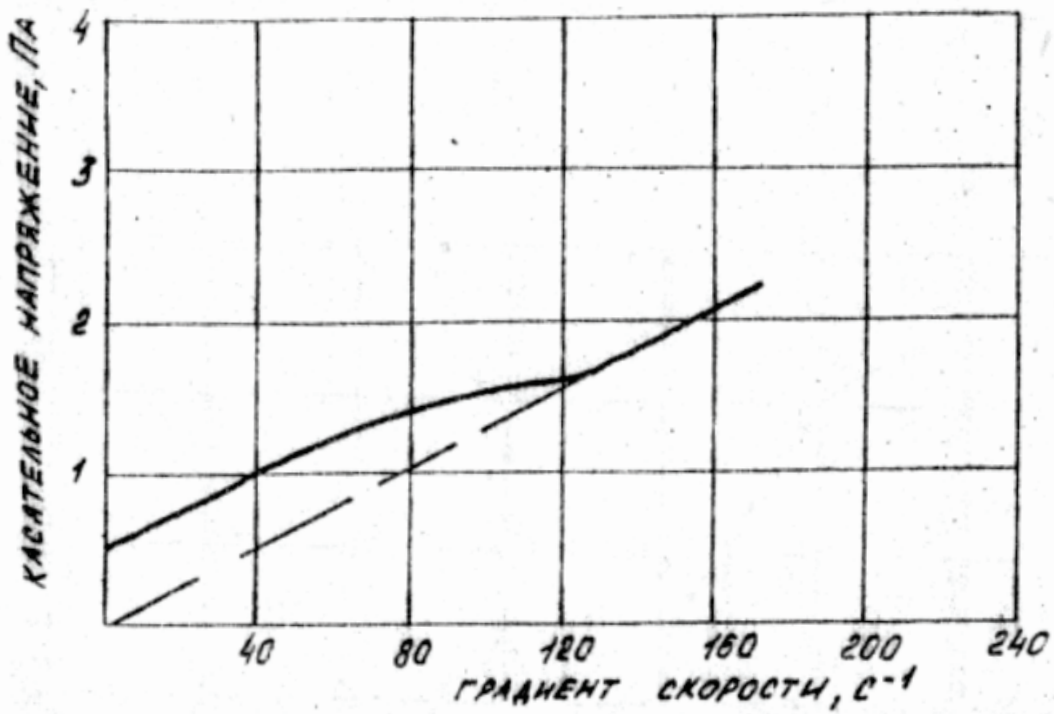


Сульфитная белая целлюлоза 20⁰ШР, концентрацией:
 1 - 1,0%; 2 - 2,0%

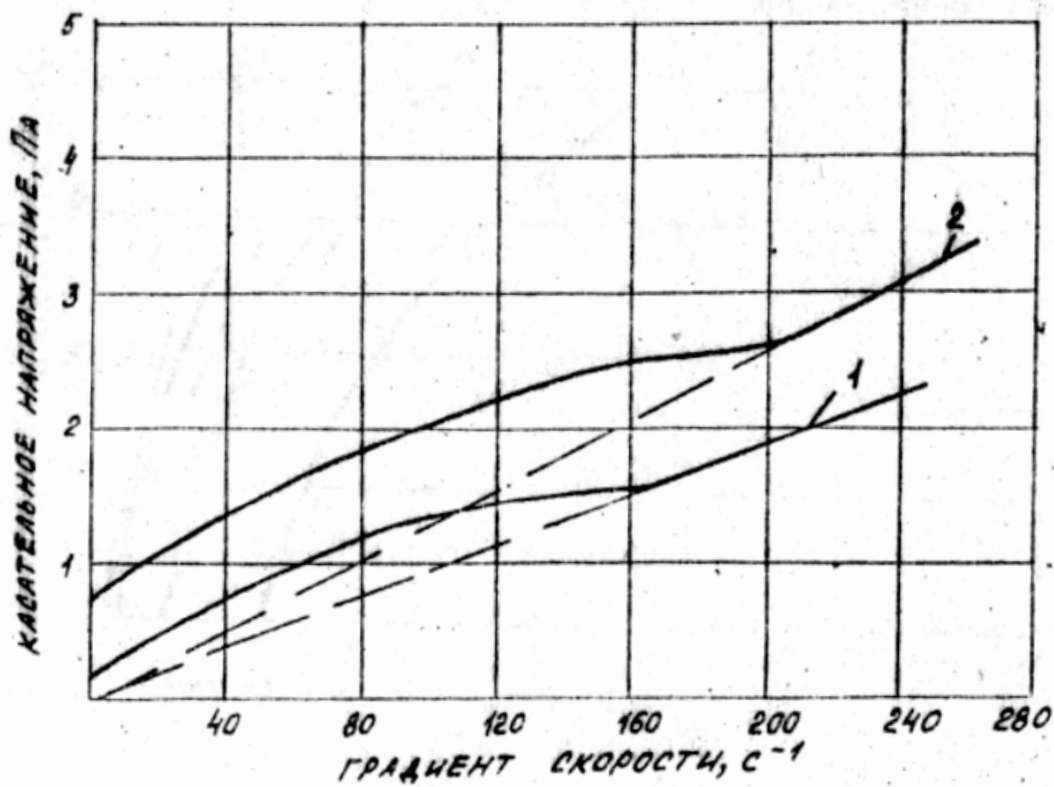




Древесная масса 50⁰СР, концентрацией:
 1 - 0,5%; 2 - 0,7%; 3 - 1,0%



Целлюлоза высокого выхода концентрацией $C=0,8\%$; 40⁰СР



Целлюлоза высокого выхода 20⁰ШР; концентрацией: 1 - 0,6%; 2 - 0,8%.