

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

Институт технологии

Кафедра процессов и аппаратов химической технологии

ГИДРОДИНАМИКА ВОЛОКНИСТЫХ СУСПЕНЗИЙ

Методические указания к лабораторным работам

Специальность: 150302 – машины и оборудование лесного
комплекса

Санкт-Петербург

2020

УДК 676.026.1(07)И

Гидродинамика волокнистых суспензий методические указания к лабораторным работам /Сост. Ю.А.Тотухов, СПбГУПТД (ВШТЭ), Б.Е. Борилкевич, ООО "Р-Центр" - СПб., 2020.- 30 с.

В методических указаниях изложены основные понятия и методы реологии, дано описание конструкции измерительного узла капиллярного вискозиметра, ротационного вискозиметра, экспериментального стенда, методики проведения замеров, рекомендации для обработки и анализа результатов эксперимента, по формулировке выводов и рекомендаций. Рекомендован план оформления отчета по лабораторной работе.

Предназначается для бакалавров, обучающихся по направлению: 150302 «Машины и оборудование лесного комплекса».

Рецензент:

М.В. Ванчаков – доцент Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, кандидат технических наук.

Подготовлены и рекомендованы к печати кафедрой процессов и аппаратов химической технологии института технологии (протокол № 1от 31.08.2020 г.).

Рекомендовано к изданию Редакционно–издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве методических материалов.

© Высшая школа

технологии и энергетики СПбГУПТД, 2020

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Определение реологических параметров ньютоновских жидкостей

Предисловие

Задача лабораторной работы состоит в закреплении знаний, полученных при изучении теоретической части дисциплины, в привитии навыков самостоятельной исследовательской работы. Лабораторная работа предполагает проведение исследования в области механики жидкости, которая называется реологией. Реологические исследования дают информацию об отклике жидкости на внешнее сдвиговое воздействие. Для любой жидкости значение динамического коэффициента вязкости может быть получено только экспериментальным путем. Реологическая модель жидкости в виде уравнения используется для преобразования уравнения движения жидкости Навье–Стокса к виду, удобному для использования.

Принято подразделять жидкости на две категории: ньютоновские и неньютоновские. Неньютоновские жидкости (к ним относятся и волокнистые суспензии) проявляют аномалии в своем отклике и имеют такие реологические параметры, которых нет у ньютоновских жидкостей. Для исследования неньютоновских жидкостей необходимы более сложные методики и конструкции вискозиметров.

Постановка задачи лабораторной работы составляет основу подготовки к ней и предполагает изучение литературы по данной тематике.

Студенты допускаются к лабораторной работе после сдачи коллоквиума по теоретическим основам и методике эксперимента.

1. Постановка задачи исследования

1.1 Теоретическое обоснование метода исследования

Сдвиговое течение как процесс деформирования тела составляет сущность реологии жидких и твердообразных (твердых) сред, находящихся в текущем состоянии. Однородный сдвиг – база реологических исследований. Простой сдвиг принят как основа изучения реологических свойств волокнистых суспензий [1]. Смысл простого сдвига поясняет рисунок

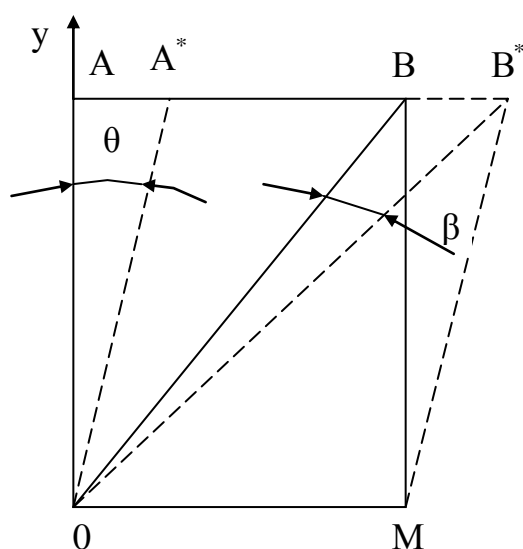


Рис. 1. Модель простого сдвига

Деформация элементарного объема жидкости заключается в смещении точки "А" в положение "А*". При простом сдвиге происходит поворот диагонали ОВ, которая в результате деформирования занимает положение ОВ*. Следовательно, простой сдвиг имеет вращение элементарного объема среды. При малых значениях угла θ величину поворота β можно считать, что $\beta = \theta/2$. Мера

деформации сдвига $\dot{\gamma}$ соответствует величине тангенса угла θ . Скорость деформации жидкости путем сдвига $\frac{d\theta}{dt}$ равна градиенту скорости $\frac{du}{dy}$, где du - величина абсолютного сдвига, разность скоростей верхней и нижней граней деформируемого элемента.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy} = \dot{\gamma}, \quad (1)$$

1.2. Реологическая модель для ньютоновской жидкости

Согласно гипотезе Ньютона - Петрова для большинства жидкостей внешнее касательное усилие T при ламинарном сдвиге уравнивается силой сопротивления (трения), которая для большинства жидкостей прямо пропорциональна поверхности соприкасающихся слоев, градиенту скорости сдвига (1) и зависит от рода жидкости:

$$T = \pm S\mu \frac{du}{dy}, \quad \text{или} \quad \tau = \pm \mu \frac{du}{dy}, \quad (2)$$

где τ – касательное напряжение, S – площадь взаимодействия, μ – динамический коэффициент вязкости. Жидкости, подчиняющиеся закону внутреннего трения (2), называются нормальными или ньютоновскими жидкостями, а закон - реологическим. К ним относятся вода, глицерин, бензин и многие другие жидкости с малым молекулярным весом. Знак «+» или «-» в уравнениях (2) выбирают в зависимости от знака градиента скорости так, чтобы величина T или τ была положительной.

Метод сдвига гарантированно реализует капиллярный вискозиметр.

2. Устройство и принцип работы вискозиметра

Вискозиметр капиллярный стеклянный типа ВПЖ-1 с висячим уровнем (см. рис.2) состоит из измерительного резервуара (4), ограниченного двумя кольцевыми отметками M_1 и M_2 ; резервуар переходит в капилляр (5) и резервуар (6), который соединен с изогнутой трубкой (3) и трубкой (1).

Последняя имеет резервуар (7) с двумя отметками M_3 и M_4 , указывающими пределы наполнения вискозиметра жидкостью. Жидкость из резервуара (4) по капилляру (5) стекает в резервуар (6) по стенкам последнего, образуя у нижнего конца капилляра «висячий уровень».

Измерение вязкости при помощи капиллярного вискозиметра основано на определении времени истечения через капилляр определенного объема жидкости из измерительного резервуара.

2.1. Подготовка к работе (рекомендация)

Перед определением вязкости жидкости вискозиметр должен быть тщательно промыт и высушен. Вискозиметр вначале необходимо промыть несколько раз бензином, затем петролейным эфиром. После растворителя промыть водой и залить не менее чем на 5 - 6 часов хромовой смесью.

После этого вискозиметр промывают дистиллированной водой и сушат. Для более быстрой сушки вискозиметр можно промыть спиртом - ректификатом или ацетоном.

2.2. Методика исследования

Испытуемая жидкость заливается в чистый вискозиметр через трубку (1) так, чтобы уровень ее установился между отметками M_3 и M_4 . На концы трубок (2) и (3) надевают резиновые трубки, причем первая из них снабжена краном и резиновой грушей, вторая — краном.

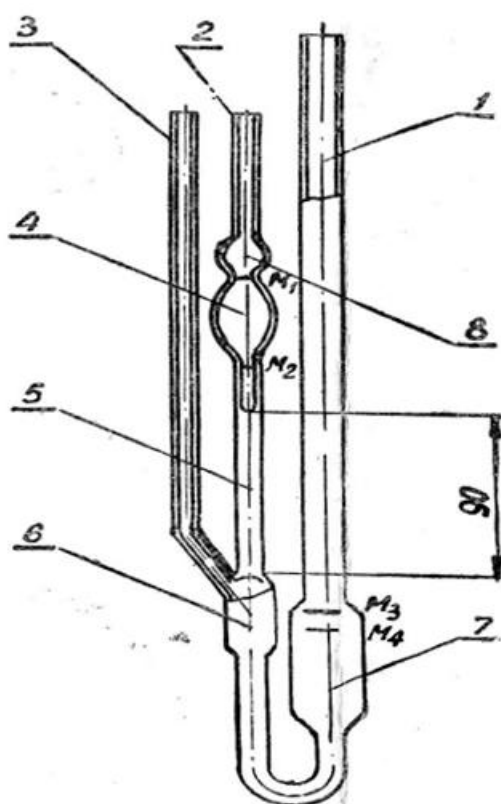


Рис. 2. Вискозиметр ВПЖ-1

Вискозиметр устанавливают вертикально в жидкостный термостат, так чтобы уровень воды находился на несколько сантиметров выше расширения (8).

При температуре измерения выдерживают прибор не менее 15 минут, после чего засасывают (грушей) при закрытой трубке (3) жидкость выше отметки M_1 примерно до половины резервуара (8) и перекрывают кран, соединенный с трубкой (2).

Если вязкость жидкости менее 500—1000 сантистоксов, открывают кран на трубке (2) и освобождают зажим на трубке (3).

При более вязких жидкостях сначала открывают трубку (3), затем трубку (2).

Далее измеряют время понижения уровня в трубке (2) от отметки M_1 до отметки M_2 .

Необходимо при этом обращать внимание на то, чтобы к моменту подхода уровня жидкости к отметке M_1 в расширении (6) образовался висячий уровень, а в капилляре не было бы пузырьков воздуха.

Вязкость вычисляется по формуле, приведенной ниже, по среднему (из нескольких измерений) времени истечения жидкости:

$$\nu = \frac{g}{980,7} \cdot t \cdot k,$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости в сантистоксах, t – время истечения жидкости в секундах, g – ускорение свободного падения, м/сек²,
 k – тарировочный коэффициент вискозиметра (указан в паспорте прибора).

3. Результаты измерений, обработка и анализ

Таблица является одним из способов хранения результатов эксперимента. В автоматизированных системах научных исследований формируется файл данных опроса датчиков. Необходимо отметить тот факт, что расчетная формула является результатом преобразования формулы Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi \cdot \Delta p \cdot R^4}{8 \cdot \mu \cdot l},$$

где Q – расход жидкости, м³/с; Δp – перепад давления, Па; μ – динамический коэффициент вязкости, Па*с; l – длина, на которой происходит перепад давления, м; R – радиус капилляра, м. Кинематический коэффициент вязкости связан с динамическим $\nu = \mu/\rho$, где ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Таблица

№ п/п	Исследуемая жидкость	t ₁ с	t ₂ с	t ₃ с	Σt с	ν см ² /с
1	Вода					
2	Спирт этиловый					

Результаты эксперимента необходимо представить в виде графика функции, т.е. реологической характеристики

$$\tau = f(\dot{\gamma}),$$

4. Выводы и рекомендации

В выводах необходимо отметить вид зависимости, сравнить значение вязкости воды и спирта, рассчитать погрешность эксперимента и дать рекомендацию о практическом использовании полученных значений коэффициентов.

Контрольные вопросы:

1. Какие параметры называются реологическими?
2. Какая размерность у динамического коэффициента вязкости?
3. По каким признакам жидкость относится к ньютоновской?
4. Какой параметр является аргументом в реологическом уравнении?

Библиографический список

1. М. Рейнер. Реология. [Текст] - М.: Наука, 1965, - 224 с..
2. Осовская, И.И. Практическая вискозиметрия [Текст] : учеб. пособие / И.И. Осовская, В.С. Антонова ; М-во образования и науки РФ, ВШГЭ СПбГУПТД. – СПб. : ВШГЭ СПбГУПТД, 2018. - 78 с. Режим доступа: http://nizrp.narod.ru/metod/kaffizikollchem/2019_04_23_01.pdf

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Исследование потерь энергии в потоке волокнистой суспензии

Предисловие

При проектировании гидравлических сетей (трубопроводов) одной из главных проблем в расчетах является учет величины энергии, которая «теряется» потоком при движении в элементах трубопроводов. Грамотно выбрать насос, который будет обеспечивать работу сети, можно только с учетом величины потерь энергии потоком в сети заданной конфигурации. Энергия, которую теряет поток при движении (в том числе), обусловлена и реологическими свойствами жидкости.

Принято подразделять жидкости по их свойствам на ньютоновские и неньютоновские. Для ньютоновских жидкостей разработаны методики аналитического расчета потерь энергии в трубопроводах [1]. Волокнистая суспензия (бумажная масса) отнесена к категории неньютоновских сред. Такой параметр суспензии, как весовая концентрация волокна влияет на ее реологические свойства и требует разработки других методов оценки величины потерянной энергии.

Одним из элементов сети является прямой участок трубопровода постоянного сечения. В этой лабораторной работе необходимо спланировать и выполнить исследование особенности потерь энергии потоком суспензии древесных волокон в стальной трубе.

В нашей стране и за рубежом выполняются многочисленные экспериментальные исследования в области транспортирования волокнистых суспензий

[2], [3], [4] и другие. Результаты корректно спланированного эксперимента можно непосредственно использовать в расчете массопровода.

Наиболее важным этапом в подготовке эксперимента является постановка задачи исследования, смысл которой заключается в изучении всей доступной информации по теме исследования и выявлении всех его возможных проблем.

Как результат этого этапа создается проект экспериментальной установки и методика эксперимента.

1. Постановка задачи лабораторной работы

1.1. Экспериментальные и теоретические данные для оценки параметров простого трубопровода

Существенное различие в закономерностях движения волокнистых суспензий и чистой воды отчетливо просматривается из сравнений приведенных на рис.1, экспериментально полученных гидравлических характеристик $h_l = f(u)$, $\lambda = f(u)$ одного и того же трубопровода внутренним диаметром 52 мм и профилей скоростей по сечению потока [2]. В области слева от гидравлической характеристики $h_l = f(u)$ чистой воды потери напора и коэффициент гидравлического трения для суспензий значительно выше тех же параметров при движении чистой воды, тогда как в области справа от гидравлической характеристики $h_l = f(u)$ воды сравниваемые параметры для суспензий меньше, чем для чистой воды. При практически одном и том же логарифмическом профиле турбулентного режима движения чистой воды в приведенном на рис.1 диапазоне средних скоростей, профиль скоростей по сечению потока суспензий трансформируется от равноскоростного до параболического по мере увеличения средней скорости их движения.

При совместном анализе профилей скоростей и гидравлических характеристик трубопровода $h_l = f(u)$ и $\lambda = f(u)$ нетрудно убедиться в том, что движе-

ние волокнистых суспензий осуществляется в трех основных режимах: структурированном, переходном и диспергированном или турбулентном.

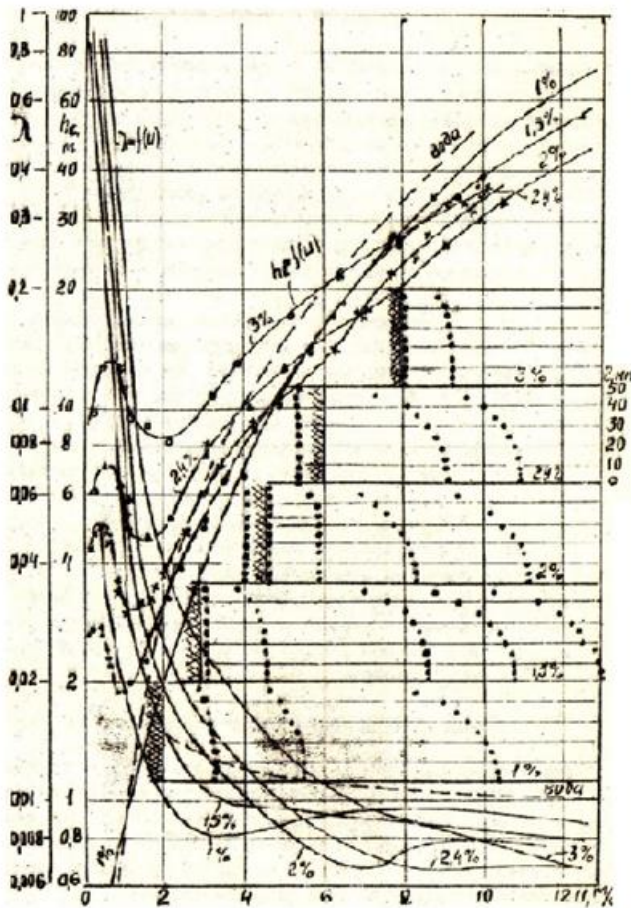


Рис. 1. Зависимости $h_l = f(u)$, $\lambda = f(u)$ и профили скоростей

Наличие перегибов зависимостей $\lambda = f(u)$ и зависимостей $h_l = f(u)$ при одном и том же равноскоростном профиле по сечению потока доказывает существование трех разновидностей структурированного режима или трех подрежимов с различным взаимодействием движущейся как единое целое центральной волокнистой структуры со стенками труб в пристенной области:

- 1-го подрежима движения с взаимодействием волокнистой структуры через пристенный слой в виде вращающихся волокнистых жгутов и с некоторым подобием движения структуры на катках;

Структурированный режим движения с равноскоростным профилем, по сечению потока, соответствует всему ниспадающему ломаному участку зависимостей $\lambda = f(u)$ и нелинейной части зависимостей $h_l = f(u)$ с характерными максимумами и минимумами потерь напора по длине трубопровода. Движение суспензии осуществляется в виде структуры (стержня), образованной из взаимодействующих между собой волокон. Сдвиг структуры осуществляется лишь в пристенной области.

- 2-го подрежима движения с взаимодействием волокнистой структуры со стенками трубы через образовавшийся в пристенной области тонкий ламинарный водяной слой и с некоторым подобием движения структуры по смазке;

- 3-го подрежима движения с взаимодействием волокнистой структуры со стенками трубы через пристенный водяной или "разжиженный" волокнистый слой, находящийся в переходном, а затем в турбулентном состояниях.

Переходный режим соответствует низшей нелинейной части зависимостей $\lambda = f(u)$ с характерным минимумом коэффициента гидравлического трения.

В этом режиме турбулентные вихри пристенного слоя разрушают центральную структуру от периферии к центру по мере увеличения средней скорости, на что указывают постепенно раскрывающиеся профили скоростей по сечению потока. Заметный подъем зависимостей $h_l = f(u)$, в этом режиме обусловлен дополнительным расходом энергии на разрушение волокнистой структуры.

Диспергированный или турбулентный режим при полностью раскрытом профиле скоростей по сечению потока и движении при полностью разрушенной волокнистой структуре соответствует участкам зависимостей $h_l = f(u)$ и $\lambda = f(u)$, выходящим на параллельность соответствующим зависимостям для чистой воды.

В более наглядной форме схема развития движения волокнистых суспензий с указанием режимов и подрежимов приведена на рис. 2 [2].

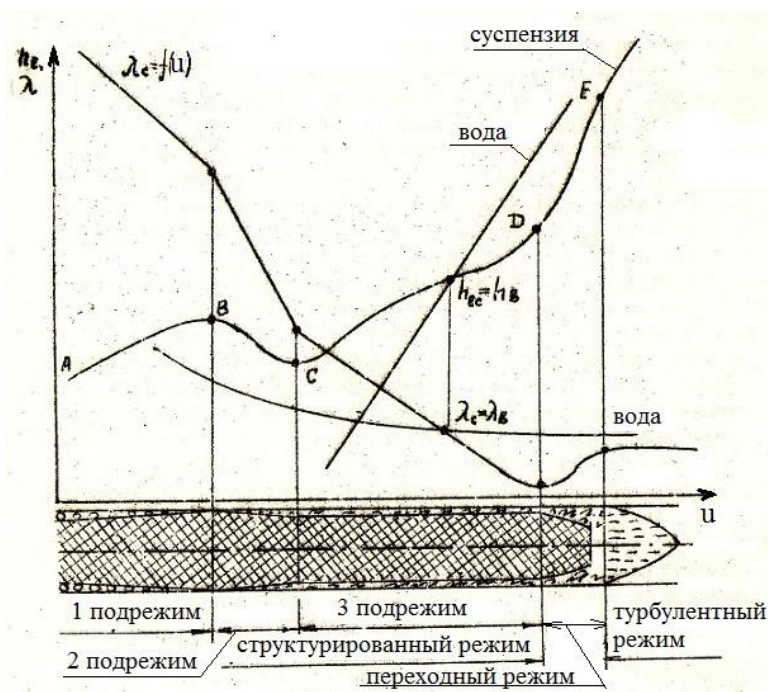


Рис. 2. Схема движения волокнистых суспензий в развитии

Опытом доказано [2, 3], что движение всех целлюлозных суспензий при степени помола 12 - 30°ШР и макулатурной массы при степени помола 40 - 45°ШР подобно движению суспензий СФИБ (рис. 1, 2), но имеется различие в оценке потерь напора по длине трубопровода. При повышении степени помола исходной целлюлозной суспензии до 65°ШР и выше характер развития движения изменяется. По опытным данным [1], приведенным на рис. 3, видно, что при повышении степени помола исходной суспензии СФИБ до 70°ШР и соответственно - укорочении волокон при размоле характерный минимум потерь напора исчезает, а гидравлическая характеристика приобретает непрерывно восходящий вид. Профили скоростей постепенно раскрываются, волокнистая структура постепенно разрушается по мере увеличения средней скорости движения суспензий в отличие от равноскоростного профиля и движения с не разрушенной структурой исходной суспензии в рассматриваемом диапазоне скоростей.

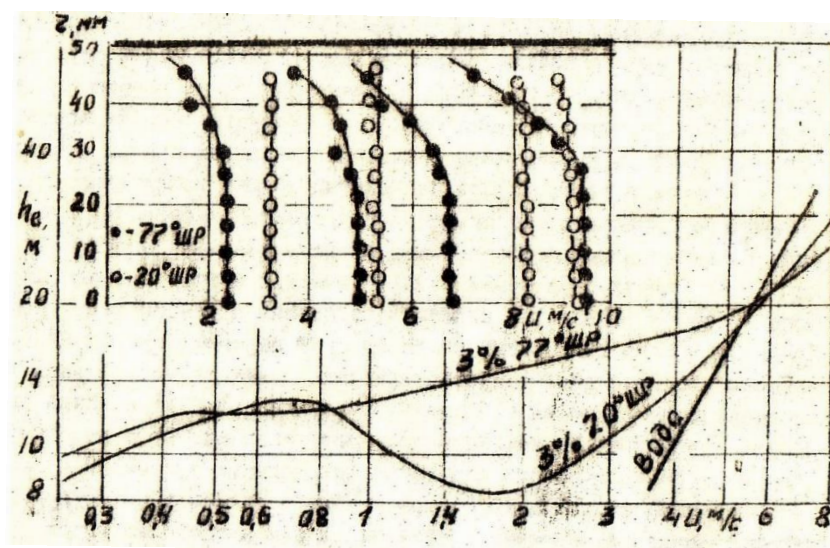


Рис.3. Зависимости $h_l = f(u)$, и профили скоростей при движении суспензий СФИБ разной степени помола в трубопроводе диаметром 102 мм.

Аналогичный размолотым суспензиям вид имеют гидравлические характеристики трубопроводов и профили скоростей [2,4] при движении суспензий белой древесной массы (ДМВ) 65 - 75°ШР, обладающей более коротким волокном по сравнению с волокном целлюлозных суспензий.

Таким образом, по характеру развития движения волокнистые суспензии разделяются на:

- длиноволокнистые, обладающие достаточно прочной волокнистой структурой, образованной из длинных в относительном измерении волокон;
- коротковолокнистые, обладающие менее прочной и сравнительно легко разрушающейся волокнистой структурой, образованной из относительно коротких волокон.

Переход длиноволокнистых суспензий в коротковолокнистые происходит при степени помола в пределах 65 - 70°ШР.

Результаты зарубежных исследований [5] представлены на рис. 4. Для сопоставления экспериментальных данных необходимо преобразовать величину потерь давления в величину потерь напора.

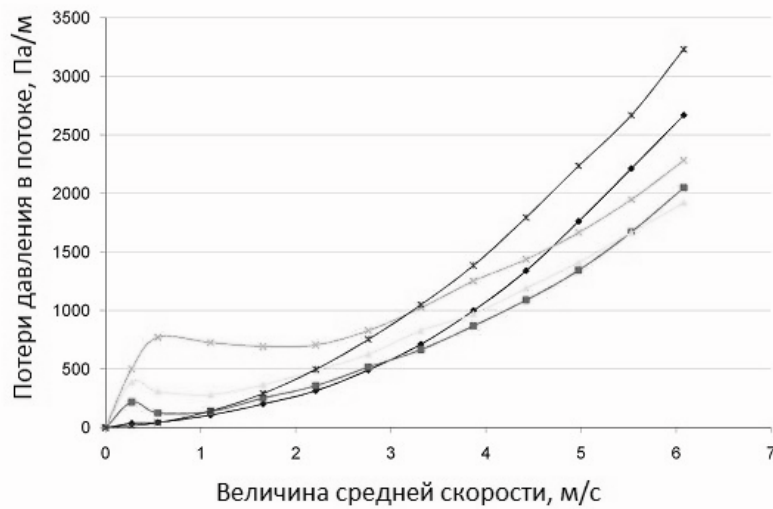


Рис. 4. Потери давления в суспензии от средней скорости потока

◆ вода ■ суспензия C=0,5% ★ суспензия C=1,0%
 ✕ суспензия C=1,5% ✱ суспензия C=2,0%

По результатам выполненного анализа проектируется схема экспериментальной установки и разрабатывается методика исследования.

2. Схема экспериментальной установки, методика эксперимента

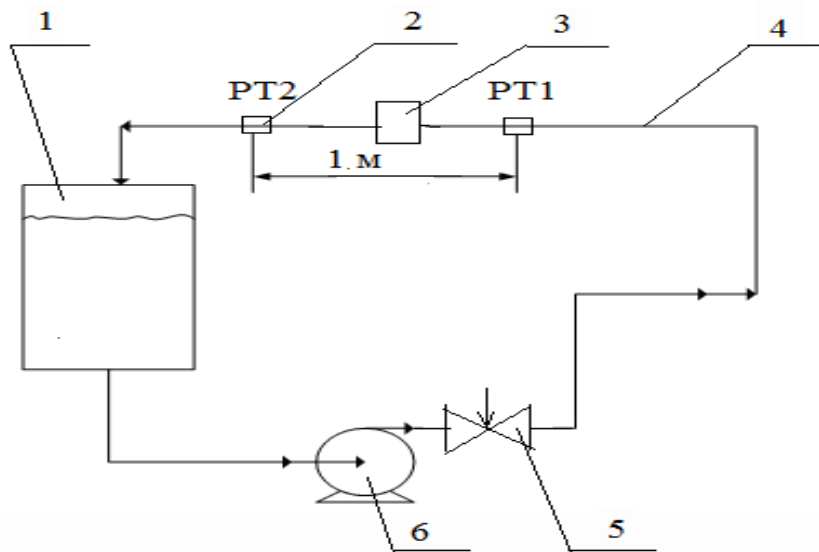


Рис. 5. Схема экспериментальной установки

1 - емкость с суспензией, 2 - датчик давления Bourdon Haenni FlexBar HRT (type 81-611-311-1414), 3 - расходомер Siemens Sitrans FM Magflo MAG 1100

(р.п.# 7ME6920-1AA30-1AA0), 4 - участок трубы диаметром 50 мм, 5 - запорный вентиль, 6 - насос дисковый DISCFLO модель 100x80x305-2D

Методика проведения эксперимента

Рассчитать и подготовить необходимый объем волокнистой суспензии заданной концентрации [6], (методика базируется на параметрах установки). Поскольку график зависимости $h_l = f(u)$ волокнистой суспензии более сложный, то количество измерений сделаем равным $n=8$ с шагом $q=Q_{\max}/n$. Последовательно устанавливаем q_n , измеряем показания расходомера и датчиков давления и записываем в таблицу 1.

3. Результаты измерений, обработка и анализ

Для результатов измерений и расчетных значений необходима таблица, форма которой обусловлена методикой эксперимента, количеством измеряемых и расчетных параметров. Анализ результатов эксперимента удобно выполнить на основе графика, сравнивая зависимости $h_l=f(u)$ для волокнистой суспензии и воды. График для воды необходимо рассчитать и построить, используя известную методику [1]. Полученный график рекомендуется сравнить с результатами других исследователей (см. приложение).

Таблица 1

№ п/п	Q л/мин	PT1 бар	PT2 бар
1	-	-	-
2			
3			
-			
-			

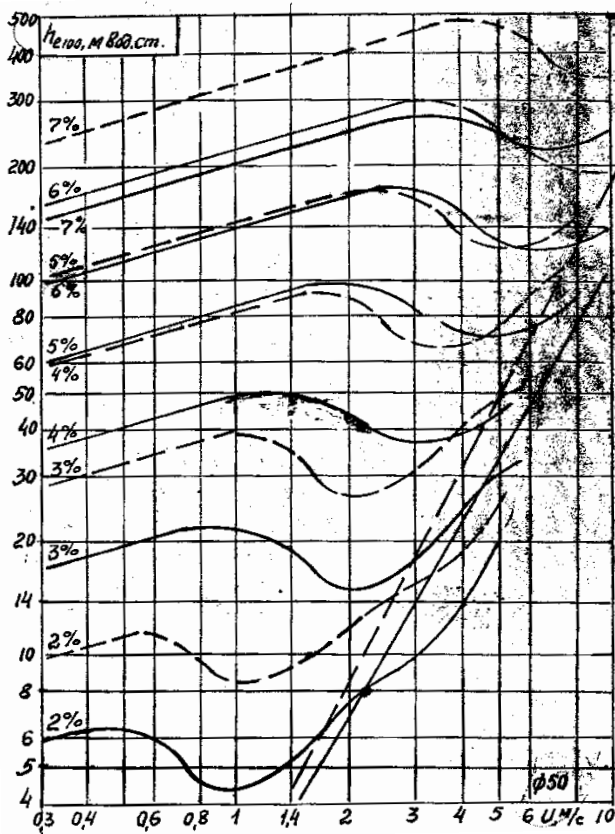
Таблица 2

№ п/п	U м/с	h_1 м.вод.ст.	h_2 м.вод.ст.	h_l м.вод.ст.	μ Па*с	Re -	λ -	$h_{\text{воды}}$ м.вод.ст.
1								
2								
3								
-								
-								

4. Выводы и рекомендации

По результатам качественного и количественного анализа графика сделать выводы об особенностях потерь энергии в прямом участке трубопровода при движении волокнистой суспензии в сравнении с водой. Оценить практическую значимость полученных результатов в гидравлических расчетах.

Полезно сравнить полученный график с номограммой [7], полученной другим автором.



Номограмма для расчета потерь напора

Контрольные вопросы:

1. Какой параметр используют в гидравлических расчетах для определения потерь энергии?
2. Указать единицу измерения этого параметра;
3. На каких элементах трубопровода поток теряет энергию?
4. Какие режимы движения имеет поток волокнистой суспензии?
5. Почему у волокнистой суспензии потери энергии могут быть меньше чем у воды?

Библиографический список

1. Гидравлика, гидравлические машины и гидравлические приводы. [Текст] / под ред. Т.М. Башта. – М.: Машиностроение, 1982. – 424 с.
2. Климов В.И. Гидротранспорт волокнистых материалов в целлюлозно-бумажном производстве. [Текст] - М.: Лесная промышленность, 1971
3. Терентьев О.А. Гидродинамика волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве [Текст] – М.: Лесная промышленность, 1980 – 248 с.
4. Халтурин В.М. Исследование энергетических характеристик потоков бумажных масс: [Текст] Автореф. дис...канд.техн. наук/ЛТИ ЦБП, - Л., 1976.
5. TAPPI, editor. Generalized method for determining the pipe friction loss of flowing pulp suspensions, TIS 0410-14, 1992. Tappi information Sheets.
6. ГОСТ Р 50068-92 Ускоренный метод определения концентрации массы.
7. Климов В.И. Расчет массопроводов при транспортировании суспензий сульфитной беленой целлюлозы. [Текст] – В кн.: Машины и аппараты целлюлозно-бумажных производств: Межвуз. сб.науч.тр. – Л.: ЛТА, 1984, с.3

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Определение реологических характеристик волокнистых суспензий

Предисловие

Задача лабораторной работы состоит в закреплении знаний, полученных при изучении теоретической части дисциплины, в привитии навыков самостоятельной исследовательской работы. Лабораторная работа предполагает проведение исследования в области механики жидкости, которая называется реологией. Реологические исследования дают информацию об отклике жидкости на

внешнее сдвиговое воздействие. Для любой жидкости значение динамического коэффициента вязкости может быть получено только экспериментальным путем. Реологическая модель жидкости, в виде уравнения, используется для преобразования уравнения движения жидкости Навье–Стокса к виду, удобному для использования.

Принято подразделять жидкости на две категории: ньютоновские и неньютоновские. Неньютоновские жидкости (к ним относятся и волокнистые суспензии) проявляют аномалии в своем отклике и имеют такие реологические параметры, которых нет у ньютоновских жидкостей. Для исследования неньютоновских жидкостей необходимы более сложные методики и конструкции вискозиметров.

1. Постановка задачи исследования

Постановка задачи лабораторной работы составляет основу подготовки к ней и предполагает изучение литературы по данной тематике.

В волокнистых суспензиях сопротивление деформированию оказывают силы сцепления пространственной волокнистой сетки (внутреннее трение), силы трения среды об ограничивающую поверхность и силы ньютоновского трения в разрушенном состоянии.

Динамика изменения структуры волокнистой суспензии при сдвиговом течении характеризуется физической моделью, полученной академиком О.А. Терентьевым. На основе этой модели создано [2] реологическое уравнение вида:

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

где A_1 - напряжение первоначального трения (в момент трогания) волокнистой структуры о стенку канала; A_2 - напряжение, характеризующее внутреннюю прочность структуры из волокон (в момент трогания); α_1, α_2 - временные факторы, характеризующие период существования соответствующей

щих напряжений в потоке; $\dot{\gamma}$ - градиент скорости сдвига; μ - коэффициент эффективной вязкости. Волокнистая суспензия является неньютоновской жидкостью, у которой вязкость зависит от $\dot{\gamma}$ и τ .

Закономерности структурных преобразований волокнистых суспензий при сдвиговом течении отражаются закономерностями изменения реологической характеристики, которая показывает зависимость величин касательных напряжений от градиента скорости сдвига.

В условиях однородного поля скоростей и напряжений сдвига в ротационном вискозиметре осредненное значение касательных напряжений интерпретируется формулой:

$$\tau = \frac{M}{2\pi L R_{cp}^2}, \quad (2)$$

где $R_{cp.} = \frac{R_H + R_B}{2}$, M – момент трения; L – длина образующей внутреннего цилиндра, контактирующая с суспензией в зазоре вискозиметра.

Градиент скорости сдвига вычисляется по формуле:

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega R_H}{R_H - R_B}, \quad (3)$$

где ω – частота вращения наружного цилиндра. Условие однородности поля скоростей и напряжений сдвига в зазоре обеспечивается, когда $(R_H / R_{BH.})^2 \rightarrow 1$ [2].

2. Схема экспериментальной установки, методика эксперимента

На рис. 2. показана блок-схема автоматизированной системы научных исследований, которая создана на кафедре машин автоматизированных систем на базе ротационного вискозиметра РВ-1 [2]. Измерительный узел ротационного вискозиметра состоит из двух вертикально расположенных коаксиальных ци-

линдров (1) и (3). Внутренний цилиндр (3) зафиксирован в центрах, что сводит трение в опорах к минимуму. С помощью гибкой тяги и рычажной системы внутренний цилиндр связан с тензометрическим датчиком силоизмерительным D1, который преобразует измеряемый момент трения в аналоговый сигнал. Интерфейс преобразует сигнал датчика и передает в компьютер, который в системе выполняет опрос датчиков. Привод наружного цилиндра (1) содержит двигатель (M), блок управления (P) и датчик числа оборотов (D2). Эти устройства гарантируют неизменность во времени скорости вращения наружного цилиндра (1), т.е. гарантируют выполнение условия $\omega = const.$, при заданной величине оборотов наружного цилиндра.

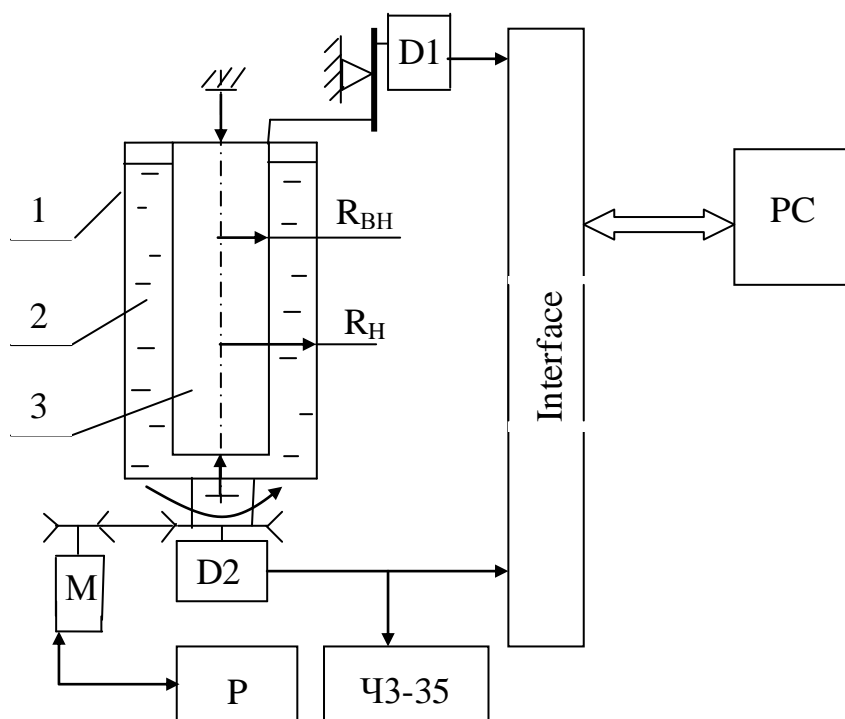


Рис. 2. Блок-схема АСНИ Вискозиметр РВ-1

1 – наружный цилиндр, $R_H = 0,131$ м; 2 – исследуемая среда;
 3 – внутренний цилиндр, $R_{ВН} = 0,12$ м; D1 – датчик силоизмерительный;
 D2 – датчик оборотов; M – двигатель; P – блок управления двигателем
 PC – компьютер; ЧЗ-35 – частотомер электронный

Поверхность внутреннего цилиндра имеет шероховатость для уменьшения пристенного проскальзывания. Влияние дискового трения сведено к минимуму за счет большой величины образующей внутреннего цилиндра ($L=0,6$ м) и

конструкции его донной области, которая выполнена в форме опрокинутого стакана. При заполнении зазора там сохраняется слой воздуха, который исключает трение суспензии о дно внутреннего цилиндра.

Рабочий зазор вискозиметра устанавливается дискретно, путем замены цилиндров 3. Диапазон изменения зазора от 0,011 м до 0,060 м. Наружный цилиндр 1 вращается в диапазоне от 0,2 до 35 с⁻¹. Датчик соединен с внутренним цилиндром с помощью рычага, который позволяет изменять чувствительность системы измерения. Рабочим обычно выбирают внутренний цилиндр диаметром 0,24 м. Устанавливается соотношение плеч рычага, который обеспечивает необходимую чувствительность датчика силоизмерительного. Закрепляется на опоре внутреннего цилиндра тяга, которая связывает цилиндр с рычагом. Через воронку заливается суспензия в зазор между цилиндрами до отметки 0,45 м. При необходимости суспензия в зазоре выравнивается проволоочной мешалкой. Включается блок управления двигателем. Поворотом потенциометра на панели блока управления задается начальное (минимальное) число оборотов наружного цилиндра (при визуальном контроле с помощью частотомера ЧЗ-35). Двигатель (М) соединен с наружным цилиндром зубчатым ремнем с передаточным отношением 1:2. Затем обороты наружного цилиндра увеличиваются с шагом 9-10 об/мин. Верхний предел числа оборотов ограничен эффектом образования воронки в зазоре вискозиметра, обычно 300-340 об/мин. Указанный диапазон оборотов обеспечивает изменение градиента скорости до величины 380 1/с. Такой интервал градиента скорости гарантирует воздействие на волокнистую суспензию во всех режимах: структурированном, переходном и диспергированном.

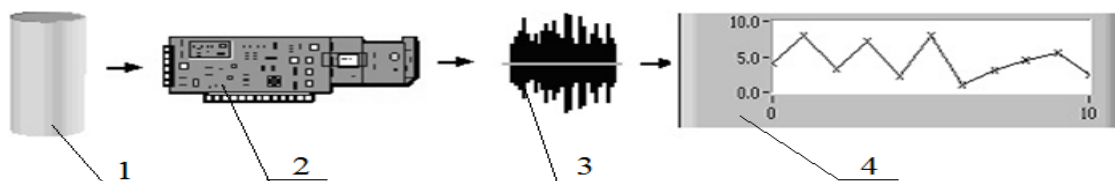


Рис. 3. Блок-схема интерфейса измерения

1 – измерительный блок вискозиметра; 2 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 3 – обработка сигналов датчиков; 4 – отображение результатов измерения на экране монитора компьютера.

Перед проведением эксперимента необходимо выполнить тарировку датчика силоизмерительного. Датчик тарируется путем нагружения эталонными гирьками. Тяга рычага крепится к нити, которая пропускается через блок.

Тарировать датчик необходимо по следующим причинам:

1. Соотношение плеч рычага задает величину диапазона измеряемого усилия, которое в большей степени зависит от величины концентрации исследуемой суспензии;

2. Для вычисления коэффициента пересчета, который используется в формуле (2). Сигнал датчика, измеряемый в вольтах, необходимо перевести в единицы силы.

3. Результаты измерений, обработка и анализ

Формированию файла данных эксперимента должны предшествовать следующие процедуры:

- присвоение "имени" файлу данных эксперимента;
- ввод значений констант и переменных эксперимента: радиус внутреннего цилиндра ($R_{вн.}$), высота заполнения зазора (L), значение тарировочного коэффициента.
- оценка выхода на постоянную величину момента трения (поиск зоны достоверных данных);
- статистическая обработка массива данных для выявления погрешности измерения момента трения;
- расчет значений касательного напряжения и градиента скорости для каждой точки замеров.

Результаты эксперимента формируются в виде файла данных, который можно использовать для построения реологической характеристики как в среде пакета интерфейса, так и в других прикладных программах. Реологическая ха-

рактика является результатом аппроксимации двадцати (или более) отдельных замеров, в ходе которых были получены координаты точек реологической кривой. Эти точки отражают реологический отклик суспензии на внешнее сдвиговое воздействие. Точки так расположены в факторном пространстве $(\tau - \dot{\gamma})$, что позволяют дать полную оценку всех режимов состояния волокнистой суспензии. Реологическую характеристику нужно анализировать качественно и количественно. Качественный анализ позволяет получить следующую информацию: количество точек перегиба, наличие или отсутствие диспергированного режима. Количественный анализ реологической характеристики дает численные значения реологических параметров: τ_0 – предельное напряжение сдвига, μ_0 – коэффициент пластичности, имеющий размерность вязкости, μ_m – динамический коэффициент вязкости в диспергированном режиме, $\dot{\gamma}_{кр.}$ –

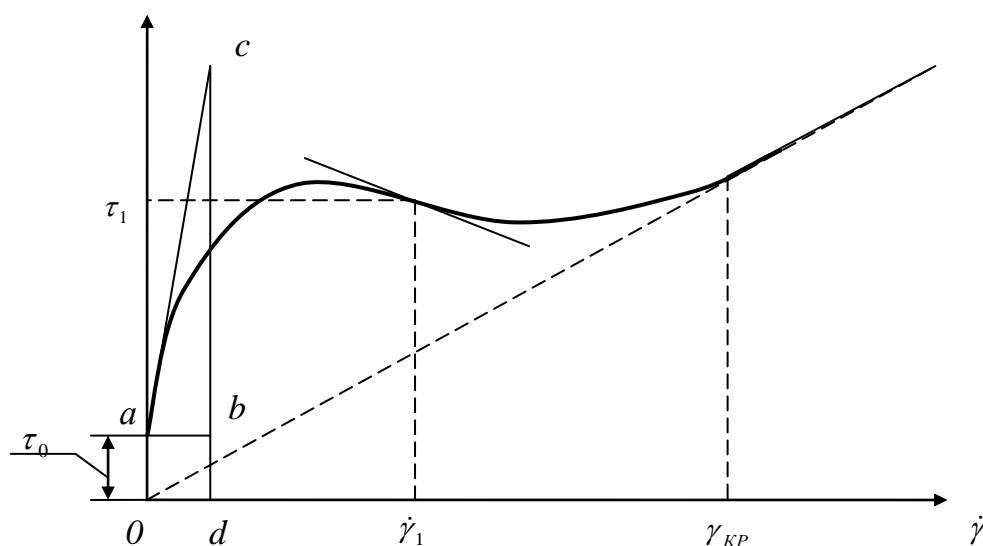


Рис. 4. Реологическая характеристика волокнистой суспензии

критическое значение градиента скорости (граница между структурированным и диспергированным состояниями) волокнистой суспензии.

$(\dot{\gamma}_1, \tau_1)$ – коор. точки перегиба; $\mu_0 = \frac{dc - \tau_0}{ab}$ – коэффициент пластичности; τ_0 – предельное напряжение сдвига; $\dot{\gamma}_{кр.}$ – критический градиент скорости;

На вискозиметре проводятся исследования влияния на параметры реологической характеристики таких факторов, как:

- концентрация волокна;
- степень помола волокна;
- длина волокна;
- вид волокна
- технологические наполнители;
- поверхностно-активные вещества и др.

Разработана методика определения степени разрушения структуры в сдвиговом потоке по реологическим характеристикам [3].

Разработана методика определения величины удельной мощности, затрачиваемой на разрушение структуры суспензии, по реологическим характеристикам [4].

4. Выводы и рекомендации

Получена реологическая характеристика для неньютоновских жидкостей. Качественный анализ показывает, что исследуемая среда обладает свойством твердого тела при условии $\tau < \tau_o$, в диапазоне градиентов скорости $0 < \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_{кр}$ вязкость суспензии является переменной величиной, она проявляет аномальные свойства. Количественный анализ реологической характеристики показывает, что численное значение динамического коэффициента вязкости суспензии в диспергированном режиме больше по величине, чем у воды,

Реологические характеристики используют для расчета и оценки диспергирующего воздействия на поток суспензии в полости напорного ящика. Реологическую характеристику можно аппроксимировать реологическим уравнением (1) по методике, разработанной О.А.Терентьевым [2].

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующие разделы:

1. Постановка задачи исследования;

2. Схема экспериментальной установки, методика эксперимента;
3. Результаты, обработка и анализ;
4. Выводы и рекомендации

Контрольные вопросы:

1. Конструкция АСНИ "Вискозиметр РВ-1"?
2. Как производится измерение скорости сдвига и момента трения в вискозиметре?
3. Как определить величину критического градиента скорости?
4. Какие режимы состояния волокнистой суспензии отражает реологическая характеристика?
5. Как определить значение динамического коэффициента вязкости волокнистой суспензии в диспергированном режиме?
6. Как определить значение коэффициента пластичности?
7. Что такое время релаксации?
8. Какие параметры содержит реологическое уравнение суспензии?
9. Как изменяется вязкость в аномальном диапазоне?
10. Как изменяются параметры реологической характеристики в зависимости от концентрации?

Библиографический список:

1. Виноградов Г.В. Малкин А.Я. Реология полимеров. [Текст] - М.: Химия, 1977, - 438 с.
2. Терентьев О.А. Гидродинамика волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве. [Текст] - М.: Лесная промышленность, 1980. - 248 с.
3. Терентьев О.А., Тотухов Ю.А., Смирнова Э.А. Способ оценки степени однородности системы вода-волокно. [Текст] //Машины и аппа-

раты целлюлозно-бумажного производства: Межвуз. сб. научн. тр./СПбГТРИ. - СПб., 1996. - 15-17 с.

4. Тотухов Ю.А., Смирнова Э.А., Энергетическая оценка влияния технологических добавок на структурообразование волокнистых суспензий. [Текст] //Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: Межвуз. сб. научн. тр./СПбГТРИ. - СПб., 1997. - 30-33 с.

Приложение

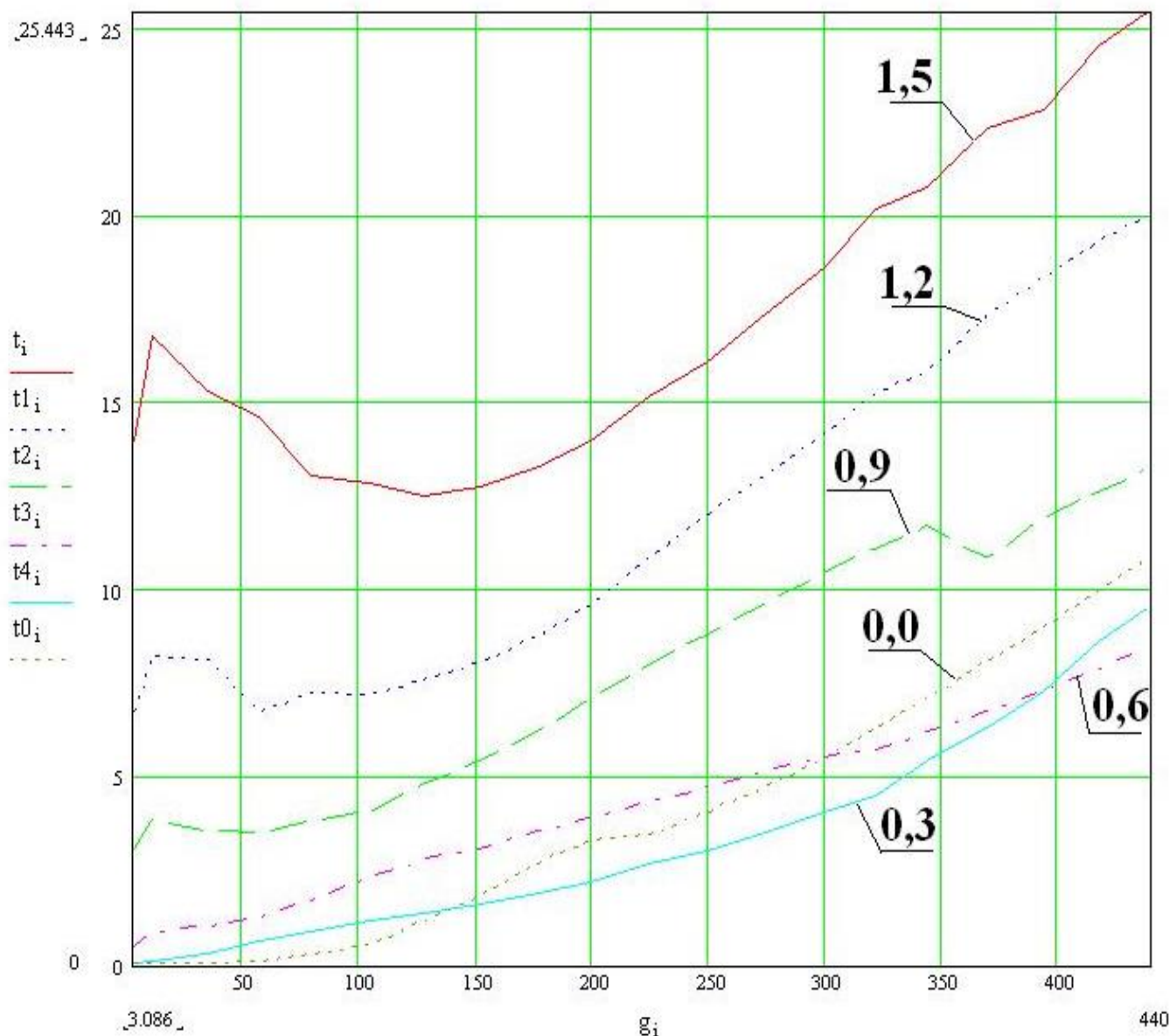


Рис. 5. Экспериментальные реологические характеристики t – касательное напряжение, Па; g – градиент скорости сдвига, с⁻¹.

Оглавление:

Лабораторная работа № 1.....	3
Предисловие.....	3
Постановка задачи исследования.....	4
Теоретическое обоснование метода исследования.....	4
Устройство и принцип работы вискозиметра.....	6
Подготовка к работе (рекомендация).....	6
Методика исследования.....	7
Результаты измерений, обработка и анализ.....	8
Выводы и рекомендации.....	9
Лабораторная работа №2.....	10
Предисловие.....	10
Постановка задачи лабораторной работы.....	11
Схема экспериментальной установки, методика эксперимента.....	16
Результаты измерений, обработка и анализ.....	17
Методика проведения эксперимента.....	17
Выводы и рекомендации.....	18
Лабораторная работа №3.....	20
Предисловие.....	20
Постановка задачи исследования.....	21
Схема экспериментальной установки, методика эксперимента.....	22
Результаты измерений, обработка и анализ.....	25
Выводы и рекомендации.....	27
Библиографический список.....	28
Приложение.....	29

Редактор и корректор В.А. Басова
Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2020 поз. 83

Подп. к печати 11.12. 2020.
Объем 1,5 уч.- л. Изд. № 83. Издание электронное