

А.В. Александров, Т.Н. Александрова

**РЕОЛОГИЯ И ГИДРОДИНАМИКА
ПРОЦЕССОВ ОТЛИВА И ФОРМОВАНИЯ
БУМАГИ**

**Часть I. Реология и гидродинамика
волоконистых суспензий**

Учебное пособие

**Санкт-Петербург
2015**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ РАСТИТЕЛЬНЫХ
ПОЛИМЕРОВ»**

А.В. Александров, Т.Н. Александрова

**РЕОЛОГИЯ И ГИДРОДИНАМИКА
ПРОЦЕССОВ ОТЛИВА И ФОРМОВАНИЯ
БУМАГИ**

**Часть I. Реология и гидродинамика
волокнистых суспензий**

Учебное пособие

**Санкт-Петербург
2015**

УДК 676.1.026 (07)

ББК Л 779

А 465

Александров А.В., Александрова Т.Н. Реология и гидродинамика процессов отлива и формования бумаги. Часть I. Реология и гидродинамика волокнистых суспензий/СПбГТУРП.- СПб., 2015.-132 с.: ил. 47. ISBN 978-5-91646-086-5

В учебном пособии рассмотрены вопросы структурообразования в потоках бумажных масс. Приведены реологическое уравнение бумажных масс, уравнение движения волокнистых суспензий. Изложены методы измерения гидродинамических характеристик потоков бумажных масс. Показано влияние конструктивных элементов напускных устройств бумагоделательных машин на организацию потоков бумажной массы и качество вырабатываемой бумаги. Рассмотрены методы оценки эффективности работы массонапускных устройств бумагоделательных машин, показаны перспективные направления совершенствования их конструкций.

Учебное пособие предназначено для студентов направлений подготовки: 151000 «Технологические машины и оборудование», 240100 «Химическая технология» и 261700 «Технология полиграфического и упаковочного производства» всех форм обучения при выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ.

Рецензенты:

В.С. Куров – проректор по научной работе СПбГТУРП, д-р техн. наук, профессор;

Б.Е. Борилкевич – генеральный директор ООО «Р – центр».

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия.

ISBN 978-5-91646-086-5

©Александров А.В., Александрова Т.Н., 2015

©Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, 2015

ВВЕДЕНИЕ

Требования интенсификации производственных процессов, оптимизации работы и повышения производительности бумагоделательного оборудования, а также повышения качества вырабатываемой бумаги при одновременном снижении массы 1 м^2 в значительной мере определяются эффективностью процессов отлива и формования бумаги. Проектирование проточных частей массонапускных систем, выбор обезвоживающих элементов формирующих устройств и оптимальная их компоновка возможны лишь на основе учета как гидродинамических условий движения бумажных масс в каналах массонапускных и формирующих систем, так и реологических характеристик используемых бумажных масс. В основу расчета напускных и формирующих устройств бумагоделательных машин должен быть положен комплексный подход, учитывающий особенности реологических характеристик бумажных масс, взаимосвязь и взаимное влияние диспергирующих и обезвоживающих возможностей конструктивных элементов начальной зоны формования. Конструктивные элементы формирующих устройств, расположенные в зоне отлива и формования, наряду с функцией обезвоживания выполняют функцию поддержания в потоке бумажной массы пульсаций давления, предотвращая возможность флокуляции волокон и обеспечивая их равномерное распределение в структуре полотна бумаги. Однако до настоящего времени в теории процесса обезвоживания бумажных масс в формирующих устройствах практически не учитывается динамика внутреннего структурообразования бумажных масс в зоне отлива и формования.

В пособии рассмотрены особенности течения бумажных масс, показана динамика внутреннего структурообразования в потоках волокнистой суспензии, приведены реологическое уравнение бумажных масс, уравнение движения волокнистых суспензий и разработанные на их основе прикладные методы расчета напускных устройств бумагоделательных машин. Приведены методы оценки работы напускных устройств, проведен анализ эффективности их работы, показаны перспективные направления совершенствования их конструкции.

1. СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ В ПОТОКАХ БУМАЖНЫХ МАСС, МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОЦЕНКИ

Практика целлюлозно-бумажного производства, научно-исследовательские работы, проведенные как в России, так и за рубежом, свидетельствуют, что структура вырабатываемой на бумагоделательных машинах бумаги определяется следующими основными факторами:

- физико-механическими свойствами бумажной массы, приобретаемыми в процессе подготовки (степень разработанности волокон, распределение волокон по длине, композиция, наличие газообразных включений, вспомогательных веществ – наполнителей, проклейки и т.п.);

- гидродинамическими и физико-химическими характеристиками потока бумажной массы (уровень турбулентности, явление флокуляции);

- условиями напуска массы на сеточный стол (конструктивные особенности массоподводящей и потокораспределительной систем, эффективность работы напускного устройства, соотношение скорости бумажной массы и скорости сетки);

- условиями обезвоживания бумажной массы на сеточном столе (конструктивные особенности обезвоживающих элементов и сеточных частей, тип и материал сеток);

- условиями процессов прессования, сушки и каландрирования.

Структура бумаги зависит не только от свойств образующих ее компонентов и сил взаимодействия между ними. Большое значение имеет характер распределения и расположения компонентов по площади и объему бумажного полотна. Процессы прессования, сушки и каландрирования не вносят принципиальных изменений в распределение массы волокон по площади листа, хотя и оказывают существенное влияние на упрочнение структуры бумаги в связи с происходящими уплотнением, усадкой, вытяжкой,

маркировкой, раздавливанием бумажного листа, а также температурными и другими воздействиями.

Обеспечение оптимальных физико-химических характеристик потока бумажной массы, оптимальных условий отлива и формования бумаги, а, следовательно, и выработка продукции с требуемыми свойствами возможны лишь на основе учета гидродинамических процессов, происходящих в массоподводящих системах, напускных и формирующих устройствах, что, в свою очередь, связано необходимостью определения полей скоростей и давлений, измерением и расчетом параметров турбулентности в потоках бумажной массы.

1.1. Влияние реологических свойств бумажных масс на формирование внутренней структуры потока

Условия оптимизации непрерывного процесса формования с целью получения бумажного полотна однородной структуры с требуемыми физико-механическими и оптическими свойствами во многом определяются условиями движения бумажных масс в массонапускных системах и начальной зоне формования.

Исследованиями российских и зарубежных исследователей: Р.Э. Рейзиня, Г.Ф. Шайдурова, О.А. Терентьева, О.А. Форгеса, С.Г. Мэзона, А.А. Робертсона и других установлено, что волокнистые суспензии даже в весьма разбавленном состоянии (менее 0,01 %) представляют собой структурированные системы, обладающие измеримой прочностью.

Механизм образования структуры и флокул является единым, последние являются как бы центрами при образовании структуры и обрывками при ее разрушении.

В основу механизма образования непрерывной волокнистой структуры положена гипотеза об ограниченном объеме для свободного вращательного перемещения волокон в суспензиях производственной концентрации, которая обычно выше критической.

Минимальными концентрациями, при которых проявляются аномальность поведения бумажных масс по сравнению с водой, по данным ВНИИБа, являются:

сульфитная беленая целлюлоза	0,008
древесная масса.....	0,05
сульфатная лиственная	0,08
сульфатная небеленая	0,116
сульфатная лиственная небеленая	0,058

В системе вода-волокно при концентрации 0,5 % в одном кубическом миллиметре суспензии содержится около 20 волокон. Это значит, что каждое волокно контактирует с большим количеством соседних волокон. Количество контактов для каждого волокна возрастает по мере увеличения концентрации волокнистой суспензии. Движение суспензии связано с защемлением и деформацией волокон, так как вероятность свободного перемещения, по гипотезе Мэзона, уменьшается с увеличением количества волокон в единице объема. При содержании волокон в единице объема выше этого предела они настолько связаны между собой, что не могут выпрямиться, и остаются в защемленном и деформированном состоянии при снятии сдвигающих усилий. В этом случае в местах контакта возникает нормальное давление, обуславливающее определенные силы трения. Волокна становятся настолько связанными между собой, что могут передавать друг другу внешнее приложенное усилие, образуя тем самым пространственную волокнистую решетчатую структуру. Таким образом, волокнистая структура образуется благодаря внутренним напряжениям волокон и главным образом в результате их механического переплетения. Механическое взаимодействие между волокнами становится определяющим при образовании структуры.

Некоторые исследователи высказываются о возможности дополнительного физико-химического воздействия между волокнами, однако этим силам отводится незначительное влияние. Даже в полимерах, имеющих длинные цепные молекулы, основной силой взаимодействия в состоянии покоя признается сила, связанная с механическим переплетением молекул. В волокнистых суспензиях, где активность взаимодействия между собой ниже, чем в полимерах, естественно отдать предпочтение механическим силам сцепления [1].

Ряд исследователей высказывается о возможности сольватного структурообразования. Однако для дисперсных

систем, состоящих из асимметричных частиц, характерным является коагуляционное структурообразование. Естественные волокна имеют длину $0,05 \cdot 10^{-3} - 0,5 \cdot 10^{-3}$ м при толщине $0,001 \cdot 10^{-3} - 0,07 \cdot 10^{-3}$ м, поэтому силы сцепления механического переплетения следует считать преобладающими.

Поведение суспензий, образованных волокнами сульфитной хвойной целлюлозы при движении в длинных стеклянных трубах диаметром $8,25 \cdot 10^{-3}$ м, исследовалось Форгесом О.А., Робертсоном А. А. и Мэзоном С. Г. [2]. Анализируя кривые изменения коэффициента трения $f = \frac{\Delta P \cdot D}{2L\rho U^2}$ в зависимости от изменения

скорости сдвига для сульфитной целлюлозы (рис.1), исследователи, по аналогии с движением воды, выделяет три режима движения волокнистой суспензии: ламинарный (стержневой), смешанный (переходный) и турбулентный, полагая, что такие же режимы течения существуют и для других волокнистых суспензий, обладающих структурой.

На рис. 1 видно, что кривая течения суспензии имеет ряд точек, определяющих характерные особенности внутренней структуры потока при различных скоростях движения суспензии. В соответствии с этими точками выделяют три режима течения, отмеченных цифрами 1, 2 и 3.

Первый режим – ламинарное или стержневое течение (участков А-В-С). На участке В-С у стенок трубы наблюдается слой чистой воды с ламинарным течением, не содержащий волокон. Ядро потока образует стержень из переплетенных волокон, не имеющих движения относительно друг друга. Градиент скорости наблюдается только в слое чистой воды, при этом максимальная толщина слоя наблюдается у точки С. При очень низких скоростях движения (участок АВ), когда слой воды очень тонкий, наблюдается трение отдельных волокон о стенки трубы и друг о друга, что приводит к скатыванию хлопьев по стенке и соответствующему увеличению коэффициента трения.

Второй режим – смешанное течение (участок СД). В этом случае в пристенном слое течение становится нестабильным и преобладает турбулентность. Турбулентные вихри отрывают волокна от основного стержня, находящегося по-прежнему в ядре потока. Таким образом, слой чистой воды у стенок исчезает,

превращаясь в суспензию, а в центре потока движется стержень из переплетенных волокон, имеющий, однако, меньший диаметр, чем в случае ламинарного течения.

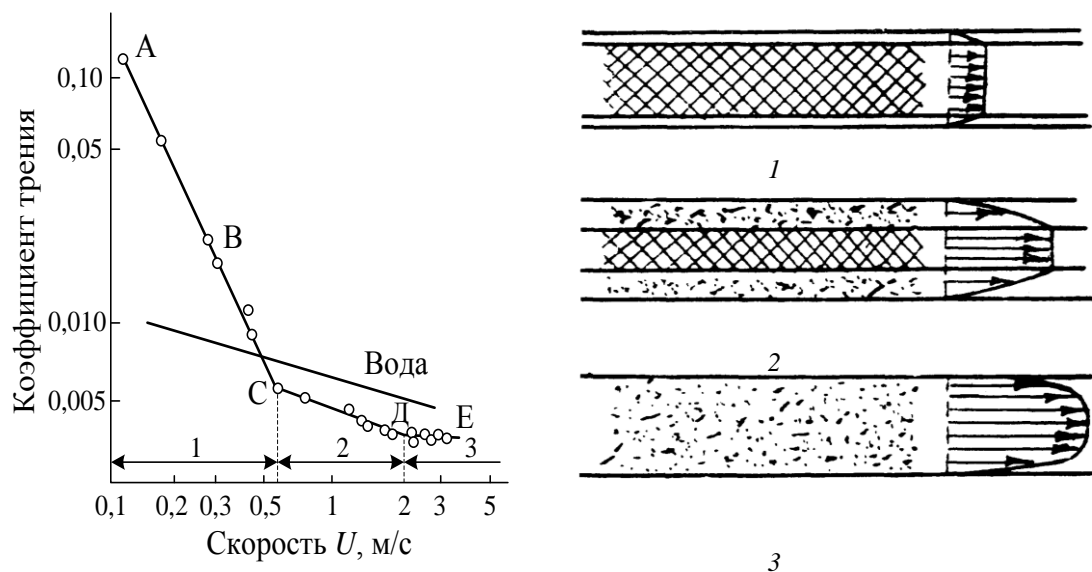


Рис. 1. Результаты экспериментальных исследований движения суспензии сульфитной целлюлозы

Третий режим – турбулентное течение (участок от точки Д и далее с повышением скорости). В этом случае турбулентные вихри разрушают волокнистый стержень и движение полностью становится турбулентным. Величина коэффициента трения практически становится постоянной независимо от скорости потока.

Отмеченные особенности характера движения волокнистых суспензий необходимо учитывать при проектировании подводящих массопроводов и конкретных проточных частей напорных ящиков. Из рис. 1 видно, что при достаточно низких скоростях движения коэффициент трения для волокнистой суспензии значительно выше, чем для чистой воды, и, следовательно, расчетные формулы гидравлики ньютоновских жидкостей будут неприемлемы в данном случае. Данные А. А. Робертсона и С. Г. Мэзона имеют большую научную и практическую ценность, однако, поскольку они были получены на трубках малого диаметра, где значительное влияние оказывает пристенный слой, необходима их проверка на каналах,

соответствующих рабочим каналам реальных напорных ящиков.

Исследование динамики внутреннего структурообразования в потоках бумажных масс в каналах промышленного масштаба проведены в Санкт-Петербургском государственном технологическом университете растительных полимеров [1]. На рис.2 приведены результаты трансформации структуры потока суспензии сульфитной целлюлозы с повышением скорости движения. Наблюдения проведены на участке установившегося движения в прозрачной цилиндрической трубе диаметром 58 мм.

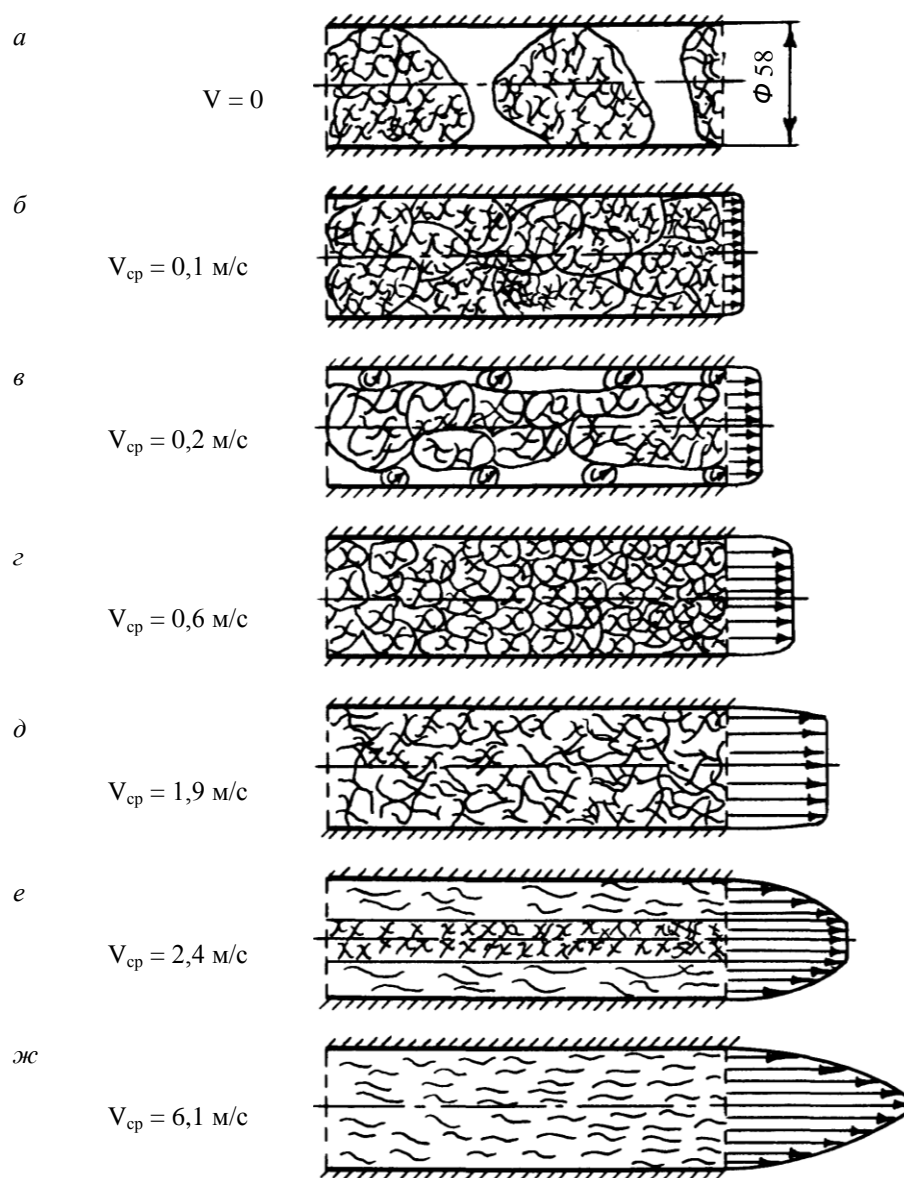


Рис. 2. Изменение структуры потока волокнистой суспензии (сульфитная беленая целлюлоза $C = 1,0$ %; 30^0 ШР) с увеличением скорости)

В неподвижном состоянии (рис.2а) волокнистая суспензия представляет собой двухфазную среду с явно выраженными составляющими. Волокна образуют крупные соединения (коагуляции), между которыми находятся прослойки чистой воды. Коагуляции волокон стоят в виде пробок, плотно прилегающих к стенкам трубы. Образуется сцепление волокон со стенками каналов. Чтобы заставить начать двигаться такую суспензию, необходимо приложить начальный напор h_0 .

В начале движения (рис.2б) коагуляции волокон отрываются от стенок, вытягиваются в направлении потока и разбиваются на крупные флоккулы, которые медленно идут по потоку, заполняя все сечение канала.

Прослойка чистой воды не наблюдается, а поток напоминает клубы дыма. Виден явно выраженный стержневой поток. Дальнейшее увеличение скорости (рис.2в) вызывает появление прослойки чистой воды у стенок канала. Стержень из крупных волокон уплотняется в радиальном направлении. Между стержнем и слоем чистой воды возникает резкий градиент скоростей. Под действием градиента скорости на границе стержня отдельные волокна отрываются от основного стержня и попадают в слой чистой воды. Здесь они приобретают вращательное движение под действием градиента скоростей в самом слое чистой воды. В итоге поток суспензии при этом режиме движения представляет собой явно выраженную двухфазную среду. Стержень из крупных флоккул движется внутри трубы, скользя по слою чистой воды, в которой перекачиваются автономными шариками вышеупомянутые отдельные волокна, вырванные из стержня (рис.2в).

С увеличением скорости потока возрастает давление со стороны слоя чистой воды на стержень. Стержень сжимается, прослойка чистой воды у стенки канала растёт. Боковое сжатие стержня вызывает увеличение сдвиговых усилий внутри стержня, кроме того, с увеличением скорости возрастают силы трения стержня о слой чистой воды. В итоге внутри стержня начинают интенсивно развиваться силы, действующие как поперек, так и вдоль стержня. Эти силы приводят к разрушению наиболее слабых связей внутри крупных флоккул. В результате стержень из крупных

флокул разрушается и образуется стержень из более мелких флокул, который заполняет все сечения канала, поглощая прослойку чистой воды у стенок (рис.2г). Таким образом, в потоке волокнистой суспензии осуществляется состояние динамического равновесия между внешними силами и силами связи между волокнами. Внешние силы определяются гидравлическими характеристиками потока, силы связи между волокнами - силами механического сцепления, а также физико-химическими связями. Величина и интенсивность гидравлических сил в потоке определяет степень диспергированности волокнистой суспензии. Гидравлические силы в потоке пропорциональны величине скорости потока. С увеличением скорости они возрастают.

На рис.2д показана структура потока волокнистой суспензии при дальнейшем увеличении скорости потока. Как видно, флокулы в потоке исчезли, однако остались еще узелки волокон, которые, цепляясь друг за друга, образуют по-прежнему стержень в потоке, о чем свидетельствует равноскоростная форма эпюры скоростей. Однако этот стержень отличается от предыдущего (рис.2г) большей диспергированностью. В стержне действуют только самые прочные силы связи между волокнами, для разрушения которых еще недостаточно тех гидравлических сил, которые характерны для данной скорости движения. Дальнейшее увеличение скорости приводит к разрушению и этих последних, наиболее прочных, связей между волокнами (рис.2е). Причем разрушение стержня начинается с периферии стержня, т.е. у стенок канала. В этом месте потока наибольший градиент скоростей, а следовательно, наибольшие гидравлические силы трения. Остатки стержня остаются в центре потока. Полное разрушение стержня происходит при достаточно высокой скорости потока (рис.2ж). Ни флокул, ни узелков в потоке больше не наблюдается. Все волокна ориентируются в направлении потока. Эпюра скоростей имеет параболический характер.

Рассмотренная нами динамика изменения структуры потока волокнистой суспензии приведена для сульфитной целлюлозы концентрацией $C = 1,0 \%$ при градусе помола 30° ШР. Аналогичная картина наблюдается и для других волокнистых суспензий, отличающихся от указанной концентрацией и композицией. Принципиально процесс структурообразования повторяется.

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на формирование бумаги, является степень однородности суспензии волокон в воде. Предрасположенность суспензированных в воде целлюлозных волокон к хлопьеобразованию является одной из причин плохого качества получаемой продукции. Опыт эксплуатации бумагоделательных машин показывает, что даже однородная суспензия, будучи обезвоженной, может дать лист с облачным просветом, а из суспензии, содержащей большое количество хлопьев, всегда получится лист еще худшей структуры. Установлено также, что в толстых отливках можно иногда обнаружить на просвет намного меньше хлопьев, чем в исходной суспензии. В листе происходит определенное перемешивание хлопьев, вызванное гидродинамическими силами, возникающее в ходе упрочнения бумажного полотна. На формирование бумажного полотна волокнистая суспензия может быть подана свободной от хлопьев лишь в том случае, если срезающие усилия потока преобладают над суммарными силами сцепления решетки. Прочность волокнистой решетки зависит от большого количества факторов, преобладающими среди которых являются концентрация и природное происхождение волокон. Так, длинноволокнистая масса образует более прочную решетку по сравнению с коротковолокнистой и поэтому для уничтожения хлопьев из такой массы приходится затратить энергии больше, чем в случае с коротковолокнистой массой. Кроме концентрации массы на интенсивность хлопьеобразования влияют свойства самих волокон, степень разработанности (фибрильность), гибкость, химическая природа и т.д. Различные виды целлюлозы по одним данным располагаются по убыванию склонности к хлопьеобразованию в следующей последовательности: сульфитная небеленая, сульфатная целлюлоза, сульфатная беленая, сульфитная беленая, хлопок, лен. Противоречивость этих данных связана не только с недостаточной изученностью этого явления, но в значительной мере и с действием других факторов, оказывающих различное влияние в зависимости от условий.

Что касается влияния на хлопьеобразование степени помола, то исследования О.А. Терентьева показали, что высокая степень помола обеспечивает волокнам высокую гидрофильность,

вследствие чего силы механического сцепления волокон уменьшаются и ослабляется флокуляция.

Флокуляция массы зависит от ее температуры. С повышением температуры вследствие снижения вязкости среды флокуляция растет. Для уменьшения хлопьеобразования применяются различные химические добавки – карбоксиметилцеллюлоза, полифосфаты и др. В отдельных случаях, отмечает ряд исследователей, флокуляция оказывает положительное влияние на сомкнутость, связанность и однородность листа.

Основной причиной разрушения флокул являются турбулентные напряжения и напряжения, обусловленные градиентами сдвига в потоке бумажной массы. Интенсивность турбулентности в потоке должна быть достаточно велика, и напряжения турбулентного трения - превышать прочность волокнистой структуры, а длина волны турбулентности - достаточно мала и соизмерима с размерами флокул и отдельных волокон.

Прочность и размеры флокул зависят от тех же факторов, что и склонность волокон к флокуляции. Зависимость прочности флокул от концентрации и композиции применяемой бумажной массы показана на рис.3. На рис.4 приведены данные, показывающие величины возникающих в структуре напряжений в зависимости от величины прилагаемых нагрузок.

Проведенные исследования свидетельствуют о наличии тесной взаимосвязи между степенью флокулообразования в потоке и режимом движения бумажной массы. В процессе движения при увеличении скорости структура потока суспензии трансформируется от структурированного состояния к диспергированному. При этом волокнистая структура распадается на отдельные сгустки волокон – флокулы, движущиеся вместе с потоком и разрушающиеся при увеличении скорости.

При уменьшении скорости движения потока бумажной массы увеличивается количество этих локальных сгустков волокон и их размеры, т.е. система находится в динамическом равновесии.

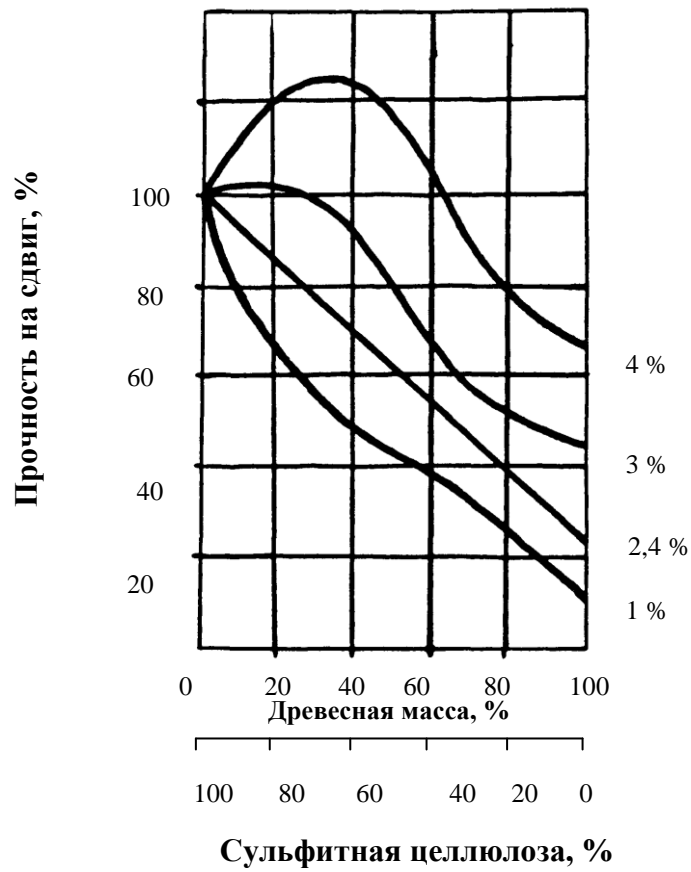


Рис.3. Зависимость прочностных характеристик флокулы от концентрации и композиции бумажной массы

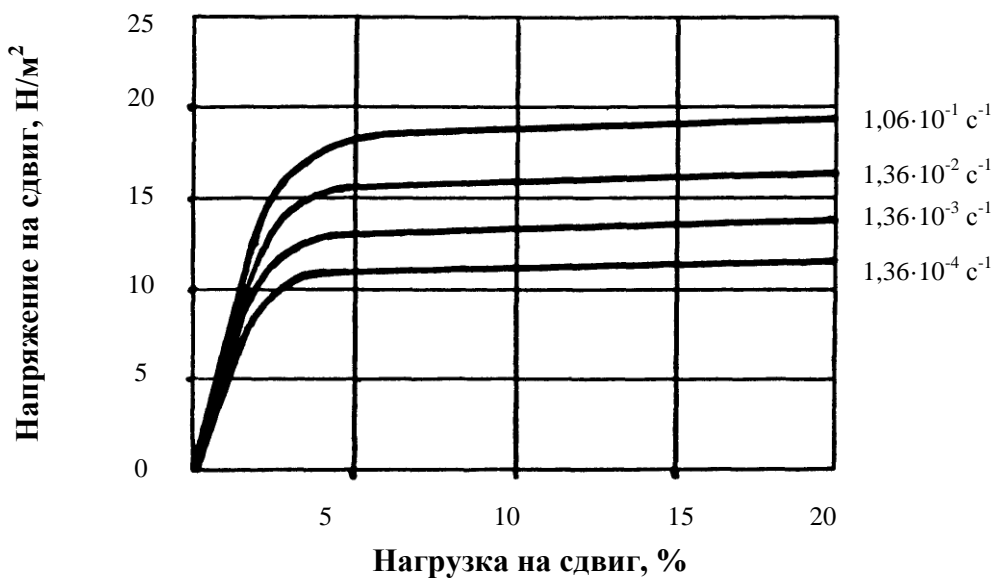


Рис.4. Прочностные характеристики флокулы

Проведенные исследования показывают, что даже полностью

диспергированные волокна при скорости течения 0,5 м/с вновь коагулируют с образованием флокул. Волокнистую суспензию, прошедшую через перфорированный вал напорного ящика, не представляется возможным подавать на большие расстояния без повторного флокулообразования. График зависимости степени хлопьеобразования от времени при снижении скорости потока от 1,15 до 0,35 м/с, полученный Ф. Е. Глобусом [3], приведен на рис.5.

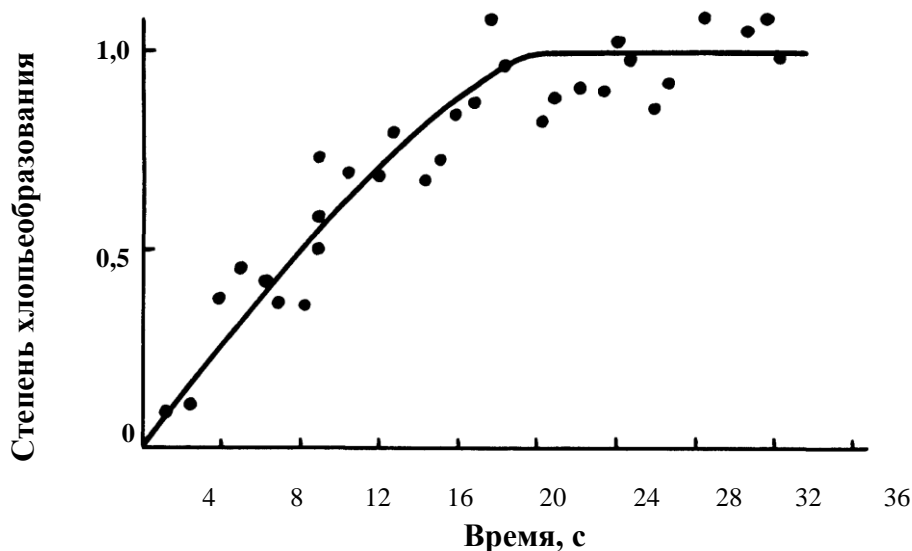


Рис.5. Изменение степени флокуляции при снятии диспергирующего воздействия

Концентрация используемой суспензии – 0,2 %. Исходная степень флокуляции условно принята за 0, конечная – 1. Весь процесс длится около 21 секунды, причем в первые 16 секунд зависимость имеет прямолинейный характер. Дальнейшее усиление хлопьеобразования характеризуется затухающей кривой. Таким образом, с увеличением длительности выдержки массы перед отливом бумаги в ней разливаются процессы коагуляции, флокулообразования и осаждение флокул. В результате структура бумаги ухудшается, что заметно по усилению контрастности облачности. Одновременно с этим ухудшаются и механические характеристики бумаги.

На условия формирования бумажного полотна оказывает влияние наличие воздуха в массе (в виде пузырьков и в связанном виде). Присутствие воздуха в суспензии может явиться причиной

неоднородности массового потока, что приводит к увеличению колебаний массы 1 м^2 бумажного полотна, облачности структуры, ухудшению прочностных и других показателей. В связи с этим в последние годы получают распространение специальные устройства для деаэрации массы – форварки, вихревые вакуумные деаэраторы и декулаторы. Большую роль в процессе формирования имеет пенообразование, связанное с физическими и коллоидно-химическими процессами, происходящими на границах раздела между твердой и газовой фазами бумажной массы. Пенообразование в целлюлозно-бумажном производстве имеет различные причины: действие смоляного мыла, наличие лигнина и некоторых производных целлюлозы, а также натуральной смолы в древесной массе и целлюлозе, действие некоторых красителей. В результате ухудшаются условия формования, повышается неоднородность структуры бумаги, появляются проколы, увеличивается обрывность. Для борьбы с пенообразованием используются различные средства, в том числе поверхностно-активные вещества.

Таким образом, анализ представленных данных свидетельствует о тесной связи гидродинамических параметров течения с процессом диспергирования волокнистых суспензий и структурой получаемого бумажного полотна и тем самым о возможности управления процессом структурообразования в зоне отлива и формования с целью предотвращения флокуляции и обеспечения равномерного распределения волокон в структуре бумаги путем создания и регулирования величины диспергирующих напряжений, определяющих разрушение волокнистой структуры.

1.2. Гидродинамический стенд для моделирования движения бумажной массы в массонапускных и формирующих устройствах бумагоделательных машин

Экспериментальные исследования по моделированию движения суспензий проводились на гидродинамическом стенде, принципиальная схема которого приведена на рис.6.

Стенд предназначен для экспериментального исследования процессов структурообразования в массонапускных и формующих устройствах, а также для выявления корреляции между пульсациями давления и концентрации в потоках волокнистой суспензии в массонапускных и формующих устройствах и неравномерностью распределения массы 1 м^2 в структуре бумаги.

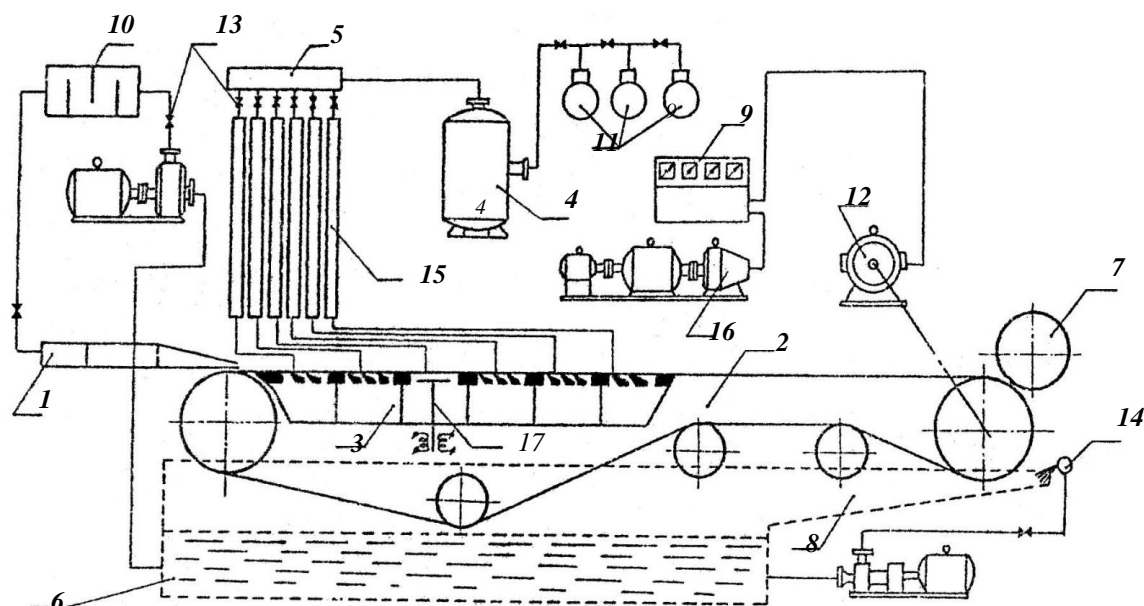


Рис.6. Схема экспериментального формующего устройства:
 1 – напорный ящик; 2 – сеточный стол; 3 – формующая секция; 4 – ресивер; 5 – коллектор; 6 – бассейн массный; 7 – прижимной валик; 8 – поддон; 9 – пульт управления; 10 – уравнивательный бак; 11 – вакуумнасосы; 12 – приводной электродвигатель; 13 – регулировочные задвижки; 14 – спрыски; 15 – барометрические трубы; 16 – система ГД; 17 – пластина-диспергатор

Стенд обеспечивает проведение исследований как процессов структурообразования в потоках бумажной массы в каналах массонапускных систем, так и условий отлива и формования бумаги в формующих устройствах. Конструкция экспериментальной установки по всем масштабам, кроме ширины,

соответствует современным промышленным образцам. Конструкция экспериментального массонапускного устройства позволяет воспроизводить основные конструкции существующих напорных ящиков и подавать в зону отлива и формования поток бумажной массы с требуемыми гидродинамическими параметрами. Все исследуемые каналы изготовлены из органического стекла, что позволяет проводить фотографические и визуальные исследования потоков.

Для исследования влияния работы обезвоживающих и диспергирующих элементов конструкция сеточного стола позволяет воспроизводить основные схемы плоскосеточных устройств. Ширина сетки составляет 0,66 м. Регулируемый электропривод позволяет изменять скорость движения сетки в диапазоне от 0 до 7 м/с. Заранее подготовленная волокнистая суспензия заливается в массный бассейн 6. Из массного бассейна суспензия двумя массными насосами марки НМ-100 производительностью 105 м³/ч каждый подается в уравнильный бак 10. Уравнильный бак имеет две внутренние перегородки, предназначенные для перемешивания суспензии и демпфирования пульсаций давления от работы насосов. Из уравнильного бака суспензия подается в напорный ящик 1, конструкция которого позволяет исследовать широкий диапазон диспергирующих элементов (перфорированных плит и валов, различных насадок и диспергирующих секций) при различной скорости напуска и скорости потока на трассе массонапускного устройства. Ширина массонапускного устройства 0,5 м.

Для измерения осредненных и пульсационных составляющих скорости по трассе массонапускного устройства были установлены втулки, снабженные приспособлениями для крепления координатных устройств с соответствующими датчикам. Отлив и формование полотна в формующем устройстве осуществляется на блоке отсасывающих ящиков с гидропланками, установленными с возможностью изменения угла их наклона относительно сетки. Конструкция сеточного стола позволяет осуществлять быструю замену и перекомпоновку обезвоживающих элементов. Вакуум в отсасывающих ящиках поддерживается двумя вакуум-насосами марки ВН-7Г. Суммарная производительность вакуум-насосов составляет $8,3 \cdot 10^{-2}$ м³/с, глубина вакуума 58,84 кПа. Каждый из

отсасывающих ящиков соединяется при помощи патрубков с барометрическими трубами 15, подключенными через коллектор 5 и ресивер 4 к вакуум-насосам 11. Глубина вакуума в отсасывающих ящиках регулировалась вентилями, установленными на соединительных патрубках. С целью обеспечения выхода установки на стабильный режим работы предусматривалась возможность работы установки в замкнутом режиме. При этом сформированное полотно бумаги снималось шаберами с обратной стороны сетки, а затем спрыском 14 смывалось в массный бассейн. Объем массного бассейна 6 м³. После выхода установки на режим сформированное и обезвоженное до сухости 10 % бумажное полотно снималось на сукно, привод которого синхронизирован с приводом сетки. Привод установки осуществлялся двигателем постоянного тока марки ПМ 810М-5.

Исследование влияния виброактивации потока бумажной массы осуществлялось с помощью электродинамического вибратора ВЭДС-10А, подключавшегося к обезвоживающим элементам. Виброускорение обезвоживающих элементов замерялось блоком измерения вибраций, входящим в комплект вибростенда ВЭДС-10А. При работе установки осуществлялся замер эпюр скоростей в каналах массонапускного устройства с помощью скоростных насадков, работающих с «начальным» противодавлением, замерялись пульсации давления и концентрации в потоке бумажной массы как на трассе массонапускного устройства, так и в зоне отлива и формования бумаги.

Для исследований использовались суспензии сульфитной небеленой целлюлозы марки Ж-4; сульфитной беленой целлюлозы марки В-2; сульфитной лиственничной целлюлозы марки В-2; бумажной массы, применяемой для выработки газетной бумаги марки В; бумажной массы, применяемой для выработки писчей бумаги марки 2-Б.

Экспериментальный гидростенд позволяет воспроизводить основные конструкции существующих массонапускных устройств, оценить эффективность воздействия различных конструкций диспергирующих и обезвоживающих элементов на поток бумажной массы и выработать рекомендации по оптимальной компоновке массонапускных и формирующих устройств в зависимости от

условий их эксплуатации.

1.3. Измерение осредненных и пульсационных скоростей в потоках бумажных масс

Использование традиционных методов измерений полей скоростей и давлений в потоках волокнистых суспензий затруднено присутствием в потоке волокон целлюлозы, наполнителей и проклеивающих веществ, что приводит к нависанию волокон на датчиках или забиванию мерительных отверстий.

В настоящее время в практике научно-исследовательских работ ЦБП широко применяется методика измерения осредненных скоростей и давлений различного рода зондами и скоростными насадками, работающими с начальным противодавлением. Для устранения возможности забивания мерительных отверстий необходимо, чтобы в момент введения зонда в исследуемый поток бумажной массы давление в нем превышало давление в исследуемой точке потока. При исследовании потоков в проточных частях массоподводящих и массонапускных систем в качестве начального противодействия используется давление воды водопроводной системы. Избыточное давление контролируется блоком пьезометров или блоком манометров в зависимости от необходимого противодействия. Если необходимо небольшое противодействие (в случае малых давлений в потоке бумажной массы), подключается блок пьезометров, а блок манометров отключается.

В результате измерений вносят поправки на систематические погрешности, вызванные эффектом капиллярности и изменением ускорения свободного падения в зависимости от широты местности. Поправки на изменение ускорения свободного падения и температурные изменения длины шкалы и плотности рабочей жидкости вносят лишь при значительных изменениях указанных величин.

При избыточном начальном противодавлении происходит истечение чистой воды из мерного отверстия в поток бумажной

массы. Это является показателем того, что давление в измерительной схеме выше, чем в мерной точке. Величина избыточного давления фиксируется пьезометрами или манометрами. При проведении замеров тщательно выверяется пространственная ориентация зонда в мерном сечении и точно фиксируется начальное положение с помощью универсального координатника. Затем противодавление отключается соответствующими зажимами на линии подачи воды. Под действием избыточного давления оставшейся воды в пьезометрах происходит перетекание чистой воды из зонда в поток. Перетекание чистой воды продолжается до тех пор, пока давление в измерительной схеме и мерной точке потока не уравниваются. Поскольку давление в измерительной схеме не может упасть ниже давления в мерной точке потока, зонд не засоряется, и схема измерений работает достаточно надежно.

В каждой мерной точке зонд выставляется в два положения: отверстием против потока – для измерения полного напора (h_n) и отверстием по потоку – для замера статического напора (h_{cm}).

При перемещении зонда в следующую точку противодавление подается вновь, и операция замера повторяется. По разности показаний между двумя положениями зонда в каждой мерной точке определяется величина скоростного напора

$$\Delta h_{ck} = h_n - h_{cm}.$$

Величина скорости определяется по формуле

$$V = \sqrt{2gK\Delta h_{ck}},$$

где K – тарировочный коэффициент зонда; g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

При обработке результатов измерений по указанным выше формулам вычисляются местные скорости. В случае, если имеются отклонения в величине расхода, полученные скорости приводятся к постоянному расходу (путем пропорционального пересчета).

Существует ряд методов для измерения турбулентных

пульсаций давления в потоках жидкостей и газов: термоанемометрические, оптические и электрохимические методы, метод обтекания специальных профилей, методы меченых потоков, метод измерения пульсаций преобразователями давления и т. д.

Не представляется возможным использование термоанемометров для измерения турбулентных пульсаций ввиду налипания волокон на нити датчиков. Оптические методы пригодны, главным образом, для прозрачных сред. Электрохимический метод основан на изменении диффузионного тока при прохождении между двумя электродами турбулентных объемов. Измерение характеристик ведется в чистой воде при постоянном рН среды. Наиболее приемлемыми при измерении турбулентных пульсаций давления в потоках бумажных масс являются преобразователи давления. Существует целый ряд датчиков давления: тензометрические, индуктивные, емкостные, магнитострикционные, пьезоэлектрические и т. д. В практике исследований турбулентных потоков бумажных масс широкое применение нашли пьезоэлектрические датчики, обладающие следующими достоинствами: широкий диапазон измерений по частоте и интенсивности, малые габариты, простота конструкции, низкий коэффициент затухания сигнала, устойчивость к внешним помехам, способность работать в загрязненных потоках. В основе работы датчиков лежит прямой пьезоэффект.

Пересчет от пульсаций давления P' к пульсациям скорости U' осуществляется по формуле

$$U' = \frac{P'}{\rho \cdot \bar{U}},$$

где \bar{U} - осредненная скорость потока; ρ - плотность среды.

Принципиальная схема измерений и блок-схема измерительной аппаратуры представлены на рис.7.

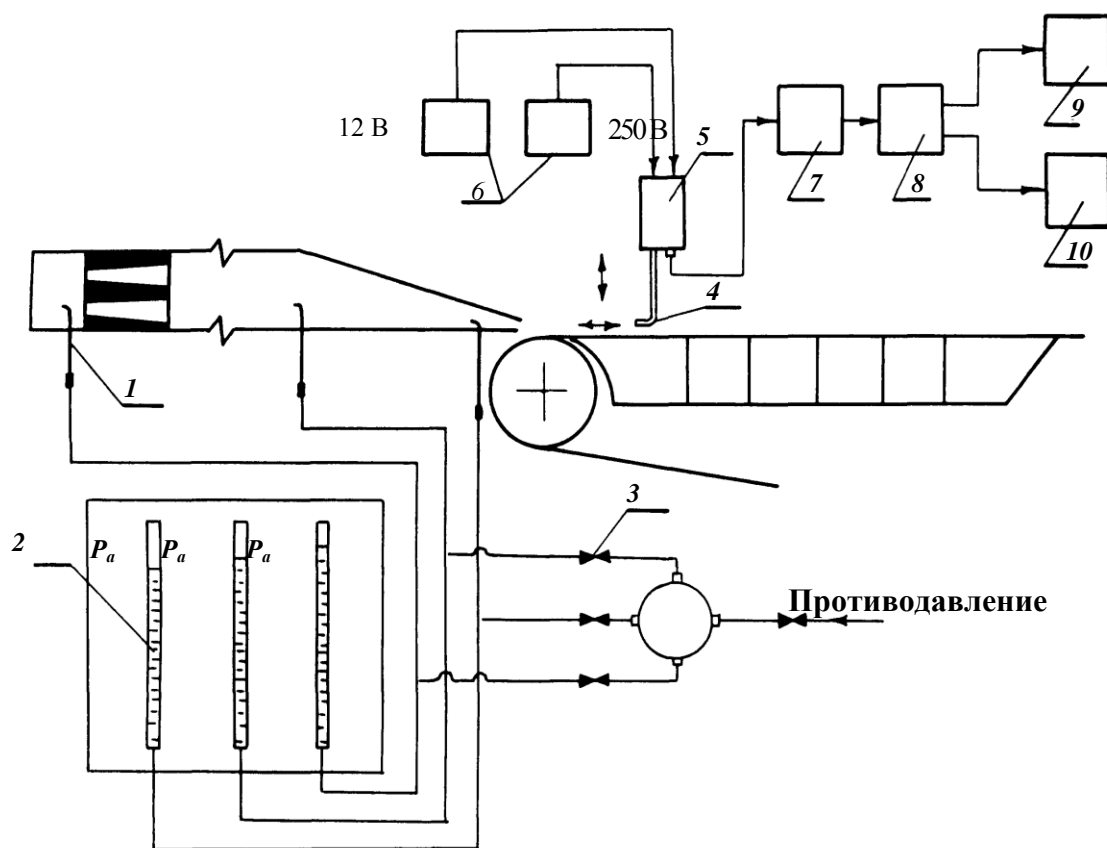


Рис.7. Принципиальная схема измерения осредненных и пульсационных скоростей в потоках бумажных масс: 1 – скоростной насадок; 2 – блок пьезометров; 3 – зажимы; 4 – датчик пульсаций давления; 5 – предварительный усилитель; 6 – блоки питания; 7 – усилитель переменного напряжения; 8 – осциллограф; 9 – частотный анализатор; 10 – самописец

Сигнал с датчика пульсаций давления 4 поступает на предварительный усилитель 5, далее на окончательный усилитель 7 и анализатор спектра частот 9. Для обеспечения достоверности измерений размер чувствительного элемента датчика не должен превышать размеров измеряемых вихрей.

Длина волны λ , частота f и осредненная скорость \bar{U} связаны между собой известным соотношением

$$\lambda = \frac{\bar{U}}{f}.$$

При скорости потока бумажной массы $\bar{U} = 4$ м/с и диаметре датчика $4 \cdot 10^{-3}$, считая, что длина регистрируемой волны не может превышать его, измеряемый диапазон частот

$$f = \frac{\bar{U}}{\lambda} = \frac{4,0}{0,004} \leq 1000 \text{Гц}.$$

Отсюда следует, что чем выше осредненная скорость потока в измеряемом сечении и меньше диаметр чувствительного элемента, тем выше уровень частот при анализе, для которого можно считать результаты достаточно достоверными.

Величина сигнала после усиления определяется по формуле

$$\mathcal{E} = K_g \cdot K_y \cdot P'.$$

Спектр пульсаций давления

$$P_{(f)} = \frac{\mathcal{E}_{(f)}}{K_g \cdot K_y \cdot K_a},$$

где K_g – тарировочный коэффициент датчика; K_y – коэффициент усиления; K_a – тарировочный коэффициент анализатора.

Спектр пульсаций скорости определяется по формуле

$$U'_{(f)} = \frac{\mathcal{E}_{(f)}}{\rho \cdot \bar{U} \cdot K_a \cdot K_g \cdot K_y}.$$

Энергия пульсационной продольной составляющей скорости

$$e_{(f)_a} = \frac{U'^2_{(f)}}{2} = \frac{\mathcal{E}^2_{(f)}}{2\rho^2 \cdot \bar{U}^2 \cdot K_a^2 \cdot K_g^2 \cdot K_y^2}.$$

Если при измерениях наблюдается интенсивная вибрация, необходимо применение специальных датчиков, подавляющих вибрационную составляющую.

1.4. Измерение локальных концентраций волокон в потоках бумажных масс

Основными гидродинамическими факторами, определяющими равномерность распределения волокон в потоке бумажной массы, являются градиенты давлений и энергия турбулентных пульсаций. Уровень турбулентных пульсаций определяется формой проточных частей массоподводящей и массонапускной систем, видом используемых диспергирующих элементов и расстоянием установки этих элементов от напускной щели. Структура потока, подаваемого в зону отлива и формования бумаги, формируется всей проточной частью напорного ящика, и нестабильность работы того или иного элемента напорного ящика приводит к перераспределению концентрации волокон в потоке, что является причиной неравномерного распределения массы 1 м^2 вырабатываемой бумаги. Таким образом, становится очевидной при создании новых и отработке существующих конструкций напускных и формующих устройств необходимость контроля как турбулентных характеристик потока, так и равномерности концентрации волокон в потоке.

Для определения равномерности распределения волокон как в потоке бумажной массы, так и в полотне бумаги, широко используются оптические методы контроля. Так, для определения трехмерных характеристик потока волокнистой суспензии применяется метод стереофотограмметрии (рис.8), позволяющий рассчитать силы воздействия на флоккулы. Однако данный метод не позволяет исследовать поток бумажной массы в зоне отлива и формования из-за невозможности установки осветителя и камеры на сеточном столе БДМ.

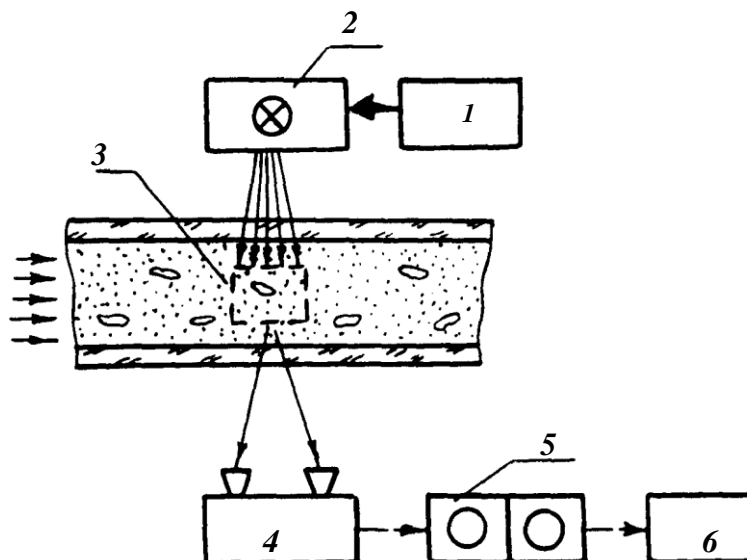


Рис.8. Схема исследования потока бумажной массы методом стереофотограмметрии: 1 – программируемый распределитель импульсов; 2 – блок импульсного освещения; 3 – исследуемый участок полотна; 4 – стереофотокамера; 5 – стереокомпаратор; 6 – ЭВМ

В настоящее время для измерения размеров структурных неоднородностей в потоках бумажных масс широкое распространение получают оптические методы с использованием лазеров.

На рис.9 приведена схема лазерного анализатора, позволяющего измерять размер структурных неоднородностей в потоке бумажной массы непосредственно на бумагоделательной машине.

Развитие волоконной оптики позволило разработать новые конструкции устройств для измерения локальных концентраций в потоках бумажных масс. Широкое применение для измерения концентрации волокон бумажной массы в отраженном от волокон свете нашли датчики, выполненные с использованием волоконной оптики.

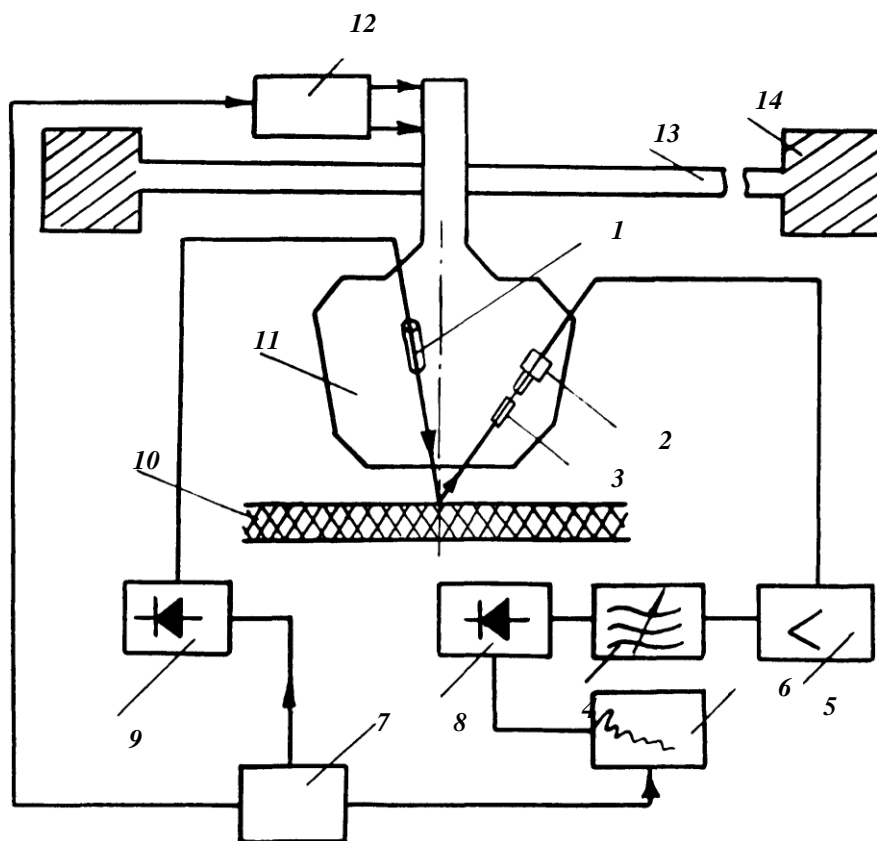


Рис.9. Блок-схема лазерного анализатора структурных неоднородностей: 1 – лазер; 2 – фотодетектор; 3 – светофильтр; 4 – измеритель средней составляющей «облачности»; 5 – усилитель; 6 – самописец; 7 – блок автоматики; 8 – выпрямитель; 9 – источник питания лазера; 10 – исследуемый участок; 11 – корпус; 12 – привод; 13 – направляющая штанга; 14 – опоры

Флокуляция в потоке волокнистой суспензии измерялась путем замера концентрации волокон в сравнительно небольшом объеме, при этом отмечалось, что измерительный объем не должен быть слишком малым – иначе сигналом будет импульс от каждого отдельного волокна, проходящего через измерительный объем. Дальнейшее развитие данный метод получил в работах отечественных исследователей при изучении процессов структурообразования в потоках бумажных масс. Преимущества данного метода измерения концентрации бумажных масс заключается в следующем:

- возможности измерения локальных концентраций как в массоподводящих, так и в формирующих устройствах;
- возможности оперативного контроля равномерности распределения волокон в потоках бумажных масс;
- простоте аппаратного оформления.

Таким образом, для экспериментального исследования процессов структурообразования бумажной массы в процессе напуска на сеточную бумагоделательной машины целесообразно использовать метод измерения локальных концентраций в потоке бумажных масс с применением стекловолоконной оптики.

На рис.10 представлена схема измерений и блок-схема регистрирующей аппаратуры для измерения локальной концентрации волокон в потоке бумажных масс с использованием волоконной оптики.

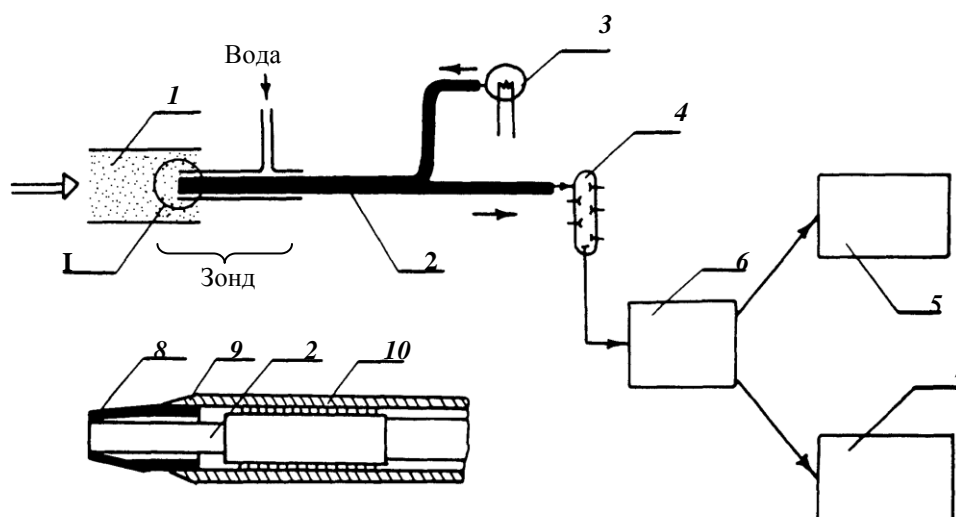


Рис.10. Схема измерений и блок-схема регистрирующей аппаратуры: 1 – бумажная масса; 2 – световоды; 3 – лампа накаливания; 4 – фотоумножитель; 5 – амплитудный анализатор; 6 – усилитель сигнала; 7 – частотный анализатор; 8,9 – бронзовые втулки; 10 – направляющие с винтовыми канавками

Световоды в датчике разветвляются таким образом, что светопроводящие волокна каждой из ветвей беспорядочно распределяются в основном световоде. Свет, излучаемый в поток

подающим световодом, отражается волокнами бумажной массы, причем чем выше концентрация волокон, тем больше отражается света. Световой поток преобразуется в электрический сигнал и поступает на контрольно-измерительную аппаратуру. С целью предотвращения забивания чувствительного элемента датчика волокнами и наполнителем предусмотрена система смыва с постоянным противодавлением.

Связь между регистрируемым напряжением и концентрацией волокон в потоке устанавливается статической калибровкой датчика. Тарировочная установка состоит из емкости, имеющей штуцер в донной части для установки датчика концентрации, и мешалки с регулируемым числом оборотов. Геометрия ротора мешалки и число оборотов подбираются таким образом, чтобы обеспечить полное дисперирование бумажной массы по всему объему без каких бы то ни было застойных зон. Датчик концентрации устанавливается в штуцере таким образом, чтобы исключить нарушения структуры потока в тарировочной емкости. При изменении концентрации и вида волокнистой суспензии регистрируется изменение величины электрического тока, генерируемого фотодиодом. Тарировочные кривые датчика концентрации для сульфитной целлюлозы и древесной массы и схема тарировочной установки представлены на рис.11.

Величина электрического сигнала, генерируемого фотодиодом, может быть представлена в виде

$$e = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot J \cdot a \cdot r,$$

где k_1, k_2, k_3 – постоянные усилительной, передающей и регистрирующей аппаратуры; J – интенсивность светового потока осветителя; a – коэффициент передачи светового потока передающим и приемным световодами; r – коэффициент отражения света от бумажной массы.

Полагая, что осветитель излучает световой поток постоянной интенсивности, регистрирующая аппаратура имеет стабильные во времени характеристики, с учетом постоянства коэффициента передачи светового потока в световодах принимаем

$$e = f(r).$$

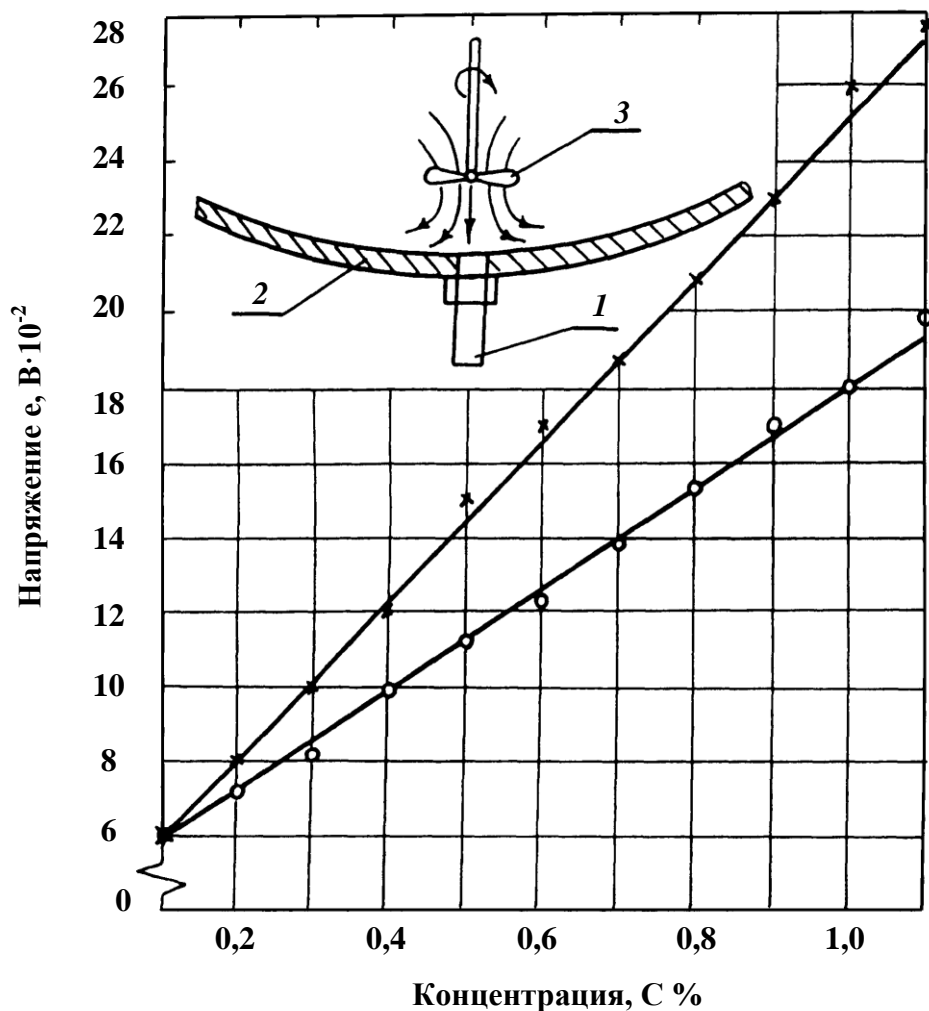


Рис.11. Тарировочные кривые датчика концентрации и схема тарировочной установки: 1 – датчик концентрации; 2 – емкость; 3 – мешалка; -o- СФИ; -x- древесная масса

Поскольку коэффициент отражения в значительной мере при постоянстве прочих параметров бумажной массы определяется ее концентрацией, это выражение может быть преобразовано к виду

$$e = f(C),$$

где C – концентрация волокон.

Величина C представляет в виде

$$C = \bar{C} + C',$$

где \bar{C} и C' – осредненная и пульсационная составляющие концентрации.

Сопоставление параметров турбулентности и распределения структурных неоднородностей потока бумажной массы в зоне напуска с просветом вырабатываемой бумаги позволяет оценить эффективность работы массонапускных и формующих устройств и выработать рекомендации по повышению эффективности их работы.

1.5. Измерение неравномерности просвета волокнистых структур

Для оценки влияния конструктивных элементов массонапускных и формующих устройств на равномерность распределения волокон в структуре потока волокнистой суспензии и полотне бумаги широко используются оптические методы контроля на основе измерения неравномерности просвета в проходящем световом луче.

Для устранения воздействия отраженного света в электронной схеме датчика предусмотрена установка двух регистрирующих фотодиодов, на один из которых подается луч света от блока подсветки, проходящий через исследуемый образец. Второй фотодиод предназначается для устранения влияния внешних условий на результаты измерений. Разность сигналов подается на предварительный усилитель. В соответствии с рекомендациями, изложенными в работе Х. Сара [4], луч, подаваемый блоком подсветки на регистрирующий фотодиод, имеет размер $1 \times 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Для устранения фазовых искажений приемные блоки фотодиодов и предварительный усилитель собраны в едином экранированном корпусе.

Исследуемые образцы бумаги размещаются между двумя прозрачными пластинами, изготовленными из органического стекла толщиной $3 \cdot 10^{-3}$, приводящимися во вращение электродвигателем со стабилизированным источником питания. Измерение неравномерности просвета бумаги производится по концентрическим окружностям диаметром $15 \cdot 10^{-2}$ м. Скорость сканирования поддерживается постоянной $U=3$ м/с и контролируется с помощью строботахометра.

Вторичная аппаратура аналогична той, что используется при измерении турбулентности и концентрации в потоках волокнистых суспензий.

При оценке неравномерности просвета производится амплитудно-частотный анализ сигнала. По спектрам интенсивности неравномерности просвета рассчитывается интегральная неравномерность просвета

$$П = \int_0^{\infty} П(f) df ,$$

где f – частота, Гц; $П(f)$ – спектральная интенсивность неравномерности просвета.

Из спектральной характеристики неравномерности просвета определяются геометрические параметры неравномерности просвета потока волокнистой суспензии по аналогичным формулам спектрального анализа.

Из функции распределения неравномерности просвета по волновым числам $П(k)$ определяется величина интегрального масштаба неравномерности просвета

$$L_{\pi} = \frac{\pi}{2\sigma_{\pi}^2} П(k) ,$$

где $\sigma_{\pi} = \sqrt{П(k)}$ – средняя пульсационная составляющая интенсивности просвета; $П(k)$ – интегральный показатель неравномерности просвета потока.

Микромасштаб неравномерности просвета, характеризующий неоднородность потока, неравномерность распределения концентраций в объеме определяются аналогично

турбулентному

$$\frac{1}{\lambda_n^2} = \frac{1}{2\sigma^2} \int_0^{\infty} k^2 \Pi(k) dk.$$

При увеличении интенсивности турбулентности потока с ростом его скорости в общем случае для однородного турбулентного потока наблюдается смещение максимума спектра в область высоких частот волновых чисел. При этом происходит уменьшение интегральных масштабов и растет количество мелких энергосодержащих вихрей, определяемых микромасштабом турбулентности. Соотношение интегральных масштабов при этом определяется выражением

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{u'_2}{u'_1} \frac{E_{1(0)}}{E_{2(0)}}.$$

Существует аналогичная зависимость и для масштабов флокуляции. Интегрируя его для качественной оценки неравномерности просвета, получим

$$\frac{u'_2 \Pi_{1(0)}}{u'_1 \Pi_{2(0)}} \approx \frac{L_{1п}}{L_{2п}},$$

где $u'_2 > u'_1$ – интенсивности турбулентности; $\Pi_{1(0)}$, $\Pi_{2(0)}$ – неравномерность просвета при $n = 0$; $L_{1п}$, $L_{2п}$ – интегральный масштаб неравномерности просвета.

Сопоставление параметров турбулентности и относительной неравномерности просвета потока бумажной массы дает представление о процессе внутреннего структурообразования под действием турбулентных пульсаций.

1.6. Оценка эффективности работы напускных и формирующих устройств по качественным показателям бумажного полотна

Бумага, изготовленная из водной волокнистой суспензии, на бумагоделательной машине не может быть отлита в виде совершенного однородного листа, поскольку условия агрегатирования композиционных элементов бумажной массы приводят к неоднородности распределения волокон и вспомогательных материалов в структуре бумажного полотна. Стремление выработки наиболее однородного листа диктует необходимость контроля структурных компонентов по толщине и площади листа с последующей корректировкой технологического процесса производства бумаги. Выделяют три группы факторов, в значительной мере определяющих основные свойства бумаги: композиционный и фракционный состав бумаги в различных точках по толщине; ориентация волокон в плоскости листа; распределение компонентов по площади.

Среди характеристик бумаги, используемых для оценки ее структурной однородности, наиболее распространенной является «масса 1 м^2 », позволяющая получить непосредственное представление о распределении волокон в структуре листа бумаги. Равномерность распределения массы волокон и вспомогательных веществ является одной из важнейших характеристик бумаги. Масса 1 м^2 , представляющая собой массу бумаги на единицу площади, является одним из важнейших качественных показателей, оказывающим определяющее влияние на большинство физико-механических свойств бумаги.

Анализ профилограмм массы 1 м^2 показывает, что колебания массы могут быть представлены как совокупность крупномасштабных и мелкомасштабных колебаний (рис.12).

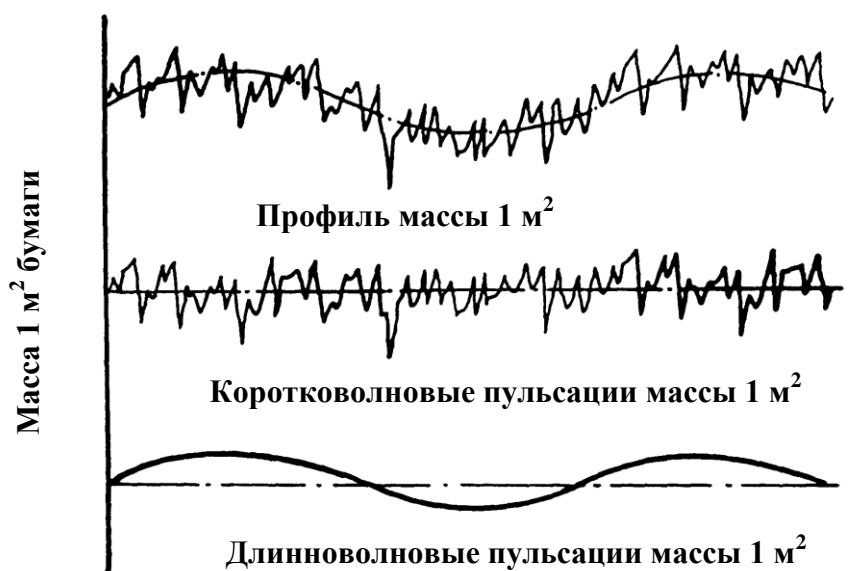


Рис.12. Составляющие профиля колебаний массы 1 м^2 бумаги

При использовании стандартных методов контроля массы 1 м^2 измеряемая площадь так велика, что только крупные значения общих колебаний могут быть определены в виде отклонений между отдельными замерами массы. Значительные колебания массы имеют место внутри рассматриваемой площади. Эта часть колебаний иногда называется крупномасштабными колебаниями массы 1 м^2 .

Когда же измеряемая площадь мала, могут быть определены мелкомасштабные колебания массы 1 м^2 . Деление на крупно- и мелкомасштабные колебания является условным и определяется практическими задачами. Интенсивность колебаний массы определяется многими факторами. Так, например, причиной крупномасштабных колебаний массы являются нестабильность работы массонапускных устройств, наличие поперечных потоков, пульсации давления и концентрации в напускном устройстве. Мелкомасштабные колебания определяются колебаниями в распределении волокон, вызванными склонностью волокон к флокулообразованию, а также структурой потоков бумажной массы в напускном устройстве и зоне формования бумаги.

Для оценки эффективности работы напускных устройств в работе использовался метод, основанный на анализе крупномасштабных колебаний массы 1 м^2 бумажного полотна в продольном и поперечном направлениях.

Для анализа отбирается 20 образцов - полос бумаги, взятых с одного съема по ширине бумажного полотна через один оборот тамбурного вала, как показано на рис.13. Готовятся образцы по ширине полотна размером $100 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, которые после кондиционирования взвешиваются на аналитических весах.

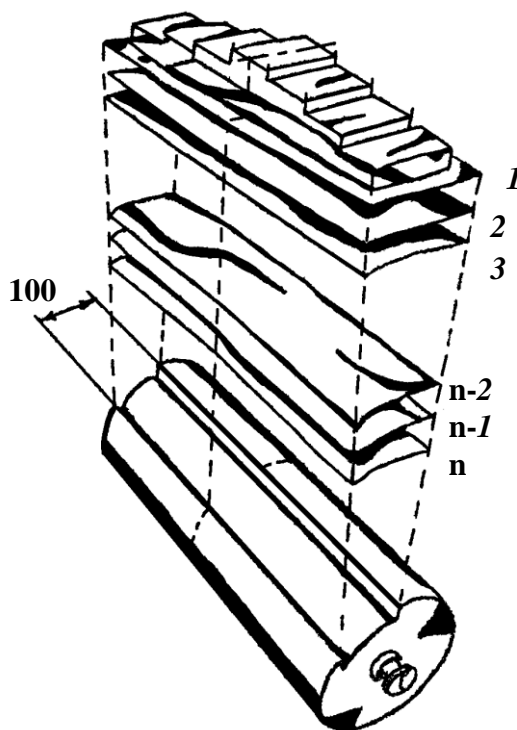


Рис.13. Схема отбора образцов бумаги

Анализ результатов измерений сводится к статистической обработке полученных данных с целью выявления закономерностей в распределении массы 1 м^2 бумаги, вызванных дефектами напускного устройства и неравномерностью распределения концентрации в потоке подаваемой в зону отлива и формования бумаги [5].

Результаты измерений представляются в виде матрицы $E(i, j)$ с i - строками и j - столбцами.

$$i = 1, 2, 3, \dots r; \quad j = 1, 2, 3, \dots S.$$

Индексы i и j обозначают здесь расположение измененной точки соответственно в поперечном и в машинном направлениях бумажного полотна.

Чтобы получить истинную картину распределения массы 1 м^2

бумажного полотна – «стабильные» профили - каждый результат измерений представляется в виде суммы

$$X_{ij} = U + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij},$$

где U – среднее значение массы 1 м^2 бумажного полотна;
 α_i – среднее отклонение i -го столбца (по ходу бумажного полотна);

β_j – среднее отклонение j -й строки (в поперечном направлении);

ε_{ij} – суммарная ошибка, включающая случайные отклонения и погрешность измерений в данной точке.

Среднее значение массы 1 м^2 бумажного полотна определяется по формуле

$$U = x_{..} = \frac{1}{r \cdot S} \sum_{ij=1}^{r \cdot S} x_{ij}.$$

Среднее отклонение i -го столбца α_i определяется как разность между значением массы 1 м^2 данного столбца x_i и средним значением массы 1 м^2 всего массива x

$$\alpha_i = x_i - x_{..}$$

Значение массы 1 м^2 столбца x_i определяется по формуле

$$x_i = \frac{1}{S} \sum_{j=1}^S x_{ij},$$

где S - количество отобранных поперечных полос.

Среднее отклонение j -й строки β_j определяется как разность между средним значением массы 1 м^2 поперек полотна (данной строки $X_{.j}$) и средним значением массы 1 м^2 всего массива X

$$\beta_j = x_{.j} - x_{..}$$

Значение массы 1 м^2 строки ($x_{.j}$) находится из следующего

выражения

$$x_{.j} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r x_{ij}.$$

Суммарная ошибка, включающая погрешность измерений и случайные отклонения массы 1 м^2 данного образца, определяются по формуле

$$\varepsilon_{ij} = x_{ij} - x_{i.} - x_{.j} + x_{..}.$$

Для получения стабильного профиля распределения массы 1 м^2 , пригодного для анализа, из результатов измерений исключаются случайные колебания массы и ошибки измерений.

Среднеквадратичные отклонения измерения вдоль и поперек хода полотна бумаги на машине и доверительные интервалы нормируют колебания профиля и характеризуют стабильность колебаний профиля в данных конкретных точках.

Отклонения в поперечном направлении S_i определяются, исходя из следующего выражения

$$S_i = \frac{\sum (x_{i.} - x_{..})^2}{S - 1}.$$

Величина дисперсии результатов в продольном направлении S_j по движению полотна определяется по формуле

$$S_j^2 = \frac{\sum_{j=1}^S (x_{.j} - x_{..})^2}{r - 1}.$$

Величина суммарной дисперсии результатов измерений

$$S_{ij}^2 = \frac{\sum_{ij=1}^{r \cdot S} (x_{ij} - x_{i.} - x_{.j} + x_{..})^2}{(S - 1)(r - 1)}.$$

Доверительные интервалы находятся из следующих

выражений. В машинном направлении

$$\sigma_{\text{маш}} = \sqrt{S_j^2 - \frac{1}{r} \cdot S_{ij}^2}.$$

В поперечном направлении

$$\sigma_{\text{поп}} = \sqrt{S_i^2 - \frac{1}{S} \cdot S_{ji}^2}.$$

Суммарный доверительный интервал

$$\sigma_{\text{рез}} = \sqrt{S_{ij}^2}.$$

Полученные стабильные профили распределения массы 1 м^2 , очищенные от случайных колебаний и ошибок измерений, позволяют выявить характерные особенности распределения массы 1 м^2 бумажного полотна, связанные с недостатками работы массонапускных систем, и наметить пути их устранения.

Использование оптических способов контроля равномерности масс 1 м^2 с лучом диаметром менее $1 \cdot 10^{-3}$ позволяет зафиксировать мелкомасштабные колебания массы. Анализ результатов измерений с использованием методов спектрального анализа дает распределение неоднородностей по длинам волн.

Неравномерность просвета бумажного полотна рассматривается как временной ряд. Проводится регрессивный анализ с целью удаления возможного тренда среднего. Уравнение регрессии определяется из выражения

$$\hat{Y}_t = \beta_0 + \beta_1 x_t,$$

$$\text{где } \beta_0 = \frac{\sum Y \sum x^2 - \sum x \sum xY}{N \sum x^2 - (\sum x)^2}; \beta_1 = \frac{N \sum xY - \sum x \sum Y}{N \sum x^2 - (\sum x)^2};$$

$t = 1, \dots, N$; Y, x – зависимая и независимая переменные;
 $N = 1000$ – объем выборки.

Преобразованный ряд имеет вид

$$x_t = Y_t - \hat{Y}_t.$$

Вычисляется значение автоковариационной функции для $(L + 1)$ значений индекса i

$$C_{xx(i)} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-1} x_t x_{t+i},$$

где $i = 0, 1, \dots, N$; $L = 100$ – запаздывание, выбираемое в зависимости от общего числа выборок.

Для исследования временных рядов с различными масштабами автоковариационная функция нормируется. Получена автокорреляционная функция, по степени затухания которой можно судить об отсутствии трендов в рассматриваемых рядах

$$\bar{C}_{xx(i)} = \frac{C_{xx(i)}}{C_{xx(0)}}.$$

Для сглаживания спектральных оценок используется окно Хеннинга

$$V_{L(i)} = 0,5 \left(1 + \text{Cos} \frac{\pi i}{L} \right).$$

С использованием окна Хеннинга корреляции имеют вид

$$\begin{aligned} \tilde{C}_{xx(i)} &= C_{xx(i)} V_{L(i)}, \\ \tilde{\bar{C}}_{xx(i)} &= \bar{C}_{xx(i)} V_{L(i)}. \end{aligned}$$

Плотность спектра мощности определяется из выражения

$$G_{xx(f)} = T \left(\tilde{C}_{xx(0)} + 2 \sum_{i=1}^{L-1} \left[\tilde{C}_{xx(i)} \text{Cos}(2\pi f_i T) + \tilde{C}_{xx(L)} \text{Cos}(2\pi f L T) \right] \right)$$

или после нормирования

$$\bar{G}_{xx(f)} = T \left[1 + 2 \sum_{i=1}^{L-1} \tilde{C}_{xx(i)} \cos(2\pi f_i T) + \tilde{C}_{xx(L)} \cos(2\pi f L T) \right],$$

где T – интервал выборки.

Набор частот определяется выражением

$$f = 10^{-\alpha + \beta \gamma},$$

где α , β и γ – переменные, определяющие диапазон частот.

$$Z < \beta \leq (Z_K - Z_H)K,$$

где Z_K и Z_H – переменные, определяющие границы диапазона частот; K – коэффициент, определяющий количество частот в наборе.

Переход к волновым спектрам в соответствии с рекомендациями Варена осуществляется по формулам

$$E_{xx(l)} = \frac{f^2}{\bar{U}} \bar{G}_{xx(f)}; \quad l = \frac{\bar{U}}{f}.$$

В последнее время для исследования и оценки мелкомасштабных колебаний массы 1 м^2 бумаги все большее распространение приобретают методы, основанные на использовании излучений различных типов (радиоактивного, рентгеновского и др.). Эти методы представляют значительный интерес, поскольку дают наиболее полное представление о микронеоднородности листа. Обработка получаемых с применением указанных методов результатов по распределению волокон по площади листа бумаги ведется с использованием методов спектрального анализа. Сопоставление параметров турбулентности, концентрации волокон и просвета бумажной массы в зоне напуска с распределением волокон по площади листа бумаги дает возможность оптимально компоновать проточные части массонапускных систем и обезвоживающие элементы начальной зоны формования с целью выработки высококачественной бумаги с пониженной массой 1 м^2 .

2. РЕОЛОГИЯ БУМАЖНОЙ МАССЫ

2.1. Основные характеристики растительных волокон и образованных ими суспензий

Волокнистые суспензии представляют собой сложные полидисперсные системы, образующие в пространстве сетку зацепления. Особенности структуры волокнистых каркасов объясняются природным строением волокон и изменениями, приобретаемыми в процессе их обработки. Сетка зацеплений из волокон неоднородна, в ней могут одновременно осуществляться контакты на различном уровне: между очень тонкими субмикроскопическими гидратированными фибриллами, микрофибриллами (также гидратированными) и самими волокнами.

Сульфитные целлюлозы содержат 0,4-0,7 % лигнина. Средняя длина волокон $(2,4-2,8) \cdot 10^{-6}$ м. Сульфатные целлюлозы содержат 0,56 % лигнина, их средняя длина составляет $3 \cdot 10^{-3}$ м, а средняя ширина $4,0 \cdot 10^{-6}$ м.

Поскольку волокна древесной массы не подвергаются варке, а производятся непосредственно истиранием древесины, то в них содержится 27-30 % лигнина. Лигнин придает волокну жесткость, снижает пластичность и уменьшает гидратационные свойства, препятствуя образованию водородных межволоконных связей. Получаемая древесная масса состоит из длинных $1 \cdot 10^{-3}$ м и коротких $5 \cdot 10^{-4}$ м - $7 \cdot 10^{-4}$ м волокон, средняя ширина которых составляет $3,6 \cdot 10^{-6}$ м.

Суспензии, образованные на основании природных целлюлозных волокон, относятся к группе двухфазных систем, где волокна играют роль твердой дисперсной фазы, а вода – жидкой дисперсионной среды. Данные суспензии относятся к гетерогенным полидисперсным системам, так как дисперсная фаза (волокна) характеризуется непостоянством размеров. Волокнистые суспензии также относятся к коагуляционным структурам, которые возникают в процессе коагуляции и образуют рыхлые каркасы из первичных частиц (волокон). Рыхлые хлопьевидные коагулянты называются флокулами.

Волокнистые суспензии обладают тиксотропией, так как со временем восстанавливают свою структуру, причем фиксация

волокон может происходить на расстояниях ближней и дальней коагуляции.

Известно, что целлюлозные волокна представляют собой высокомолекулярные соединения, в основе которых лежат линейные макромолекулы. Каждое глюкозное звено имеет в макромолекуле три гидроксильные группы –ОН–, образующиеся между волокнами на расстояниях не более $(2,55-2,75) \cdot 10^{-10}$ м водородные связи.

Многие исследователи отдают решающее значение при образовании структуры в волокнистых суспензиях механическому взаимодействию волокон, в основе которого лежит теория Мэсона об ограниченном пространстве для движения волокна.

Кроме механического взаимодействия как отдельных волокон, так и флокул, образованных ими, наблюдается взаимодействие за счет поверхностных электрокинетических явлений, так как на границе раздела «вода-волокно» возникает двойной электрический слой. Кроме того, взаимодействие происходит за счет сил поверхностного натяжения.

2.2. Экспериментальное исследование реологических характеристик волокнистых суспензий

Для экспериментального определения реологических характеристик волокнистых суспензий применяется специальный ротационный вискозиметр, разработанный в Санкт-Петербургском государственном технологическом университете [6]. Схема ротационного вискозиметра представлена на рис.14.

Особенность вискозиметра — возможность проведения исследований с различными видами волокнистых суспензий с широким диапазоном композиций, концентраций и длины волокна. С этой целью предусмотрена возможность вариации рабочего зазора между цилиндрами в интервале от 10 до 60 мм путем установки сменных внутренних цилиндров различных диаметров. Диаметр наружного цилиндра \varnothing равен 260 мм. При работе

наружный цилиндр приводится во вращение, а крутящий момент снимается с внутреннего цилиндра 1. Такой выбор схемы работы обеспечивает устойчивость потока в рабочем зазоре вискозиметра .

Большой размер наружного диаметра вискозиметра гарантирует высокую однородность градиента скоростей в зазоре, так как выполняется условие $(R_n / R_{вн})^2 \rightarrow 1$.

Для устранения влияния торцевого эффекта высота рабочей зоны вискозиметра составляет 600 мм. Максимальная окружная скорость вращения наружного цилиндра равна 7 м/с.

Измеряемый момент с внутреннего цилиндра передается рычажной системой на тензометрический силоизмерительный датчик 2. Сигнал с датчика поступает на измерительную схему электронного самопишущего уравновешенного автоматического моста 3.

Диапазон измеряемых усилий составляет 29,4 мН - 588,6 Н. Разбивка диапазона измеряемых усилий осуществляется механически, измерением одного из плеч рычага *АОВ*.

Наружный цилиндр вращается электродвигателем 6 постоянного тока через коробку скоростей 5 и коробку передач 4. Питание электродвигателя обеспечивается от блока управления приводом 8, совместно с тахогенератором 7, составляющим систему автоматического регулирования частоты вращения электродвигателя в пределах каждого диапазона скоростей. Переключение диапазона скоростей происходит в коробке скоростей. Определенная частота вращения в пределах каждого диапазона скоростей обеспечивается резистором.

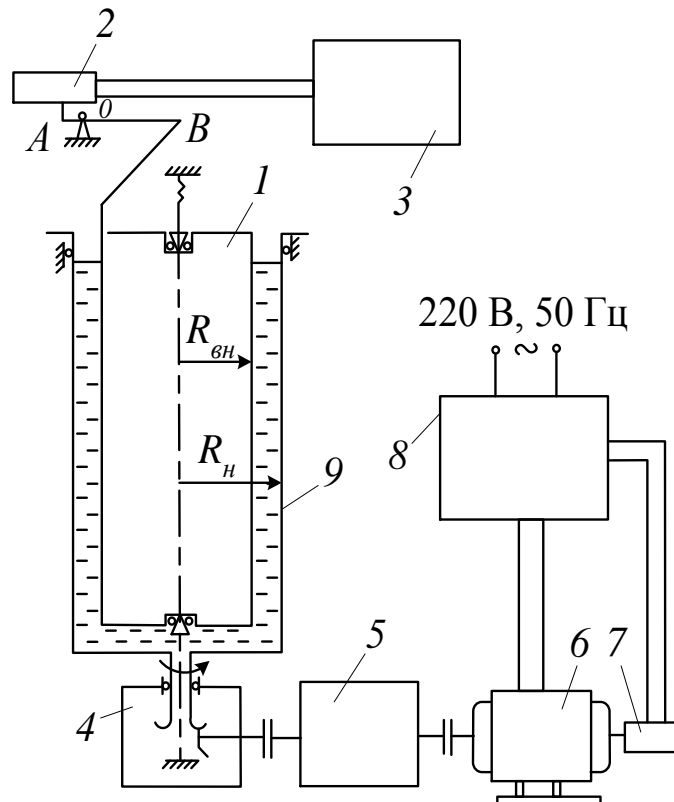


Рис.14. Схема вискозиметра: 1 – внутренний цилиндр; 2 – силоизмерительный датчик; 3 – электронный самопишущий мост; 4 – коробка передач; 5 – коробка скоростей; 6 – электродвигатель; 7 – тахогенератор; 8–блок управления приводом; 9 – наружный цилиндр

Исследуемую волокнистую суспензию заливают в рабочий зазор вискозиметра и перед запуском установки тщательно перемешивают специальной мешалкой. Используют и другой способ заливки волокнистой суспензии: внутренний цилиндр вынимают, заливают определенный объем суспензии и затем внутренний цилиндр ставят на место.

Температура суспензии измеряется ртутным термометром перед началом и концом работы. Экспериментальная реологическая характеристика представляет собой графическое изображение функции

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

где τ – касательное напряжение трения между соседними

слоями суспензии; $\dot{\gamma}$ – градиент скорости.

Каждую из необходимых величин τ и $\dot{\gamma}$ определяют по формулам

$$\tau = \frac{M}{2\pi LR_{cp}^2}; \dot{\gamma} = \frac{\omega R_n}{R_n - R_{вн}},$$

где M – измеряемый момент; $L = 600$ мм – высота внутреннего цилиндра; ω – угловая частота наружного цилиндра; R_n – внутренний радиус наружного цилиндра; $R_{вн}$ – наружный радиус внутреннего цилиндра

$$R_{cp} = \frac{R_n + R_{вн}}{2}.$$

На рис.15 представлены реологические кривые для суспензии беленой сульфатной целлюлозы. Расчетные кривые, построенные согласно аналитическим выражениям [1], дают высокую степень сходимости с экспериментальными кривыми течения. Максимальное расхождение аналитических и экспериментальных данных не превышает 10 %.

Рассмотрим экспериментальные реологические кривые, сопоставим их с расчетными и дадим оценку степени физической достоверности полученных аналитических выражений.

Все представленные экспериментальные реологические кривые имеют при малых градиентах скоростей (в начале движения потока суспензии) явно выраженные аномальные участки. Наличие аномалии свидетельствует о стержнеобразовании в структурированном режиме движения суспензии.

Интенсивность аномалии на кривой течения возрастает с ростом концентрации суспензии. При максимальных значениях рассмотренных концентраций появляется начальное напряжение сдвига τ_0 , причем для целлюлозной суспензии оно выше, чем для суспензии древесной массы. Это объясняется тем, что более гибкие и длинные волокна целлюлозы образуют более вязкую структуру стержня, для сдвига которой с места требуются большие усилия. При малых концентрациях кривые течения начинаются из начала координат и не имеют начального напряжения сдвига.

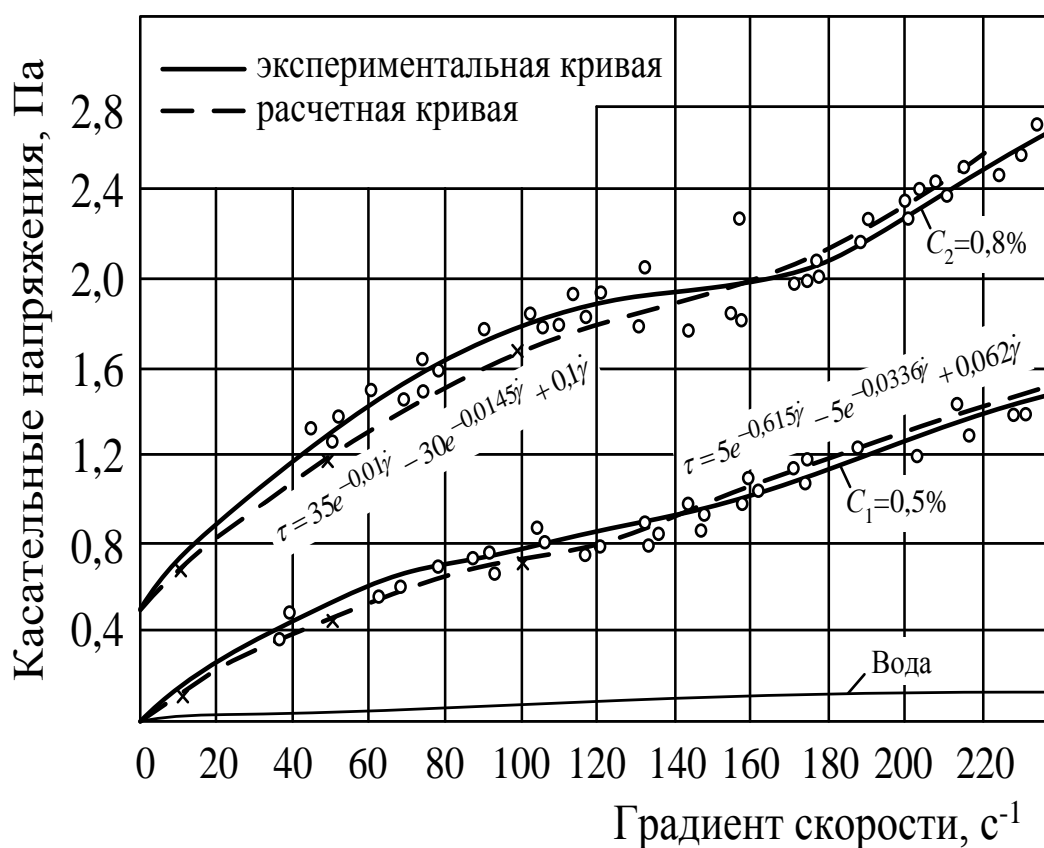


Рис.15. Реологические характеристики суспензии сульфатной беленой целлюлозы (25°ШР ; $C_1=0,5\%$; $C_2=0,8\%$)

Это объясняется тем, что более гибкие и длинные волокна целлюлозы образуют более вязкую структуру стержня, для сдвига которой с места требуются большие усилия. При малых концентрациях кривые течения начинаются из начала координат и не имеют начального напряжения сдвига. После аномального участка кривые течения представляют собой прямые линии, тангенс угла наклона которых равен числовому значению коэффициента динамической вязкости μ_T диспергированного потока суспензии. На этом участке кривая течения аналогична кривой течения ньютоновской жидкости.

Продолжительность аномального участка кривой течения характеризует прочностные свойства стержня в структурированном потоке суспензии.

Переходим к анализу кривой течения суспензии с

концентрацией 0,5 %. Аномальный участок на кривой течения целлюлозной суспензии имеет меньший диапазон, чем суспензии древесной массы. Следовательно, стержень из переплетенных волокон целлюлозы разрушается легче, так как целлюлозные волокна гибче и пластичнее, что вполне согласуется с вышеприведенным анализом полей скоростей в соответствующих потоках. Переход к диспергированному потоку у целлюлозной суспензии происходит при градиенте скорости $\dot{\gamma}_{кр} 140 \text{ с}^{-1}$, а у суспензии древесной массы – при $\dot{\gamma}_{кр} 180 - 200 \text{ с}^{-1}$. Полное разрушение стержня у целлюлозной суспензии происходит при касательном напряжении $\tau = 0,9 \text{ Па}$ (конец аномального участка), а у суспензии древесной массы при $\tau = 1,1 \div 1,2 \text{ Па}$. Это свидетельствует о том, что стержень из более жестких волокон древесной массы прочнее и разрушить его сложнее. Повышенные прочностные показатели стержня у древесной массы находят отражение в значениях коэффициентов A_1 и A_2 реологического уравнения: для целлюлозной суспензии $A = 0,5 \text{ Па}$, а для суспензии древесной массы $A = 0,9 \div 1,0 \text{ Па}$. Менее прочный, но более вязкий стержень из целлюлозных волокон требует большего времени на свое полное разрушение, что находит отражение в значениях коэффициентов α_1 и α_2 реологического уравнения. Для суспензии целлюлозы значения этих коэффициентов больше, чем для суспензии древесной массы.

В режиме диспергированного потока суспензии наличие волокон будет оказывать существенное влияние на трение скольжения между соседними слоями. Совершенно очевидно, что в зависимости от физико-механических свойств волокна это влияние будет различно. Длинные и гибкие волокна должны увеличивать трение скольжения по сравнению с короткими и жесткими. Подтверждением этому могут служить прямолинейные участки сопоставляемых кривых течения. Для сравнения на рис.15 приведена кривая течения чистой воды. Тангенс угла наклона прямых характеризует интенсивность трения скольжения. Из приведенных данных следует, что наибольшее трение скольжения наблюдается в суспензии целлюлозы, а наименьшее – в чистой воде.

Таким образом, проведенный анализ экспериментальных данных реологических кривых течения при концентрации 0,5 %

показал, что исследование реологии на ротационном вискозиметре полностью отражает физические процессы, происходящие при движении волокнистой суспензии в каналах произвольной формы. Можно заключить, что реологическое уравнение достаточно полно отражает физическую суть вопросов структурообразования в волокнистой суспензии, дает удовлетворительную сходимость расчетных данных с экспериментальными и может быть использовано при оценке эффективности работы напускных и формующих устройств.

Необходимо отметить, что динамический коэффициент вязкости волокнистых суспензий в диспергированном потоке выше, чем при движении чистой воды. Этот показатель тем выше, чем больше концентрация суспензии, длиннее и пластичнее волокна. Следовательно, потери на гидравлическое трение в воде должны быть меньше, чем в суспензии. Однако, как было указано ранее, коэффициент гидравлического трения для суспензий в диспергированном потоке значительно ниже, чем в случае воды.

Из гидродинамики известно, что в турбулентном потоке чистой воды касательное напряжение трения τ определяется согласно соотношению

$$\tau = (T + \mu)\dot{\gamma},$$

где T – динамический коэффициент турбулентного перемешивания; μ – динамический коэффициент вязкости.

Динамический коэффициент турбулентного перемешивания T определяется интенсивностью и значением поперечных пульсаций воды в турбулентном движении. Этот коэффициент может во много раз превосходить коэффициент μ . Поэтому в турбулентном движении воды коэффициент гидравлических потерь λ зависит практически только от коэффициента T , так как значение μ несоизмеримо мало по сравнению со значением T .

Если в воду добавить волокна, то в диспергированном потоке они гасят микротурбулентность чистой воды. При этом, чем гибче и эластичнее волокна, тем интенсивнее они гасят поперечную пульсацию воды в потоке и уменьшают числовое значение коэффициента T . Если учесть, что зависимость коэффициента

гидравлических потерь на трение λ от коэффициентов вязкости определяется формулой

$$\lambda = (T + \mu) \frac{64g}{d\gamma v}$$

то можно заметить, что в волокнистой суспензии можно практически свести к нулю влияние коэффициента T на значение λ . И даже несмотря на то, что коэффициент μ для суспензии выше, чем для воды, общий коэффициент гидравлических потерь для суспензии становится ниже, чем для чистой воды. Влияние остальных величин, входящих в эту формулу (g – ускорения свободного падения, d — диаметра канала, γ — удельного веса жидкости, v — средней скорости потока) на коэффициент гидравлических потерь, можно не учитывать, так как они остаются практически одинаковыми при сопоставлении движения в идентичных условиях чистой воды и волокнистой суспензии.

Необходимо отметить весьма важное прикладное значение реологической характеристики волокнистых суспензий. Возможность получения экспериментальной кривой течения бумажной массы на вискозиметре позволяет точно оценить способность к флокуляции рассматриваемой волокнистой суспензии и использовать этот показатель в практических целях. Реологическая характеристика позволяет определить градиент скорости, при котором наступает полная диспергация волокнистого материала в потоке рассматриваемой суспензии. Этот показатель обозначается как критическое значение градиента скорости – $\dot{\gamma}_{кр}$. Таким образом, если в проточном канале рассматриваемого аппарата рабочий градиент скорости суспензии меньше $\dot{\gamma}_{кр}$, то поток будет проявлять склонность к флокуляции, если же градиент скорости больше $\dot{\gamma}_{кр}$, то можно быть уверенным, что поток находится в диспергированном состоянии. Так, в разобранный выше примере (рис.15) критическое значение градиента скорости $\dot{\gamma}_{кр}$ для получения концентрации суспензии сульфитной целлюлозы равно 140 с^{-1} . Значение этого показателя для обеспечения эффективности технологического процесса чрезвычайно велико. В одних аппаратах, например напускных устройствах, требования по степени диспергации бумажной массы

чрезвычайно высоки, в других они меньше, однако можно с уверенностью утверждать, что нет ни одного вида оборудования в технологическом потоке приготовления и переработки волокнистой суспензии, где бы внутренняя структура потока не была связана с эффективностью процесса и не нуждалась в четком определении. Наличие реологической характеристики позволяет решать этот вопрос. В первом приближении это делается простым методом. По известному расходу суспензии определяется средняя скорость потока v_{cp} в рассматриваемом канале и относится к половине наименьшей высоты потока в рассматриваемом сечении ($0,5 h_{мин}$). Так определяется рабочий градиент скорости

$$\dot{\gamma}_{раб} = v_{cp} / (0,5 h_{мин}).$$

Затем рабочий градиент скорости сопоставляется с критическим значением градиента по имеющейся реологической характеристике и определяется степень диспергированности рассматриваемого потока бумажной массы.

2.3. Реологическое уравнение бумажных масс

Экспериментальными исследованиями установлено, что при увеличении скорости движения бумажная масса проходит через несколько стадий внутреннего структурообразования. В состоянии покоя бумажная масса образует пространственную волокнистую структуру. Сцепление между волокнами обеспечивается в основном за счет механических сил трения. Таким образом, переплетенные волокна образуют своеобразный внутренний каркас, контактирующий со стенками канала. С увеличением концентрации бумажной массы внутренняя структура становится более прочной и требуются значительные усилия для ее разрушения.

Анализ гидравлических потерь при движении бумажных масс показывает, что для начала движения необходимо приложить определенный начальный напор h_0 (рис.16).

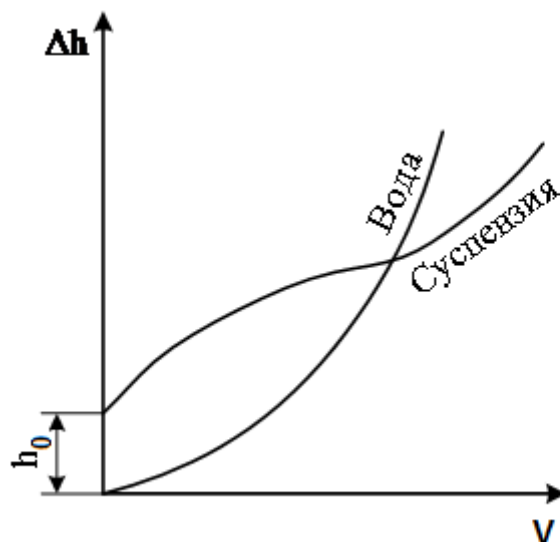


Рис. 16. Сравнительная характеристика потерь напора для бумажной массы и воды

Напор h_0 идет на преодоление сил трения волокон о стенки канала. Величина тем больше, чем выше концентрация.

Таким образом, можно полагать, что силы трения покоя волокон о стенки суммируются с внутренней прочностью каркаса и его упругостью. Следовательно, если к суспензии прикладывать напор $h < h_0$, то она двигаться не будет, а в структурном каркасе возникнет упругое напряженное состояние.

При движении бумажной массы, как было показано в главе 1, в зависимости от величины скорости наблюдается два вида потока: структурированный и диспергированный.

При малых скоростях движения сначала переплетенные волокна образуют структурированный слой (стержень), который движется внутри потока. Структурированный слой сохраняется за счет сил сцепления между волокнами, образуя упругую структуру определенной прочности. Однако с увеличением скорости движения (градиента сдвига) увеличиваются касательные силы трения на поверхности стержня, который под их действием начинает разрушаться и терять свою прочность в результате сдвига между волокнами.

В первой стадии структурированного потока (скорость V_1) наружные волокна стержня скользят по стенкам канала, а с увеличением скорости - по слою чистой воды. При этом нарастает

напряжение трения, но оно еще недостаточно, чтобы вырвать волокна из стержня. Стержень претерпевает деформацию, внутренние связи между волокнами слабеют и уменьшается его прочность. Таким образом, на первой стадии в структурированном потоке происходят одновременно два процесса: увеличение сил трения и уменьшение прочности стержня. Необходимо отметить, что силы трения поверхности твердого тела о жидкость зависят от скорости относительного движения, при малых скоростях эта зависимость от первой степени скорости, при больших – от второй, т.е.

$$F_{\text{тр.малых}} = \beta_1 V;$$

$$F_{\text{тр.больших}} = \beta_2 V^2,$$

где β_1 и β_2 – коэффициенты трения скольжения, пропорциональные напряжению трения.

На второй стадии структурированного потока волокна под действием напряжения трения вырываются из стержня и диспергируются в слое чистой воды. При достижении скорости V_3 стержень разрушается полностью, и поток становится диспергированным. Внутри потока исчезают напряжения, трения между стержнем и диспергированным потоком, а также напряжения, характерные для ньютоновской жидкости. Силы вязкостного трения имеют место и на стадии структурированного потока, однако там они играют незначительную роль, так как действуют либо в небольшом слое чистой воды (1-я стадия), либо в диспергированном слое (2-я стадия).

Таким образом, с увеличением скорости волокнистая суспензия проявляет тиксотропные свойства и превращается в жидко-твердую среду, состоящую из воды и диспергированных волокон, имеющую ньютоновский характер движения. Волокна ориентируются по потоку и движутся в нем параллельно друг другу, что практически приводит к отсутствию связей между ними и, следовательно, к большому времени релаксации в целом.

Внутренняя структура перестраивается.

В диспергированном состоянии ориентированные волокна гасят мелкомасштабную турбулентность в потоке, и коэффициент

потерь на трение в суспензии становится меньше, чем в чистой воде.

Проведенный анализ трансформации волокнистой суспензии в процессе ее движения показывает, что она обладает вязкими, упругими и пластическими свойствами.

Приблизительно указанные свойства описываются реологической моделью, представленной на рис.17.

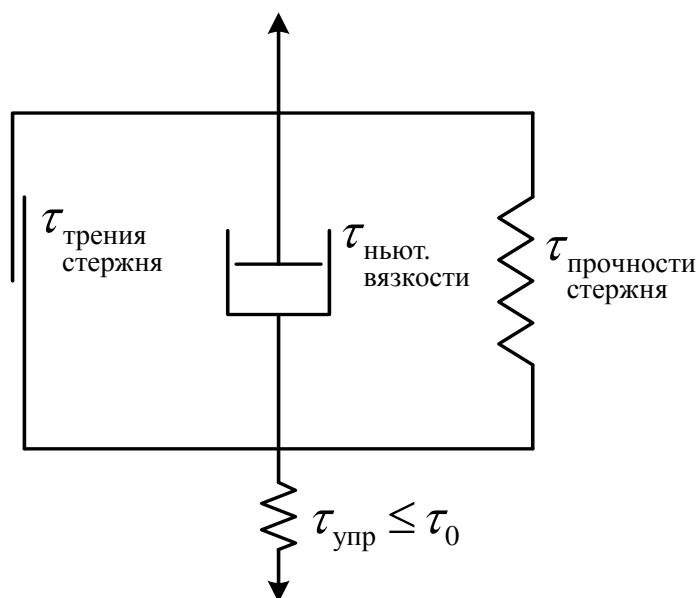


Рис.17. Реологическая модель бумажной массы

До начала движения в волокнистой суспензии возникают упругие напряжения $\tau_{упр}$, если прилагаемые нагрузки не превосходят силы сцепления сетчатой структуры со стенками канала, т.е. если $h < h_0$.

Когда прилагаемый напор $h > h_0$, суспензия начинает двигаться. В начальный период движения суспензии в ней возникают напряжения, являющиеся суммой разобранных выше трех категорий напряжений: напряжения трения стержня об окружающую среду; напряжения внутри стержня и ньютоновских напряжений вязкости воды и диспергированной суспензии.

Таким образом, при малых скоростях сдвига в суспензии возникает напряжение, состоящее из трех компонентов

$$\tau = \tau_{\text{трения стержня}} + \tau_{\text{прочности стержня}} + \tau_{\text{ньютоновской вязкости}} \cdot \quad (2.1)$$

Ввиду тиксотропности системы можно полагать, что напряжение трения стержня об окружающую среду и напряжения, характеризующие внутреннюю прочность стержня, с увеличением градиента скорости стремятся к нулю.

Следовательно, напряжения $\tau_{\text{трения стержня}}$ и $\tau_{\text{прочности стержня}}$ будут характеризоваться экспоненциальной зависимостью от скорости сдвига. При достижении определенных значений градиентов скоростей волокнистая суспензия будет двигаться аналогично ньютоновской жидкости, и ее внутренние напряжения будут характеризоваться только вязкостным трением.

Для начала движения необходимо преодолеть силу сцепления сетчатой структуры суспензии о стенки канала, следовательно, к системе необходимо приложить напряжения, превышающие напряжения сдвига τ_0 .

Величина предельного напряжения сдвига определяется суммой напряжения внутренней прочности стержня и напряжения трения внешних волокон стержня о стенку канала.

Обозначая:

- напряжение первоначального трения (в момент трения) волокнистого стержня о стенку канала A_1 ;
- напряжения, характеризующие внутреннюю прочность сетчатой структуры из волокон (в момент трения) A_2 , получим

$$\tau = A_1 + A_2. \quad (2.2)$$

Рассмотрим динамику изменения напряжений трения внешней поверхности об окружающую среду.

Если взять небольшой отрезок времени α , то можно полагать, что относительная величина напряжения трения будет пропорциональна изменению градиента сдвига, т.е.

$$\frac{\partial \tau}{\tau} = -\alpha_1 \Delta \dot{\gamma}, \quad (2.3)$$

где $\dot{\gamma}$ – градиент скорости.

Противоположность знаков в выражении свидетельствует о разной направленности составляющих векторов.

В дифференциальной форме уравнение примет вид

$$\frac{\partial \tau}{\tau} = -\alpha_1 \partial \dot{\gamma}. \quad (2.4)$$

Проинтегрируем обе части уравнения

$$\ln \tau = -\alpha_1 \dot{\gamma} + C_1. \quad (2.5)$$

Находим постоянную интегрирования C из условия: если $\dot{\gamma} = 0$, то $\tau_1 = A_1$ что соответствует допущению (2.2).

Тогда из уравнения (2.5) получим, что

$$C_1 = \ln A_1.$$

Подставляя C_1 в уравнение (2.5), получим

$$\ln \tau = -\alpha_1 \dot{\gamma} + \ln A_1,$$

или

$$\ln \frac{\tau}{A_1} = -\alpha_1 \dot{\gamma},$$

или

$$\tau_{mp} = A_1 e^{-\alpha_1 \dot{\gamma}}. \quad (2.6)$$

Уравнение (2.6) показывает экспоненциальную зависимость напряжения трения от скорости сдвига, что согласуется с описанным выше физическим процессом.

Рассмотрим динамику изменения напряжения, характеризующего внутреннюю прочность сетчатой структуры из волокон.

Как было показано выше, с увеличением градиента скоростей стержень разрушается. Можно полагать, что, если рассматривать небольшой отрезок времени α_2 , то относительное падение внутреннего напряжения в стержне будет пропорционально градиенту сдвига, т.е.

$$\frac{\Delta \tau}{\tau} = -\alpha_2 \Delta \dot{\gamma}. \quad (2.7)$$

Здесь противоположность знаков свидетельствует о противоположности сопоставляемых векторов.

Придаем уравнению дифференциальную форму

$$\frac{\partial \tau}{\tau} = -\alpha_2 \partial \dot{\gamma}.$$

Интегрируя обе части уравнения, получим

$$\ln \tau = -\alpha_2 \dot{\gamma} + C_2. \quad (2.8)$$

Находим постоянную интегрирования из условия (2.2), т.е. если $\dot{\gamma} = 0$, то $\tau = A_2$.

Тогда из уравнения (2.8) получим $C_1 = \ln A_2$. Подставляя значение C_1 в уравнение (2.8), после преобразования получим выражение для напряжения сетчатой структуры волокон в стержне

$$\tau_{\text{прочн. стержня}} = A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}}. \quad (2.9)$$

Уравнение (2.9) показывает экспоненциальную зависимость напряжения в стержне от скорости сдвига, что согласуется с описанным выше процессом.

Подставляя выражения (2.6) и (2.9) в уравнение (2.1), получим

$$\tau = A_1 e^{-\alpha_1 \dot{\gamma}} + A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}} + \tau_{\text{ньют.вязкости}}. \quad (2.10)$$

Для жидкостей, подобных ньютоновским, известен закон зависимости напряжения сдвига от градиента скорости: $\tau = \mu_m \dot{\gamma}$.

Подставляем это выражение в уравнение.

Получим

$$\tau = A_1 e^{-\alpha_1 \dot{\gamma}} + A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}} + \mu_m \dot{\gamma}, \quad (2.11)$$

где μ_m – коэффициент динамической вязкости диспергированной суспензии.

Данное уравнение позволяет определить напряжение сдвига внутри бумажной массы в зависимости от градиента скорости и может рассматриваться как реологическое уравнение бумажной

массы.

Графически данное реологическое уравнение и его составляющие могут быть представлены в следующем виде (рис.18), где:

$A_1 e^{-\alpha_1 \dot{\gamma}}$ – напряжение трения, вызывающее разрушение стержня;

$A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}}$ – напряжение, характеризующее внутреннюю прочность структуры;

$\mu_T \dot{\gamma}$ – напряжение вязкости диспергированной суспензии.

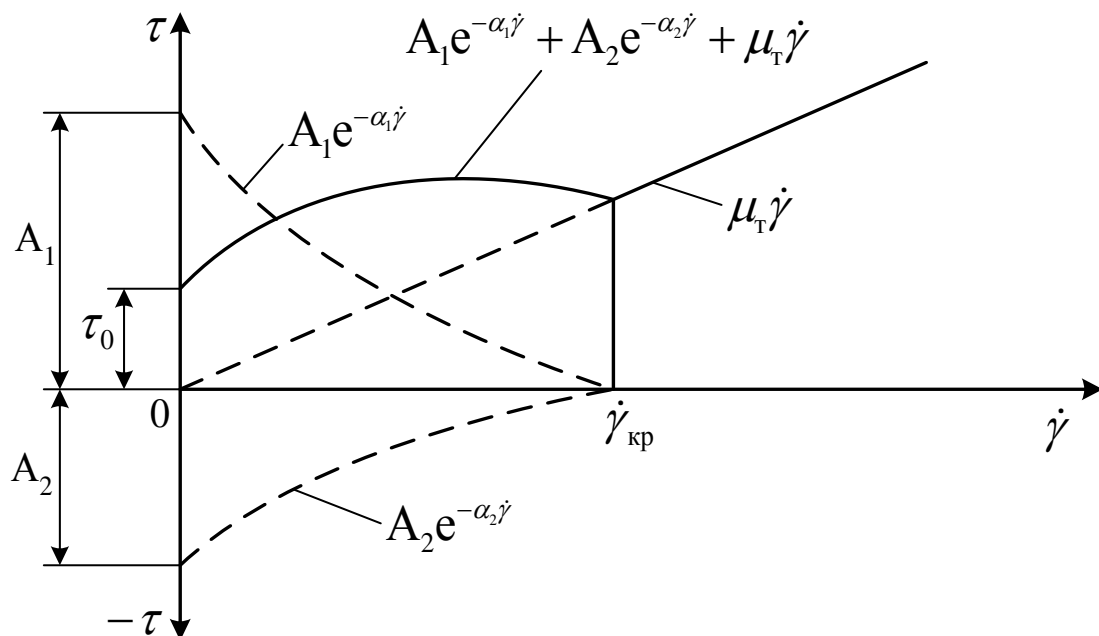


Рис.18. Построение теоретической кривой течения суспензии

Ранее было показано, что при развитии движения силы трения разрушают стержень. Следовательно, напряжения трения стержня в суспензии всегда должны превосходить напряжения прочности

$\mu_T \dot{\gamma}$

стержня. Кроме того, ввиду взаиморазрушающего действия указанной пары напряжений, они должны иметь противоположные знаки. Поэтому на рис.18 экспоненты $A_1 e^{-\alpha_1 \dot{\gamma}}$, $A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}}$ построены в противоположные стороны от оси $\dot{\gamma}$, и суммарное напряжение в суспензии от действия этих факторов равняется разности ординат

приведенных экспонент, при этом напряжение трения больше по абсолютному значению. Для получения полного напряжения в суспензии к указанной сумме добавляется еще вязкостное напряжение $\mu\dot{\gamma}$. В итоге строится кривая течения бумажной массы.

На участке $0 - \dot{\gamma}_{кр}$ наблюдается аномалия вязкости, вызванная наличием структурированного потока. При скоростях сдвига больших, чем $\dot{\gamma}_{кр}$, бумажная масса движется в диспергированном состоянии и подчиняется законам движения ньютоновской жидкости.

Таким образом, уравнение (2.11) теоретически отражает динамику внутренних физических преобразований в бумажной массе и может быть использовано как реологическое уравнение.

2.4. Релаксационные и упругие свойства бумажных масс

При производстве бумаги и картона из диспергированной волокнистой суспензии большое значение имеет не только учет силовых факторов, но и временных показателей, определяющих интервалы временных показателей, определяющих интервалы времени, за которые происходит глубокая перестройка структуры потока. Наличие в волокнистой суспензии контактов на различном уровне от субмикроскопических фибрилл до переплетения волокон, предполагает, что относительное изменение касательных напряжений должно происходить за различные промежутки времени, в зависимости от того, какие контакты рассматриваются. Особенности структурообразования в волокнистых суспензиях, как показано в работах Терентьева О.А., проявляются в нестабильности реологических характеристик.

Рассмотрим взаимосвязь строения волокнистых структур с временным масштабом. Релаксационные спектры $H(\theta)$ волокнистых суспензий рассчитывают из релаксационных характеристик по формуле

$$H(\theta) = -\tau \left(\dot{\gamma} \right) \left(\frac{d \lg \tau}{d \lg \dot{\gamma}} - 1 \right); \quad (2.12)$$

где θ – время релаксации, $\theta = \frac{1}{\dot{\gamma}}$; $\dot{\gamma}$ – градиент сдвига, 1/с.

После преобразований выражение для расчета релаксационного спектра имеет вид

$$H(\theta) = -\tau \left(\dot{\gamma} \right) \left(\frac{d\tau}{\tau} \cdot \frac{\dot{\gamma}}{d\dot{\gamma}} - 1 \right); \quad (2.13)$$

Учитывая, что $\tau = A_i \cdot e^{-\alpha_i \dot{\gamma}}$ и $\frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} = -\alpha_i \tau$ и раскрыв скобки в выражении (2.13), после математических преобразований имеем

$$H(\theta) = \tau \left(\dot{\gamma} \right) + \alpha_i \tau \left(\dot{\gamma} \right) \frac{\dot{\gamma}}{A_i \cdot e^{-\alpha_i \dot{\gamma}}}; \quad (2.14)$$

Преобразуем (2.14) к виду

$$H(\theta) = A_i \cdot e^{-\alpha_i \dot{\gamma}} + \frac{\alpha_i}{\theta}. \quad (2.15)$$

Реологическое уравнение волокнистой суспензии, предложенное Терентьевым О.А., имеет вид [1]

$$\tau = \sum A_i \cdot e^{-\alpha_i \dot{\gamma}} + \mu \cdot \dot{\gamma}. \quad (2.16)$$

Дифференцируя, получаем

$$\frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} = -\sum A_i \cdot \alpha_i \cdot e^{-\alpha_i \dot{\gamma}} + \mu. \quad (2.17)$$

Подставляя в уравнение (2.13), имеем

$$H(\theta) = \sum A_i \cdot e^{-\alpha_i \dot{\gamma}} - \left(1 + \alpha_i \cdot \dot{\gamma}\right). \quad (2.18)$$

Выражения (2.15) и (2.18) позволяют рассчитывать релаксационные спектры из реологических характеристик волокнистых суспензий.

Произведем расчет релаксационного спектра небеленой сульфатной целлюлозы концентрацией 2,5% и степенью помола 35°ШР. Реологическое уравнение такой кривой

$$\tau = 149,3e^{-0,035 \dot{\gamma}} - 96,3e^{-0,055 \dot{\gamma}} - 29,0e^{-0,08 \dot{\gamma}} + 0,0985 \dot{\gamma}. \quad (2.19)$$

На рис.19 представлен сравнительный анализ теоретических и экспериментальных релаксационных характеристик. Из анализа данных, приведенных на рис. 19, следует, что даже преобразуя расчетные формулы для релаксационного спектра, полученные теоретические зависимости неудовлетворительно описывают экспериментальные данные, особенно в области градиентов сдвига $150 \frac{1}{c} < \dot{\gamma} < 200 \frac{1}{c}$ при $\dot{\gamma} > 250$. Используя данные зависимости, невозможно рассчитать релаксационный спектр.

Анализируя динамику изменения τ_1 – напряжений, характеризующих трение волокнистого стержня о стенку канала; τ_2 – напряжений, характеризующих внутреннюю прочность волокнистого стержня; τ_3 – напряжений, характеризующих первоначальную прочность флокул, можно сделать вывод, что представление реологического уравнения в виде суммы экспонент несколько искажает физическую картину структурообразования в потоке волокнистой суспензии.

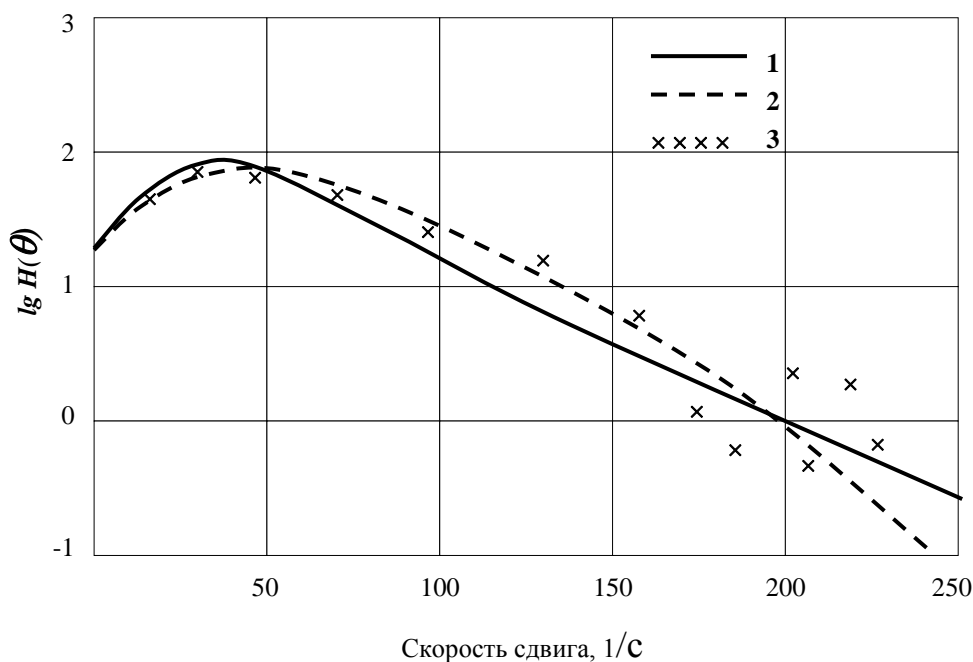


Рис.19. Релаксационные характеристики небеленой сульфатной целлюлозы концентрацией 2,5% и степенью помола 35°ШР: 1 – теоретический релаксационный спектр, рассчитанный по выведенным выше зависимостям; 2 – теоретический релаксационный спектр, представленный в работе [1]; 3 – экспериментальные данные [1]

Рассмотрим применение наследственной теории вязкоупругости Больцмана к расчету реологических характеристик волокнистых суспензий.

Для получения достоверных значений напряжения сдвига при конкретном градиенте сдвига необходима выдержка исследуемой системы в данных условиях, определяемая временем релаксации. В свою очередь, время релаксации рекомендуется определять из реологической характеристики. Следовательно, для прогнозирования реологических и релаксационных свойств необходимо разработать теоретический подход к анализу релаксационных свойств бумажной массы.

Волокнистые суспензии можно отнести к материалам, для которых зависимость между напряжениями и деформациями включает время, т.е. к упруго-вязким материалам.

На рис.20 представлены релаксационные кривые при ступенчатом деформировании, которые характеризуют зависимость напряжения сдвига от скорости нагружения.

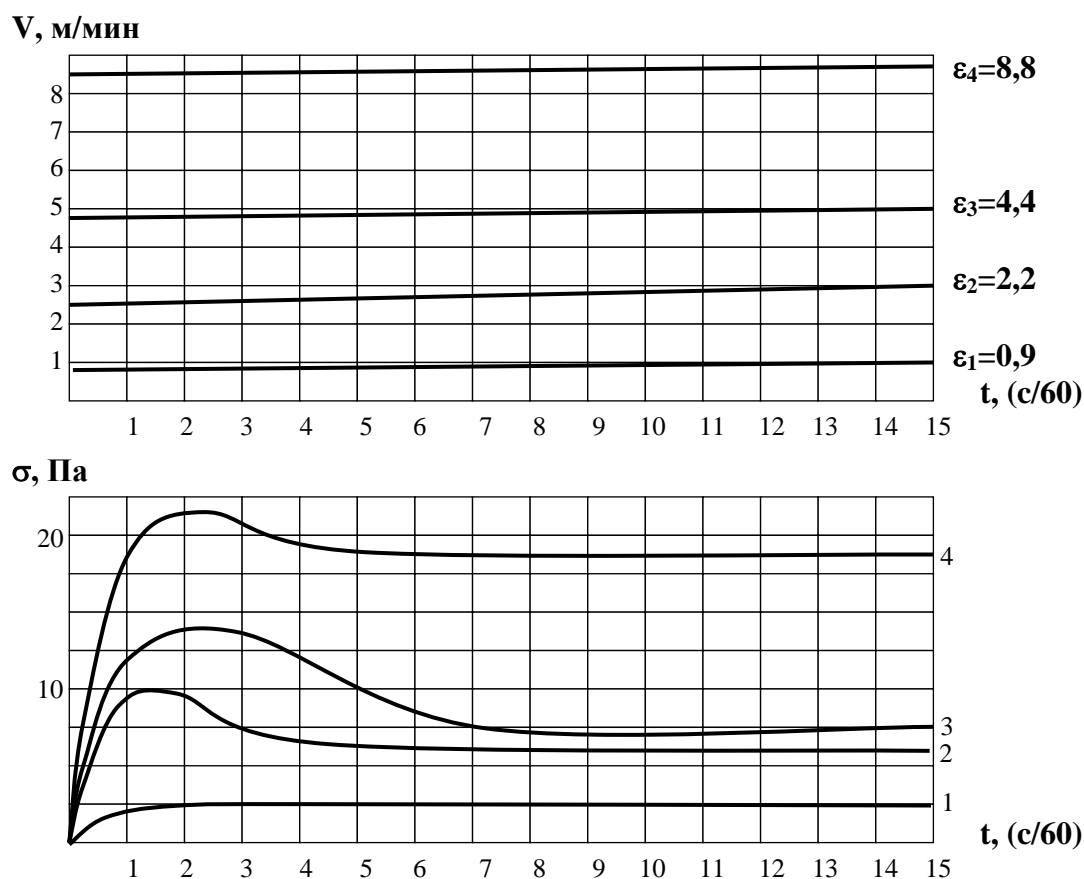


Рис.20. Релаксационные спектры при ступенчатом деформировании

Выражение для релаксирующих напряжений при постоянных уровнях деформаций можно получить из уравнения

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) - E \int_0^t T(t-\tau)\varepsilon(\tau)d\tau, \quad (2.20)$$

где σ – напряжение сдвига, ε – деформация, E – модуль упругости волокон, T – функция влияния, t – время наблюдения, τ – время, предшествующее времени наблюдения.

Полагая $\varepsilon(t) = \varepsilon_k = const$

$$\sigma(t) = E\varepsilon_k \left[1 - \int_0^t T(\tau) d\tau \right], \quad (2.21)$$

где $T(t)$ – функция скорости релаксации.

Представим уравнения релаксации в виде

$$\frac{\sigma_k - \sigma(t)}{\sigma_k} = \int_0^t T(\tau) d\tau; \quad \frac{\varepsilon(t) - \varepsilon_k}{\varepsilon_k} = \int_0^t K(\tau) d\tau; \quad (2.22)$$

где $\sigma_k = E\varepsilon_k = const; \varepsilon_k = \frac{1}{E}\sigma_k = const$.

Экспериментальная кривая

$$\sigma_{\varepsilon}(t) \equiv \frac{\sigma_k - \sigma(t)}{\sigma_k} \sim t; \quad (2.23)$$

и соответствующая теоретическая кривая

$$\sigma_T(t) \equiv \int_0^t T(\tau) d\tau \sim t \quad (2.24)$$

должны совпадать.

Поэтому, имея достаточное количество теоретических кривых $\sigma_T \sim t$ и $\varepsilon_T \sim t$, всегда можно найти среди них ту, которая совпадает с экспериментальной кривой $\sigma_{\varepsilon} \sim t$ или $\varepsilon_{\sigma} \sim t$, построенной в том же масштабе. Поскольку теоретические кривые $\sigma_T(t)$ и $\varepsilon_T(t)$ будут определяться конкретными значениями параметров α_l, β_l, A_l , то уравнения опытных кривых релаксации и ползучести будут содержать функции T и K с теми же числовыми значениями параметров α, β, A , т.е.

$$\frac{\sigma_k - \sigma(t)}{\sigma_k} = \int_0^t T(t, \alpha_l, \beta_l, A_l) dt; \quad (2.25)$$

$$\frac{\varepsilon(t) - \varepsilon_k}{\varepsilon_k} = \int_0^t K(t, \alpha_l, \beta_l, A_l) dt.$$

Таким образом, имея подобную экспериментальной теоретическую кривую, определяемую параметрами α , A_T , β_T , легко определяются параметры экспериментальной кривой для данного материала. Таков же метод определения параметров ядра и модуля по опытным кривым релаксации напряжений, с той лишь разницей, что в данном случае сравниваются экспериментальные кривые функции релаксации

$$\bar{\sigma}_\varepsilon = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_k}, \quad (2.26)$$

и теоретические кривые, построенные в логарифмической сетке координат

$$\bar{\sigma}_T \equiv 1 - \int_0^t T(t) dt. \quad (2.27)$$

Из уравнения релаксации (2.21)

$$\sigma(t) = E \varepsilon_k \left[1 - \int_0^t T(t) dt \right]$$

следует

$$\lg \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_k} = \lg E + \lg \left[1 - \int_0^t T(t) dt \right], \quad (2.28)$$

откуда величина модуля упругости

$$E = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_k \left(1 - \int_0^t T(\tau) d\tau \right)}. \quad (2.29)$$

Подставляя рассчитанный модуль упругости и параметры функции влияния в уравнение (2.21), получим выражение для расчета релаксирующих напряжений, которое позволяет оценить качественно и количественно напряжения в бумажной массе в текущий момент времени с учетом предшествующих деформаций.

Предложенный подход к оценке релаксационных характеристик бумажных масс позволяет прогнозировать структурообразование бумажного полотна в любой точке непрерывного технологического процесса. Использование комплексного подхода к оценке реологических свойств, включающего в себя уже ставшее классическим реологическое уравнение (2.11) и выражение для учета временных параметров (2.21), позволяет более точно аппроксимировать параметры течения бумажной массы, что необходимо для рационального выбора оборудования.

2.5. Уравнение движения бумажных масс в общем виде

Внутренняя структура потока бумажной массы, подаваемого в зону отлива и формования бумаги и предопределяющего качество вырабатываемой бумаги, формируется всей проточной частью. Напорный ящик, как известно, представляет совокупность каналов различной формы – труб различного сечения и диаметра, прямоугольных каналов, диффузоров и конфузоров, объединенных в общую систему, призванную обеспечить равномерный напуск массы по всей ширине бумагоделательной машины. Обеспечение оптимальных гидродинамических условий в потоке возможно лишь на основе учета соотношения скоростей и сил, действующих в массоподводящих и массонапускных системах, для чего необходимо знание общего уравнения движения бумажных масс.

Общее уравнение движения бумажных масс выводится на основе реологического уравнения бумажных масс, считая бумажную массу сплошной несжимаемой средой.

Для любой жидкости, как известно, справедливо уравнение динамики жидкости в напряжениях

$$\rho \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} = \rho \bar{F} + \operatorname{div} P, \quad (2.30)$$

где ρ – плотность жидкости; \bar{V} – вектор абсолютной скорости потока; t – время; \bar{F} – вектор массовых сил; P – тензор напряжений в жидкости.

Тензор напряжений P представляет собой сумму двух составляющих

$$P = P_1 + P_0, \quad (2.31)$$

где P_1 – шаровая часть тензора; P_0 – девиаторная часть тензора.

Шаровая часть тензора является функцией гидростатического давления в потоке

$$P_1 = -p\varepsilon, \quad (2.32)$$

где p – среднестатическое давление в потоке; ε – единичный тензор.

Девиаторная часть тензора является функцией напряжения сдвига в жидкости, т.е.

$$P_0 = \{\tau_{ij}\}, \quad (2.33)$$

где τ_{ij} – напряжение сдвига в жидкости.

Реологическое уравнение для одномерного течения имеет вид

$$\tau = \sum_{K=1}^{n+1} A_K e^{-\alpha_K \dot{\gamma}} + \mu \dot{\gamma}. \quad (2.34)$$

Предполагаем, что уравнение справедливо и для многомерного движения, тогда реологическое уравнение примет вид

$$\tau_{ij} = \sum_{K=1}^{n+1} A_K e^{-\alpha_K \dot{\gamma}_{ij}} + \mu \dot{\gamma}_{ij}. \quad (2.35)$$

В этом виде уравнение может быть представлено в качестве составляющих компонентов тензора напряжений сдвига.

Обозначим

$$P_0 = \{P_{ij}\}. \quad (2.36)$$

Тогда с учетом выражения (2.17) можем записать

$$\{P_{ij}\} = \sum_{K=1}^{n+1} A_K e^{-\alpha_K \dot{\gamma}_{ij}}. \quad (2.37)$$

Преобразуем уравнение (2.30) с учетом составляющих тензора и получим

$$\rho \frac{d\bar{V}}{dt} = \rho \bar{F} + \operatorname{div} P_1 + \operatorname{div} P_0,$$

или

$$\rho \frac{d\bar{V}}{dt} = \rho \bar{F} - \operatorname{grad} P + \operatorname{div} \left(\sum_{K=1}^{n+1} A_K e^{-\alpha_K \dot{\gamma}_{ij}} + \mu \dot{\gamma}_{ij} \right). \quad (2.38)$$

Уравнение (2.38) представляет собой уравнение движения бумажных масс в общем виде, записанное в векторной форме.

Характерной особенностью уравнения, учитывающего аномалию бумажной массы, является наличие в нем члена, характеризующего внутреннее напряжение структурированного потока, т.е. члена

$$\sum_{K=1}^{n+1} A_K e^{-\alpha_K \dot{\gamma}_{ij}}.$$

В диспергированном потоке этот член вырождается и уравнение преобразуется в уравнение Навье-Стокса

$$\rho \frac{d\bar{V}}{dt} = \rho \bar{F} - \operatorname{grad} P + \mu_T \operatorname{div} \dot{\gamma}_{ij}. \quad (2.39)$$

В данном уравнении, как отмечает О.А.Терентьев, численное значение коэффициента динамической вязкости принимается для ньютоновских жидкостей, поскольку в диспергированной бумажной массе на величину коэффициента μ_T оказывают

демпфирующее влияние ориентированные по ходу потока волокна.

Уравнение движения бумажных масс позволяет производить расчет массоподводящих и массонапускных систем, дает возможность судить о внутренней структуре потока бумажной массы, что является особенно важным при оценке диспергированности потока в проточной части напорных ящиков.

В качестве примера подобного рода расчетов ниже проведем расчет структуры потока бумажной массы в напускном устройстве напорного ящика.

2.6. Реологические характеристики волокнистых суспензий повышенной концентрации

Экспериментальные исследования, выполненные в Санкт-Петербургском государственном технологическом университете растительных полимеров, показывают, что с увеличением концентрации волокнистой суспензии изменяются как количественные параметры реологической характеристики, так и качественный вид кривой течения. На рис.21 представлены реологические кривые для суспензий сульфитной беленой целлюлозы марки Б-1 (степень помола 20^0 ШР) концентрацией 1 % и 2 %.

Кривая течения 1 по виду типична для реологических характеристик в диапазоне низких концентраций (до 1,0–1,5 %). Она имеет одну точку перегиба, а на кривой 2 явно выражены две точки перегиба. Обе кривые имеют начальное напряжение сдвига τ_0 , причем для суспензии повышенной концентрации τ_0 больше, чем суспензии более низкой концентрации. Более прочная структура массы повышенной концентрации полностью диспергируется при $\dot{\gamma}_{кр} \approx 260\text{с}^{-1}$, в то время как менее прочная структура суспензии низкой концентрации диспергируется при $\dot{\gamma}_{кр} \approx 260\text{с}^{-1}$. Суспензия повышенной концентрации требует больших затрат энергии на разрушение структуры, о чем свидетельствуют более высокие значения касательных напряжений на аномальном участке кривой 2.

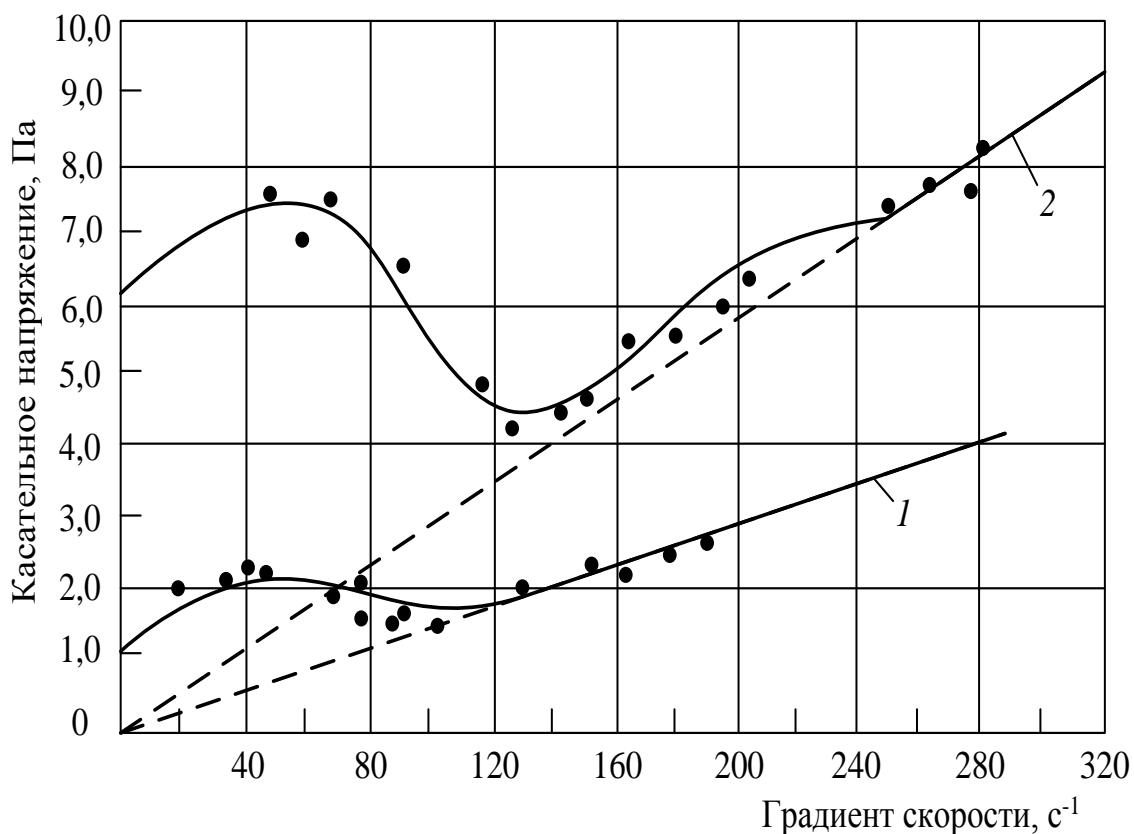


Рис.21. Сопоставление реологических характеристик для волокнистой суспензии низкой (кривая 1) и повышенной (кривая 2) концентрации

В диспергированном режиме движения суспензия повышенной концентрации имеет больший коэффициент динамической вязкости, чем масса низкой концентрации, так как с увеличением числа волокон повышается интенсивность трения между соседними слоями потока.

Анализ физического процесса структурированного потока суспензии повышенной концентрации показывает, что в начальной стадии движения в бумажной массе наблюдаются крупные флокулы, обладающие высокой прочностью внутренних связей. При нарастании скорости потока флокулы подвергаются постепенно увеличивающемуся воздействию со стороны сил трения, и наступает момент, когда флокулы лавинообразно разрушаются.

Этот момент характеризуется резким «провалом» в аномальной части кривой течения реологической характеристики.

Далее с увеличением градиента скорости развитие внутренней структуры потока суспензии идет также как и потока бумажной массы низкой концентрации. Таким образом, принципиальное отличие кривой течения суспензии повышенной концентрации от кривой течения бумажной массы низкой концентрации заключается в наличии на ней двух точек перегиба, а в физическом описании процесса структурообразования отличие заключается в наличии добавочных внутренних напряжений, вызванных появлением крупных проточных флокулообразования.

С учетом указанных особенностей (наличия двух перегибов на кривой течения) из реологического уравнения волокнистой суспензии общего вида (2.11) получено аналитическое описание кривой течения волокнистой суспензии повышенной концентрации

$$\tau = A_1 e^{-\alpha_1 \dot{\gamma}} + A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}} + A_3 e^{-\alpha_3 \dot{\gamma}} + \mu_T \dot{\gamma},$$

где величины A_1 , A_2 , α_1 , α_2 , μ_T , $\dot{\gamma}$ имеют тот же физический смысл, что и в уравнении (2.11); A_3 – напряжение, характеризующее первоначальную прочность флокул; α_3 – временной фактор, пропорциональный длительности существования флокул в потоке.

В полученном уравнении напряжение $\tau = A_3 e^{-\alpha_3 \dot{\gamma}}$ характеризует внутреннюю прочность флокул, совпадает по закону действия силы с напряжением прочности стержня в целом; изменяется по асимптоте, имеющей реальный рабочий диапазон по градиенту скорости меньший, чем для первых двух членов правой части уравнения.

Таким образом, данное уравнение может быть рекомендовано для аналитического описания реологических характеристик волокнистых суспензий, имеющих две точки перегиба на кривых течения. По имеющимся экспериментальным данным, такие реологические характеристики имеют суспензии концентрацией до 2,5–3 %.

3. ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

МАССОНАПУСКНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОРГАНИЗАЦИЮ ПОТОКА И КАЧЕСТВО БУМАЖНОГО ПОЛОТНА

3.1. Требования, предъявляемые к напорным ящикам. Классификация и основные конструкции напорных ящиков

Существенное влияние на качество бумажного полотна и обеспечение бесперебойной работы бумагоделательной машины оказывает конструкция напорного ящика. Получение полотна равномерной массы 1 м^2 по всей ширине машины с равномерным просветом и высокими показателями механической прочности возможно лишь при наличии напорного ящика, обеспечивающего подачу массы на сетку с одинаковой скоростью по всей ширине и высоте выходящего потока; скорость этого потока должна находиться в определенной зависимости от скорости сетки. Напорный ящик должен предотвращать возможность флокуляции и ориентации волокон в потоке, обеспечивать микротурбулентный режим движения бумажной массы, отсутствие застойных зон, водоворотных областей и поперечных течений, сохраняя при этом равномерное распределение волокон и наполнителя. Конструкция напорного ящика должна исключать вовлечение воздуха в поток массы. Напорные ящики быстроходных бумагоделательных машин в настоящее время делятся на следующие виды [7]:

- открытые напорные ящики;
- закрытые напорные ящики: с воздушной подушкой, без воздушной подушки;
- напорные ящики турбулентного типа.

Напорные ящики тихоходных машин представляют собой ящики открытого типа, хотя в некоторых случаях для тихоходных машин применяют и напорные ящики других видов.

Как показано выше, проблема организации потока в рабочих каналах напорных ящиков заключается в регулировании этого потока с целью предотвращения завихрений и поперечных токов,

вызывающих флокуляцию волокон и являющихся причиной неравномерного распределения массы 1 м² вырабатываемой бумаги. Анализ литературных данных свидетельствует о том, что избежать возникновения побочных потоков можно лишь при правильном расчете проточной части напорных ящиков. Практика эксплуатации массонапускных систем показывает, что значительно легче регулировать характер потока путем его ускорения, чем когда поток движется равномерно или с замедлением. Это положение необходимо иметь в виду при оценке конструкций напорных ящиков.

На рис.22 приведены основные схемы напорных ящиков, применяемых как на тихоходных (менее 150 м/мин) - рис.22а, рис.22б, так и на среднеходных бумагоделательных машинах - рис.22в.

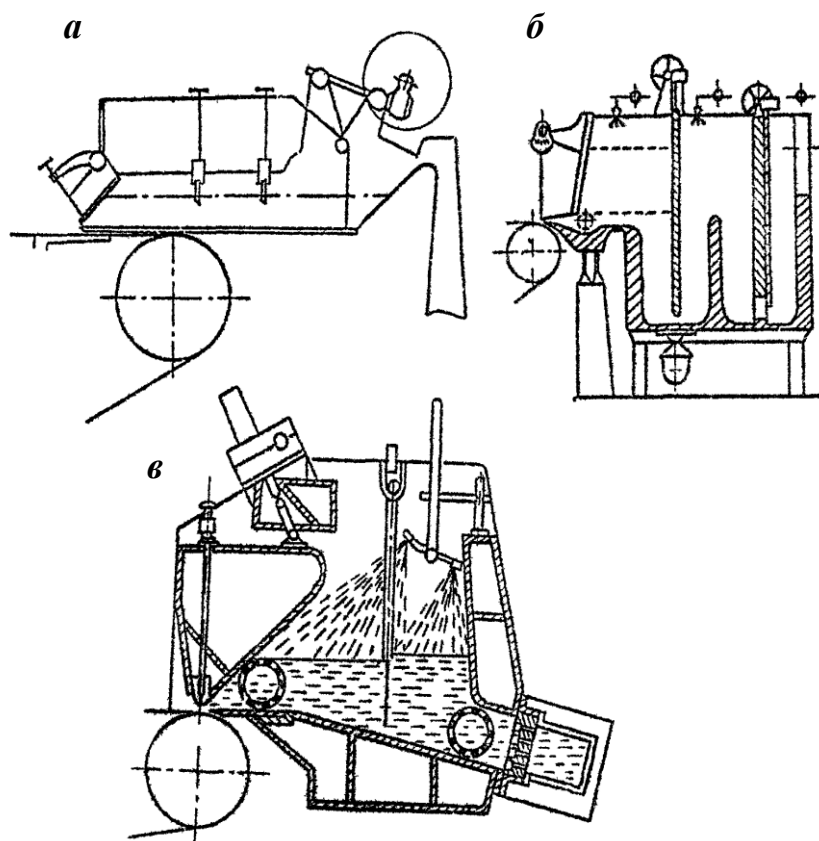


Рис.22. Схемы основных конструкций открытых напорных ящиков

Ввиду низкой производительности на тихоходных машинах

скорость потока бумажной массы, проходящего через напорный ящик, очень мала. Это увеличивает возможность появления флокул в напорном ящике, так как диапазон скоростей потока бумажной массы соответствует ламинарному (стержневому) режиму течения. Тенденция к флокулообразованию возрастает при увеличении массы 1 м^2 вырабатываемой бумаги, поскольку в этом случае, как правило, увеличивается концентрация массы в напорном ящике. Использование при таких повышенных концентрациях длинноволокнистой бумажной массы, как это часто бывает при выработке специальных сортов бумаг, также увеличивает склонность к флокулообразованию.

Так как величина напора, необходимого для придания потоку массы из напорного ящика скорости, приблизительно равной скорости движения сетки, определяется скоростью движения сетки, то при малых скоростях бумагоделательных машин необходимы весьма незначительные величины напора. Сама по себе величина напора налагает большие ограничения на конструкцию напорного ящика, поскольку исключает возможность применения перфорированных валиков для разрушения флокул. Для тихоходных машин величина необходимого напора может быть настолько низкой, что исключает возможность применения даже обычной вертикальной губы в напускном сечении напорного ящика. Поэтому при эксплуатации напорных ящиков низкоскоростных бумагоделательных машин особое значение придается предшествующей напорному ящику потокораспределительной системе.

На рис.22а показана конструкция открытого напорного ящика для тихоходной бумагоделательной машины – напорный ящик с двумя вертикальными перегородками. При использовании такого напорного ящика диспергирование массы осуществляется за счет ускорения потока при прохождении подпорных перегородок.

На рис.22б приведена схема открытого напорного ящика, работающего в диапазоне скоростей 150-250 м/мин. Напорные ящики такого типа не только неэффективно распределяют бумажную массу по ширине машины, но и в ряде случаев являются причиной нестабильности потока, так как низкая скорость и повторяющиеся повороты способствуют появлению беспорядочных потоков в напускном устройстве. Следствием этого является

образование застойных зон, в которых происходит интенсивное флокулообразование, имеют место осаждение массы и образование слизи. Напорный ящик, вызывающий трудности в эксплуатации вследствие образования большого количества слизи, считается непригодным к использованию, даже если он обеспечивает хорошее распределение бумажной массы. Некоторые свойства массы, например, высокая зольность, наличие длинных волокон, высокое содержание воздуха и присутствие смолы в значительной степени способствуют скоплению слизи.

На рис.22в приведена схема напорного ящика ЯО-2, разработанного ЦНИИБуммашем, предназначенного для использования на скоростях до 180 м/мин. Ящик имеет подвижную переднюю стенку, позволяющую изменять угол падения струи массы на сетку, снабжен потокораспределителем с прямоугольным коллектором и перфорированной плитой. Для создания турбулентности потока при малой скорости движения предусмотрены специальные перегородки с механизмом регулировки их по высоте. Эти ящики применяются на многих предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности.

С повышением скоростей бумагоделательных машин возрастают требования, предъявляемые к системам потокораспределения. Так как эффективность применяемых в настоящее время систем потокораспределения ограничена тем или иным скоростным диапазоном и реологическими характеристиками используемой бумажной массы, то устранение неравномерности потока отводится напорному ящику. Достигается это путем установки различного рода гидравлических сопротивлений на пути потока, вследствие чего габариты напорного ящика увеличиваются, конструкция его усложняется и, следовательно, возникают новые проблемы, связанные с флокуляцией волокон и слизиобразованием.

При скорости машины свыше 450 м/мин требуемая высота напора массы в напорном ящике становится значительной, что усложняет его конструкцию. При скорости сетки, близкой к 400 м/мин, величина необходимого напора в напускном устройстве превышает 2 м. При таком высоком уровне массы в напорном ящике предотвращение застаивания массы становится весьма затруднительным, а большие нагрузки могут являться причиной прогиба передней стенки, что весьма отрицательно сказывается на

эффективности работы напускного устройства. В силу указанных обстоятельств на быстроходных машинах широкое распространение получили конструкции закрытых напорных ящиков.

Закрытые напорные ящики нашли применение как на традиционных плоскосеточных машинах, так и на двухсеточных формующих устройствах. Закрытые напорные ящики делятся на два вида: напорные ящики с воздушной подушкой и напорные ящики без воздушной подушки. Среди напорных ящиков с воздушной подушкой, требуемый напор в которых обеспечивается уровнем массы и давлением воздушной подушки, выделяют два основных типа: 1 – с перфорированными валиками и переливом; 2 – с пучком распределительных труб.

Основные схемы закрытых напорных ящиков с воздушной подушкой приведены на рис.23.

Традиционный напорный ящик прямоугольного сечения с перфорированными валиками и переливом показан на рис.23а. Этот тип можно рассматривать как переходную модель от ранних конструкций к современным напорным ящикам. В том случае, когда расход массы мал или когда используется длинноволокнистая масса, общие характеристики потоков таковы, что предотвратить флокуляцию невозможно. Большинство закрытых напорных ящиков рассчитано на скорости в проточных каналах в пределах 0,15–0,45 м/с.

Существенное влияние на распределение скоростей в полости напорного ящика, показанного на рис.23а, оказывает уровень бумажной массы. Попытки работать с низким уровнем массы в напорном ящике успеха не имели, так как в этом случае дефекты работы распределительной системы проявляются в неравномерности распределения давления в напускном устройстве, как показано на рис.24. Если же уровень массы в полости напорного ящика достаточно высок, недостатки работы потокораспределительной системы в значительной мере устраняются.

Для организации потока конструкция этого ящика не является оптимальной: способность выравнивать поток мала, а форма передней стенки нередко является причиной нестабильности потока в зоне отлива и формования бумажного полотна, о чем

свидетельствуют данные, приведенные на рис.25.

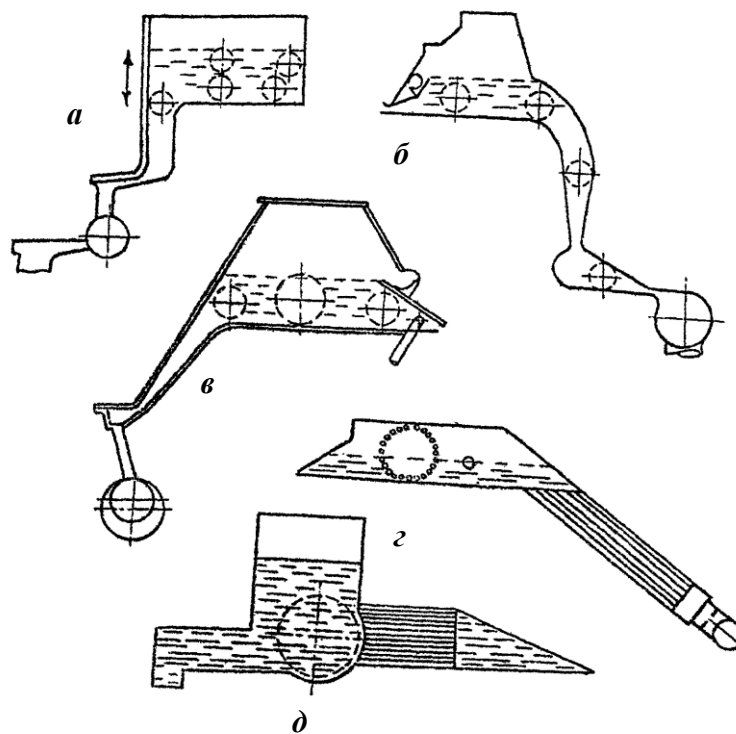


Рис.23. Схемы основных конструкций закрытых напорных ящиков с воздушной подушкой

По мнению большинства исследователей, такой напорный ящик достаточно надежен, так как возможные неполадки не столько серьезны, чтобы заметно ухудшить эффективность его работы. Подобные конструкции напорных ящиков до настоящего времени применяются на быстроходных бумагоделательных машинах для выработки газетной и крафт-бумаг, где в потоке массы, проходящем через рабочие каналы ящика, можно поддерживать достаточно высокую скорость.

На рис.23б приведена схема современного напорного ящика для среднескоростных машин. Напорный ящик снабжен переливом, применение которого необходимо при выработке бумаги из массы, содержащей большое количество наполнителя и проклеивающих веществ. Вместе с тем перелив делает конструкцию напорного ящика более сложной, а напускное устройство менее доступным, не говоря о том, что увеличивается общая площадь рабочих поверхностей напорного ящика, а, следовательно, и возможность

слизееобразования.

Напорный ящик для быстроходных бумагоделательных машин, схема которого приведена на рис.23в, считается одним из лучших в области конструирования закрытых напорных ящиков с воздушной подушкой (усовершенствованная конструкция, см. рис.23а). Масса из конического многотрубного потокораспределителя поступает в очень узкую «взрывную» камеру. Угол между стенками замедлителя потока, в качестве которого используется плоский диффузор, составляет 8° , и сам диффузор сравнительно короткий.

Влияние уровня массы в полости напорного ящика на равномерность распределения давления по ширине конструкции приведено на рис.24.

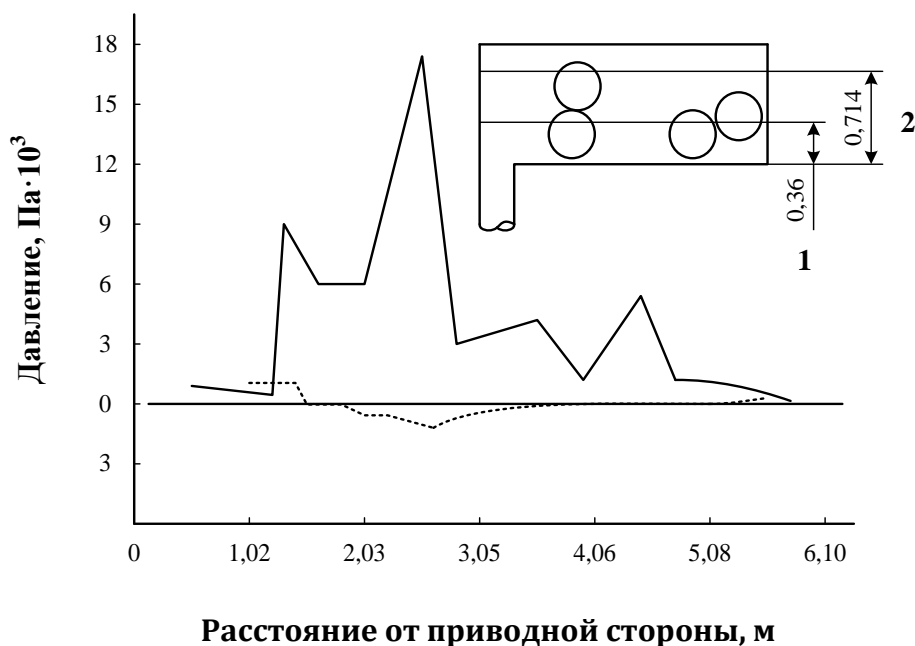


Рис.24. Распределение давления в напорном ящике при работе с различными уровнями массы: 1 – уровень массы 0,36 м; 2 – уровень массы 0,72 м

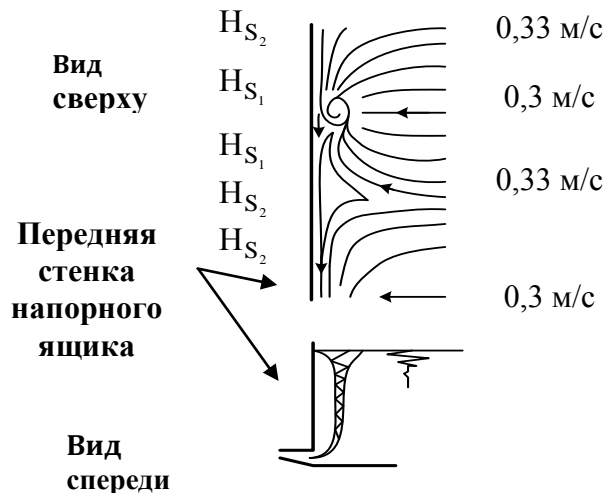


Рис.25. Механизм вихреобразования на передней стенке напорного ящика

Отрыв потока в диффузоре предотвращается использованием малых углов раскрытия диффузора, а также установкой в его широком конце перфорированного валика. Скорость потока в диффузоре регулируется перемещением всей задней стенки ящика. Высота уровня массы ниже, чем в конструкции, показанной на рис.23а, таким образом, для диспергирования потока достаточно одного ряда перфорированных валиков. Верхний из сдвоенных валиков в напускном сечении заменен удлиненным конфузуром с углом сужения 30° , который заканчивается вертикальной напускной губой.

Представляет интерес конструкция, изображенная на рис.23г, известная под названием напорного ящика с «замороженным» потоком. Равномерное распределение потока, подаваемого в зону отлива и формования, осуществляется коллекторной системой с двумя рядами диафрагм. Проточная часть напорного ящика представляет собой канал прямоугольного сечения. Высота уровня массы принимается из расчета обеспечения скорости массы в проточной части напорного ящика (0,45 м/с), что обычно соответствует высоте уровня массы от 150×10^{-3} до 250×10^{-3} м. Если наблюдать поток сверху, то бумажная масса, движущаяся в напорном ящике, кажется замерзшей, представляющей сплошное стержневое течение, откуда и произошло название

«замороженный» поток. Не подлежит сомнению, что такой поток полностью свободен от поперечных токов и макротурбулентных завихрений. С целью предотвращения флокуляции массы в полости напорного ящика установлен валик, выполненный в виде «беличьего колеса» погруженный в массу примерно на две трети. Следует отметить, что в напускном устройстве дополнительные диспергаторы не устанавливаются. Характер потока, подаваемого на сетку, судя по распределению массы в полотно бумаги, является равномерным и стабильным, хотя и не превосходящим предполагаемого при использовании правильно спроектированных напорных ящиков других типов.

Попытки разработать конструкции, обеспечивающие подачу на сеточный стол стабильного равномерного потока с мелкомасштабной турбулентностью, привели к созданию серии напорных ящиков, известных под названием «Bunch-Tube». По данным фирмы-изготовителя «Black-Clawson», эти ящики успешно используются при скоростях от 100 до 1000 м/мин.

Напорный ящик этой серии, изображенный на рис.23д, успешно применялся на машине, вырабатывающей газетную бумагу со скоростью 900 м/мин. Диспергирование массы и выравнивание неравномерности скорости потока по ширине машины обеспечивается за счет градиентов давления, возникающих при движении массы в пучке труб, установленных в сечении, предшествующем напуску массы на сеточный стол. С целью устранения возможности забивания трубок перед трубчатым распределителем установлен перфорированный валик с отверстиями диаметром $25,4 \cdot 10^{-3}$ м, генерирующий пульсации небольшой амплитуды и высокой частоты. Установка трубчатого распределителя, по мнению фирмы, более эффективна, чем установка дополнительного перфорированного валика.

Конструкции типа «Bunch-Tube» представляются перспективными, однако, до настоящего времени отсутствуют обоснованные рекомендации по выбору диапазона оптимальных скоростей движения массы в пучке труб в зависимости от вида применяемой бумажной массы, ее композиции, концентрации, степени разработанности волокон с целью обеспечения полной диспергации потока.

Напорные ящики закрытого типа без воздушной подушки

представляют собой ящики высокого напора, полностью заполняемые бумажной массой без наличия пространства между крышкой и бумажной массой, как это имеет место в напорных ящиках открытого типа и напорных ящиках с воздушной подушкой. Закрытые, полностью заполняемые массой напорные ящики, имеют меньшие габариты и меньший вес по сравнению с напорными ящиками с воздушной подушкой, что имеет существенное значение при двухсеточном формовании.

Одним из недостатков закрытых напорных ящиков без воздушной подушки является то, что бумажная масса в таких конструкциях находится в постоянном контакте с внутренней поверхностью ящика и воздух, растворенный в массе, движется вдоль этой поверхности. Воздух, поднимаясь вверх, увлекает за собой частицы смолы, канифоли, наполнители и прочие компоненты бумажной массы. Эти включения засоряют внутреннюю поверхность напорного ящика, что приводит к образованию комочков и хлопьев. Наличие в напорных ящиках перфорированных валиков не гарантирует полного устранения флокул. Кроме того, воздух может скапливаться позади волокон, вызывая зависание последних. В результате пузырьки воздуха проходят через напускное устройство и являются причиной дефектов на лицевой стороне полотна бумаги.

Эти явления могут быть устранены лишь при условии обеспечения достаточно высокой скорости потока. Величина критической скорости зависит от вида массы, степени ее деаэрации, чистоты обработки внутренних поверхностей ящика и по литературным данным составляет 2,4 м/с для газетной бумаги при выработке ее в обычных условиях.

Существенным недостатком ящиков закрытого типа без воздушной подушки является отсутствие в них «взрывных» камер, способствующих устранению неравномерности потока по ширине напуска. Это обстоятельство в ряде случаев являлось причиной неудовлетворительной работы напорных ящиков такого типа, причем, одной из отрицательных характеристик их работы было появление «бороздок» и чрезмерно сухих полос, обусловленных неравномерностью напуска. Работы, направленные на совершенствование потокораспределительных систем и подавление низкочастотных пульсаций давления в массоподводящих системах

путем установки специальных гасителей пульсаций, позволили в значительной мере повысить эффективность работы напорных ящиков этого типа [8]. Основные схемы закрытых напорных ящиков без воздушной подушки приведены на рис.26. На рис.26а показана схема напорного ящика, в проточной части которого поток перед напуском движется с постоянно возрастающей скоростью. Бумажная масса поступает с одной стороны вращающегося перфорированного вала, внутри которого установлен конический потокораспределитель, обеспечивающий постоянный расход суспензии по всей ширине напорного ящика. Выравнивание неравномерности потока по ширине машины осуществляется перфорированным валиком, установленным перед напускной щелью. Такие конструкции до настоящего времени применялись при выработке газетной бумаги при скоростях до 580 м/мин.

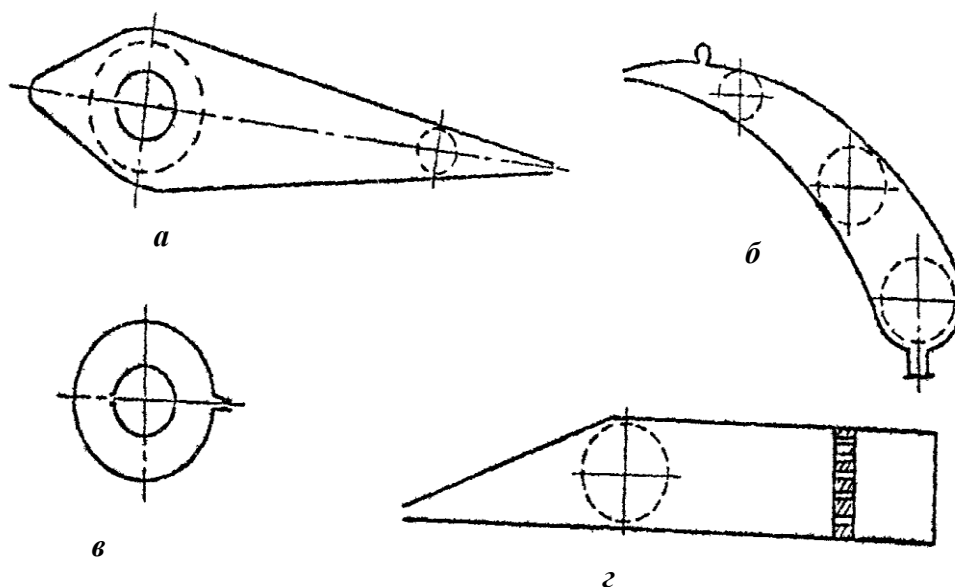


Рис.26. Схемы основных конструкций закрытых напорных ящиков без воздушной подушки

На рис.26б приведена схема напорного ящика с плавно сужающейся напускной камерой и тремя перфорированными валиками.

В проточной части отсутствуют резкие перегибы потока, и в то же время крышка ящика идет горизонтально до самого напускного устройства. Таким образом, в данной конструкции существуют точки или места, в которых возможно скопление воздуха. Напорные ящики такого типа удовлетворительно работают на высокоскоростных плоскосеточных машинах.

Из патентной литературы известна конструкция цилиндрического напорного ящика (рис.26в), в которой масса подводится по трубе, имеющей продольную щель, расположенную с противоположной стороны напуска. Сведения о практическом применении данного типа напорного ящика в литературе отсутствуют. На рис.26г показана схема напорного ящика, снабженного прямоугольным сужающимся потокораспределителем с перфорированной плитой. Данные конструкции применяются на бумагоделательных машинах, работающих в диапазоне скоростей 610-1070 м/мин, однако, по данным фирмы «Beloit», без перфорированных валиков не обеспечивается требуемый уровень диспергирования потока.

Напорные ящики турбулентного типа делятся на ящики со «взрывной» камерой и без нее. На рис.27а и рис.27б приведены схемы напорных ящиков турбулентного типа с «узким» каналом и камерой «взрывного» типа, применяемых при двухсеточном формовании. Конструкции напорных ящиков включают резервуары с воздушной подушкой и расширительные или «взрывные» камеры, куда обычно масса подводится через блок труб. «Взрывные» камеры в ряде конструкций снабжены перегородками и пучками стержней для дополнительного диспергирования потока. Напускное устройство выполняется в виде сужающегося канала с углом конфузорности 6-14°. Напорный ящик, схема которого приведена на рис.27б по данным фирмы «Beloit», может быть использован при скоростях 750-900 м/мин в диапазоне концентраций до 2 %. Подробные данные эксплуатации напорных ящиков такого типа в литературе отсутствуют. Представляется, однако, весьма сложной задачей определение места установки диспергирующих элементов (перегородок, пучков стержней и т.п.) в полости напорного ящика с целью получения стабильного потока, подаваемого в зону отлива и формования.

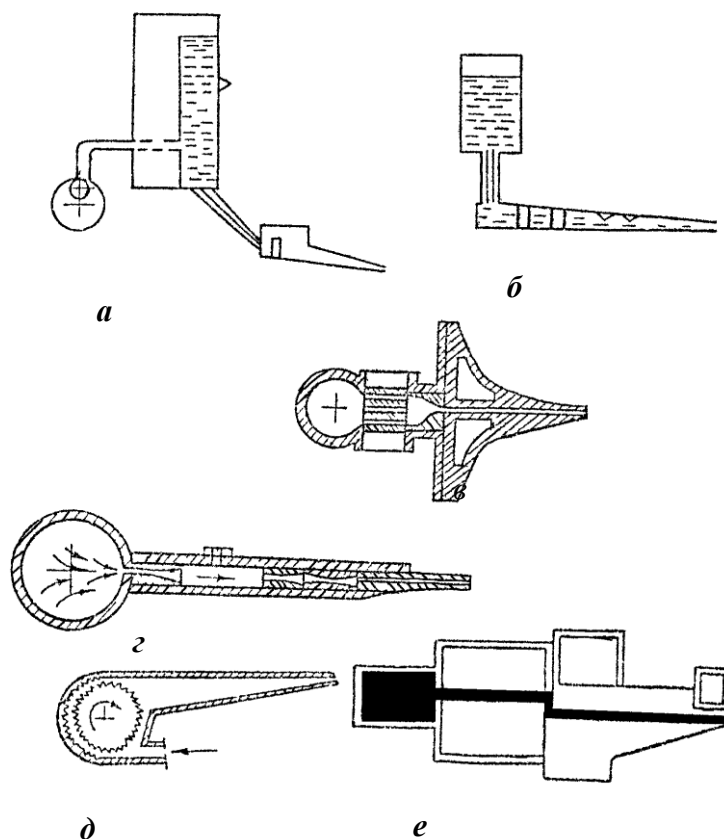


Рис.27. Схемы основных конструкций напорных ящиков турбулентного типа

К настоящему времени разработано большое количество напорных ящиков с «узким» каналом без «взрывной» камеры. Так, в конструкции, приведенной на рис.27в, масса из коллектора через ряд расширяющихся каналов поступает в распределительную камеру и далее через канал с параллельными стенками в зону отлива и формования. Известны конструкции напорных ящиков, в которых входной канал выполняется в виде сочетания плоских конфузоров и диффузоров с малыми углами. В конструкции напорного ящика, схема которого приведена на рис.27г, каналу с параллельными стенками предшествует несколько рядов сопл: первый ряд сопл $63,5 \cdot 10^{-3}$ м (диффузор с углом раскрытия 8°), остальные ряды длиной $19,05 \cdot 10^{-3}$ с диффузором 14° . Такая конструкция, предназначенная для работы на массе высокой концентрации, была испытана в диапазоне концентраций бумажной массы до 2 %. Однако при концентрациях свыше 1,5 % поток, подаваемый в зону формования, не стабилен.

Необходимо отметить, что проточные части данных

конструкций должны быть рассчитаны таким образом, чтобы и после расширения потока скорость его соответствовала турбулентному режиму движения, ибо при невыполнении этого условия наблюдается интенсивное флокулообразование в потоке, причем флокулы могут сохраняться, вплоть до напускного сечения.

Напорный ящик, схема которого приведена на рис.27*d*, снабжен рифленным барабаном с кольцевыми и продольными канавками. Такие канавки нарезаны и на гребенке, расположенной на внутренней стороне цилиндрической камеры. Зазоры между выступами барабана и гребенки составляют 0,5-0,8 мм. Барабан и гребенка выполняют роль гидродинамического диспергатора. Напорный ящик разработан в ЦНИИБуммаше и предназначен для выработки печатных видов бумаг при концентрации массы 0,7 % и скорости до 1500 м/мин.

В последнее время все более широкое применение получают напорные ящики с рифленным «узким» каналом, предназначенные для работы с бумажными массами повышенной концентрации, что позволяет значительно снизить потребление воды и уменьшить энергоемкость производства. Примером такой конструкции является напорный ящик «Formflow», схема которого показана на рис. 27*e*, работающий при концентрациях массы до 4 %.

Эффективность работы напорных ящиков турбулентного типа во многом определяется работой подводящих массопроводов и систем потокораспределения. Если введение гасителей низкочастотных колебаний в значительной степени позволяет устранить нежелательные пульсации потока, то неравномерность распределения скоростей и давлений по ширине напорного ящика, вызванную некачественной работой системы потокораспределения, устранить в малообъемных системах, какими являются напорные ящики турбулентного типа, весьма трудно.

3.2. Влияние потокораспределительных и массопроводящих систем на организацию потока

В напорных ящиках

Успешная работа напорного ящика во многом определяется эффективностью работы потокораспределительных систем. В настоящее время в производстве бумаги применяется ряд систем, основанных на различных принципах.

В поисках оптимальной конструкции были разработаны системы: коллекторная цилиндрическая (рис.28а), многоходовая с разветвляющимися отводами (рис.28б) и поперечно-поточная (рис.28е). В коллекторной цилиндрической система поток, движущийся в продольном направлении, делится на ряд потоков, или от центральной трубы на несколько отводов.

Многоходовая с разветвляющимися отводами система состоит из большого количества Т-образных и У-образных разветвлений. Вследствие нестабильности делящихся потоков системы такого типа не обеспечивают равномерного распределения массы.

В ряде конструкций последовательное расширение потока в продольном направлении осуществляется с помощью диффузоров (рис.28в-д). Диффузоры часто используются в сочетании с коллекторной системой. Диффузорная система потокораспределения громоздка и неудобна, поскольку характеризуется неустойчивым и неравномерным полем скоростей, а также зонами отрыва потока волокнистой суспензии от стенок, если только не использовать диффузор с регулируемыми поворотными лопастями (рис.28г) или с уменьшающейся по ходу потока величиной сечения.

Однако с повышением скорости потока гидродинамические характеристики диффузорных систем потокораспределения резко ухудшаются.

Поперечно-поточная система распределения (рис.28е) состоит из двух клинообразных каналов, подающих массу в напорный ящик в противоположных направлениях. Через верхние и нижние зазоры масса из клинообразных каналов подается в смесительную камеру, откуда поступает в уравнительную камеру напорного ящика. Данная система характеризуется

неравномерностью распределения потока, что обусловлено возникновением поперечных потоков на выходе из распределительной системы при слиянии потоков бумажной массы, движущихся в противоположных направлениях. С целью устранения поперечных токов внутри системы и на входе в напорный ящик оптимизировалась геометрия проточных частей, а для гашения гидродинамических пульсаций на выходе из потокораспределителя устанавливались перфорированные валики. Однако, как показал опыт эксплуатации подобных систем, обеспечить равномерное распределение потока бумажной массы по ширине напорного ящика в поперечно-поточных системах не удается даже при наличии двух перфорированных валиков.

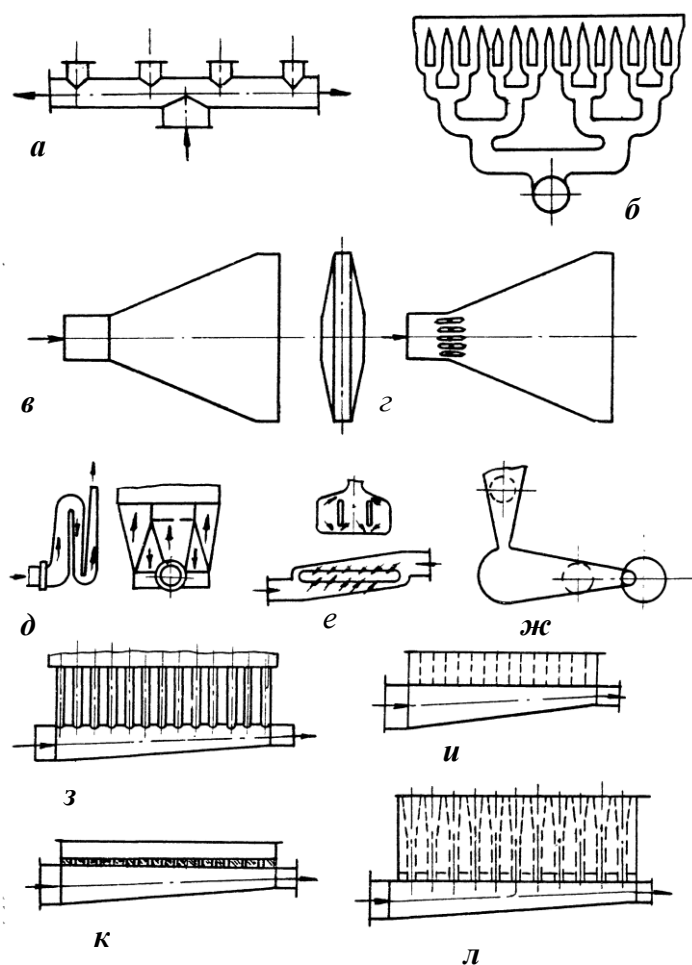


Рис.28. Схемы основных конструкций потокораспределительных систем

Таким образом, ни одна из рассмотренных систем не отвечает требованиям производства бумаги. Оптимальная система

потокораспределения должна отвечать следующим требованиям:

- обеспечивать равномерное распределение давления по всей ширине машины;
- предотвращать разделение потока в напорном ящике на побочные потоки;
- обладать устойчивостью к нестабильности потока на входе в распределительную систему.

Единственно известным в настоящее время решением этих проблем является односторонняя подача массы. Такая система основана на питании напорного ящика с одной стороны – через сужающийся канал, рассчитанный так, чтобы давление вдоль него поддерживалось постоянным по всей ширине машины. Это предполагает рециркуляцию массы и учет потерь энергии потока бумажной массы при изменении расхода. В настоящее время это наиболее распространенный тип распределительной системы для среднескоростных и высокоскоростных бумагоделательных машин. Различные модификации этой системы приведены на рис.28ж–л.

Так, потокораспределительная система с камерой взрывного типа (рис.28ж) представляет собой коническую трубу с боковым подводом массы и линией рециркуляции. Масса из коллектора через боковую щель поступает во взрывную камеру, а затем в диффузор и полость напорного ящика. Некоторые конструкции имеют две взрывные камеры. В этом случае система получается более громоздкой. Экспериментальные исследования показали неэффективность использования взрывной камеры.

Широкое применение получили многотрубные конические системы потокораспределения. Наиболее современная модификация - с односторонним подводом массы - приведена на рис.28з. Конструкция компактна, имеет довольно простую схему отводящих массопроводов, низкие гидравлические потери. Оптимальный процент рециркуляции составляет 5-20 %. За потокораспределителем обычно следует уравнивательная камера, предназначенная для сбора массы, выходящей из отдельных труб-отводов, для снижения и выравнивания скорости и давления в потоке по ширине напорного ящика. Наличие уравнивательной камеры свидетельствует о том, что достичь равномерного распределения не удастся и с помощью многотрубного конического потокораспределителя.

Основные модификации распределительной системы сужающегося прямоугольного типа приведены на рис.28и–л.

На рис.28и показана система с продольными перегородками на выходе из прямоугольного коллектора. Ссылки на исследовательские работы по этому типу распределения отсутствуют. Однако, вероятно, система не в состоянии обеспечить равномерную подачу бумажной массы по ширине напорного ящика, ибо отклонение части потока не может происходить под углом 90° по направлению движения основного потока, что может привести к образованию вихревых зон, препятствующих равномерному потокораспределению.

На рис.28к представлена система потокораспределения прямоугольного сечения с перфорированной плитой. Применение перфорированных плит исключает распространение высокоскоростных струй, подобных зачастую образующимся на выходе из труб-отводов многотрубного конического потокораспределителя, и упрощает конструкцию системы потокораспределения.

Было установлено, что такая система малочувствительна к динамическим нарушениям подводимого потока массы благодаря большому перепаду давления на перфорированной плите по сравнению с возможными колебаниями давления в этом потоке. Эксперименты показали ряд недостатков в данной системе распределения. Завихрения, образующиеся на входной стороне отверстий перфорированной плиты, при повороте потока через нее вызывают отклонение струй от машинного направлению массы в напорном ящике в сторону, противоположную направлению движения потока в сужающем канале. Увеличение толщины перфорированных плит уменьшает отклонение струй, однако, применение толстых плит на практике нецелесообразно ввиду возможности образования высокоскоростных струй, искажающих распределение потока в полости напорного ящика. Для устранения этих дефектов предлагается производить зенковку отверстий на 20° на половину толщины плиты или делать на плите специальные скосы со стороны подачи потока. Однако полностью устранить указанные недостатки не представляется возможным.

Сужающаяся потокораспределительная система прямоугольного сечения с пучком труб представлена на рис.28л.

Она состоит из сужающегося прямоугольного канала и пучка распределительных труб, завальцованных в боковую стенку канала. Пучок труб на входе имеет живое сечение 5,8 %, а на выходе 18 %. По данным фирмы «Black Clawson», системы такого типа эффективно работают при скорости 868 м/мин. Такие системы фирма рекомендует для установки на бумагоделательные машины, работающие со скоростями до 1500 м/мин. Эти системы успешно работают в сочетании с напускным устройством типа «Conwerflo».

На основании анализа основных видов применяемых в настоящее время распределительных систем можно сделать вывод о том, что наиболее совершенными из них являются многотрубные конические и сужающиеся потокораспределители прямоугольного типа с перфорированной плитой или пучком расширяющихся труб. Однако, каждая из этих распределительных систем, как указывалось ранее, имеет свои недостатки и не обеспечивает полностью равномерного подвода массы в полость напорного ящика.

Решающее влияние на эффективность работы той или иной распределительной системы оказывает система подводящих массопроводов. Массопроводы и способы их прокладки должны исключать разделение бумажной массы, неустойчивость состояния потока и его загрязнение. Трубопроводы должны быть короткими и включать минимальное количество элементов, изменяющих направление потока, дробящих и перекрывающих его. Изменение направления потока следует производить строго в одной плоскости, в противном случае в потоке могут возникнуть завихрения. В современных массопроводах широко используются повороты. При использовании этих элементов после изменения направления поток характеризуется неравномерной эпюрой скоростей и концентраций (рис.29). Поэтому за поворотом должен следовать длинный прямой участок массоподвода для выравнивания профиля скоростей и концентраций.

Для поворота непосредственно перед потокораспределителем используются так называемые колена-ускорители (рис.29, поз. 3), дающие лучший профиль скоростей. Однако и в этом случае необходим прямой участок массоподвода длиной не менее пяти диаметров, в пределах которого устанавливается равномерная эпюра скоростей.

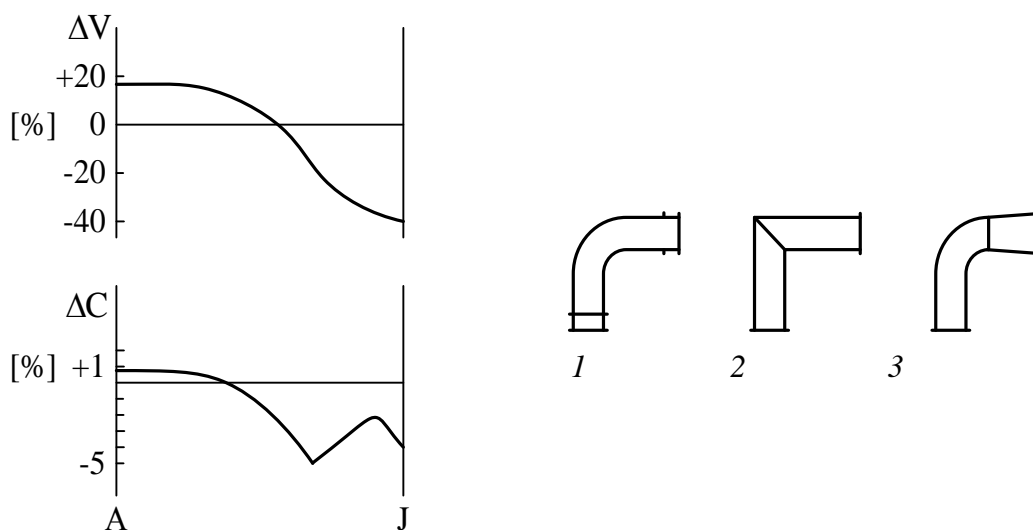


Рис. 29. Профили скоростей и концентраций после колена массопровода: 1 - закругленное колено; 2 - колено; 3 - колено-ускоритель

В ряде случаев используются колена с направляющими лопастями для получения более равномерных профилей скорости бумажной массы.

Непосредственно перед напорным ящиком необходимо исключать такие источники помех, как задвижки и разветвление потока. Для предотвращения образования воздушных мешков, являющихся порой причиной образования сгустков волокна и слизи, массопроводы прокладывают с некоторым подъемом. Массопроводы должны быть прочно закреплены с целью устранения возникновения механических колебаний, являющихся порой причиной колебаний массы 1 м^2 .

С целью изучения влияния распределительной системы на организацию потока в напорном ящике и качество вырабатываемой бумаги проводилось комплексное обследование напорного ящика бумагоделательной машины №2 Холмского целлюлозно-бумажного завода [5].

На основании анализа серий образцов бумаги, взятых с одного съема через один оборот тамбурного вала бумагоделательной машины №2 Холмского ЦБЗ по методике, описанной ранее, проведена оценка работы напорного ящика и

потокораспределительной системы (рис.30).

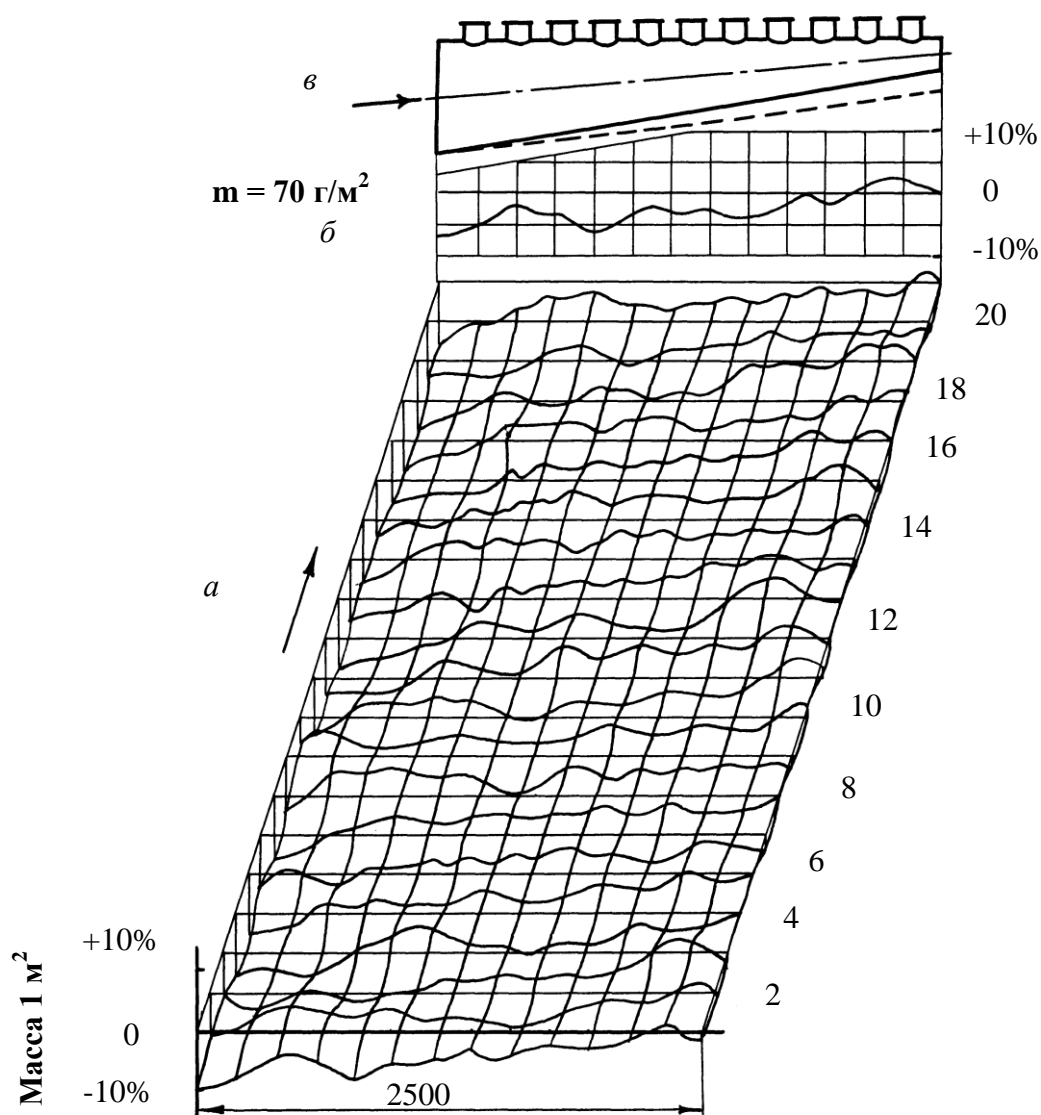


Рис.30. Влияние потокораспределительной системы на распределение массы 1 м^2 вырабатываемой бумаги: а – измеренные профили массы 1 м^2 ; б – характерный профиль массы 1 м^2 ; в – потокораспределитель

Анализ характерного профиля свидетельствует об увеличении толщины полотна бумаги от приводной стороны бумагоделательной машины к лицевой (рис.30б). Проверочный расчет потокораспределителя показал зауженность коллектора на

23 %, что являлось причиной увеличения давления к концу потокораспределителя и соответственно увеличения скорости напуска массы с лицевой стороны машины (рис.30б-в).

Сопоставление результатов анализа с обследованием напорного ящика на месте показало, что колебания массы 1 м^2 бумажного полотна с приводной стороны являются результатом нестабильного подвода массы к потокораспределителю. Одной из причин неравномерного распределения массы с лицевой стороны являлось отсутствие линии рециркуляции массы.

Проводились исследования влияния проточных частей напорных ящиков на параметры потока, подаваемого на сеточный стол бумагоделательной машины [5]. Анализ полученных результатов показывает, что внутренняя структура потока бумажной массы формируется всей проточной частью напорного ящика.

Существенное влияние на формирование структуры потока оказывают элементы, соединяющие потокораспределитель с напорным ящиком. На основании анализа имеющихся литературных данных выбраны основные конструкции отводящих элементов потокораспределительных систем с односторонним подводом, рециркуляцией и коллектором прямоугольного сечения: трубы переменного по длине сечения, трубы постоянного сечения; перфорированные плиты. Эти элементы наиболее широко распространены в конструкциях современных потокораспределителей напорных ящиков бумагоделательных машин, работающих в широком диапазоне скоростей: от среднескоростных до быстроходных бумагоделательных машин.

Исследование выравнивающей и диспергирующей способности перечисленных элементов проводилось при средней скорости потока в напускном сечении 4,2 м/с. Средняя скорость потока в проточной части закрытого напорного ящика составляла 0,4 м/с при глубине плоского канала 0,22 м, что соответствует промышленным условиям работы.

Исследованы следующие конструкции соединительных элементов:

- блок конических диффузоров длиной 0,5 м с живым сечением 5 % на входе и 18% на выходе типа «Converflo»;
- блок труб длиной 0,5 м постоянного живого сечения 18,5 %

с внутренним диаметром труб $23 \cdot 10^{-3}$ м типа «Bunch-Tube»;

- блок, состоящий из двух перфорированных плит толщиной $20 \cdot 10^{-3}$ м, установленных на расстоянии 0,5 м с живым сечением 5 и 15 %, диаметрами отверстий $16 \cdot 10^{-3}$ м и $19 \cdot 10^{-3}$ м.

После анализа эпюр распределения скоростей по ширине и высоте канала проточной части при использовании названных соединительных элементов проводилось сопоставление эффективности их работы. Мерные сечения находились на расстоянии 0,5 и 2 м от выхода потока из элементов выравнивания и диспергирования. Анализ эпюр скоростей, представленных на рис.31, свидетельствует о более эффективном выравнивании потока учком труб, расширяющихся по длине. Были проанализированы спектры турбулентных пульсаций и спектры неравномерности просвета потока, замеренные при работе данных элементов.

Исследование спектров турбулентности в напускном сечении показывает, что уровень турбулентности, генерируемый пучками труб постоянного сечения и расширяющимися трубами, в области высоких частот значительно выше уровня турбулентности, генерируемой перфорированными плитами, это способствует лучшему диспергированию бумажной массы. Анализ спектров неравномерности просвета потока, измеренных в напускном сечении напорного ящика, свидетельствует о более высоком уровне мелкомасштабной неравномерности, создаваемой перфорированными плитами. Однако крупномасштабные флуктуации в длинноволновой области спектров находятся на одном уровне для всех исследованных элементов, что является следствием работы массоподводящей системы.

Таким образом, высокая выравнивающая способность блока расширяющих труб в сочетании со способностью генерировать высококачественную мелкомасштабную турбулентность позволяет рекомендовать его в качестве базового элемента выравнивания потокораспределительной системы.

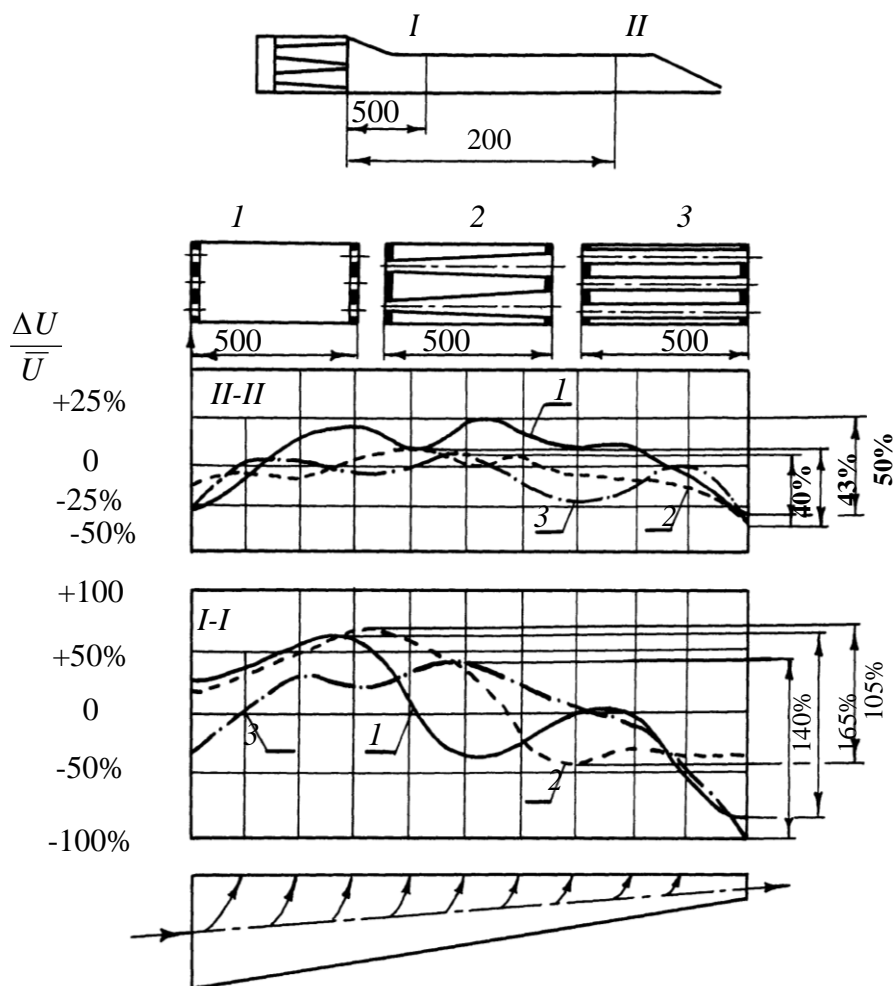


Рис.31. Влияние элементов выравнивания на равномерность распределения скоростей по ширине напорного ящика: 1 – перфорированные плиты; 2 – блок конических диффузоров; 3 – блок труб постоянного сечения. Суспензия сульфатной белой целлюлозы $C = 0,6 \%$, 26 °ШР

Сравнительный анализ экспериментальных данных по эффективности работы элементов выравнивания и результатов исследований пульсационных характеристик промышленных напорных ящиков, в том числе Холмского и Чеховского ЦБЗ, Архангельского ЦБК, показал, что влияние системы потокораспределения начинает сказываться при увеличении скорости напуска. Стабильность работы повышается на высоких скоростях.

Анализ показал, что по сравнению с промышленными напорными ящиками пульсации низкой частоты, оказывающие

влияние на распределение массы 1 м^2 полотна бумаги в продольном направлении, в проточной части экспериментального напорного ящика на порядок меньше. Этого удалось достигнуть путем установки бака постоянного уровня и двух демпфирующих вставок в трубопровод между массным насосом и потокораспределителем напорного ящика.

В области средних и высоких частот пульсации, оказывающие влияние на диспергирование суспензии и в конечном итоге на просвет бумаги, зависят от конструкции напорного ящика. Проведенные исследования показали, что при низких скоростях потока бумажной массы в диапазоне $2-2,5 \text{ м/с}$ конструкция потокораспределителя фактически не влияет на пульсационные характеристики в напускном сечении напорного ящика. При скорости $4-4,5 \text{ м/с}$ видно значительное различие в спектрах. Многотрубные потокораспределители дают уровень турбулентных пульсаций в этом диапазоне, значительно превышающий уровень пульсаций после перфорированной плиты как у экспериментальной установки, так и у промышленных напорных ящиков, т.е. с увеличением скорости этот эффект увеличивается. Следовательно, на скоростных машинах более целесообразно применение многотрубных потокораспределителей.

3.3. Влияние проточных частей напорных ящиков на структуру потока и качество вырабатываемой бумаги

Анализ конструкций и условий эксплуатации существующих напорных ящиков показывает, что большинство напорных ящиков (исключение составляют напорные ящики турбулентного типа) рассчитано на скорости в рабочих каналах $0,15-0,45 \text{ м/с}$. Возвращаясь к данным Мэсона и исследованиям СПбГТУРП, необходимо отметить, что принимаемый диапазон скоростей относится к переходному режиму движения бумажной массы, т.е. характеризуется наличием полуразрушенной волокнистой структуры - флокул. Зачастую срезающие напряжения, возникающие при прохождении бумажной массы через напускное

устройство, оказываются недостаточными для полного разрушения имеющихся в потоке флюкул и последние попадают в зону отлива, снижая качество получаемой продукции.

По виду проточных частей напорные ящики классифицируются на большеобъемные и напорные ящики с узким каналом. На экспериментальной бумагоделательной машине проведено исследование влияния проточной части напорного ящика на формирование структуры потока, подаваемого в зону отлива и формования. Изучаемые конструкции подключались к одним и тем же системам массоподвода и потокораспределения. Скорость потока в напускных сечениях поддерживалась постоянной и была равна 8 м/с. Измеренные в напускных сечениях напорных ящиков распределения концентрации в потоках бумажной массы показаны на рис.32.

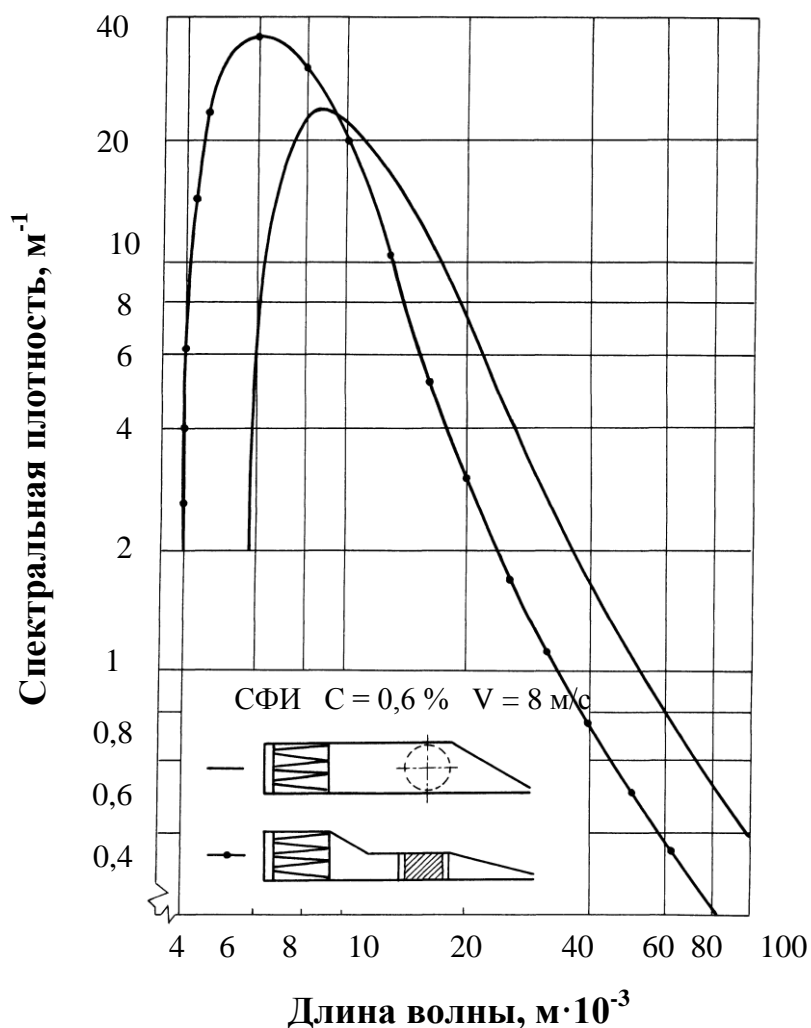


Рис. 32. Формирование структуры потока напорными ящиками различных типов

Анализ данных, представленных на рис.32 показывает, что поток из большеобъемного напорного ящика, в конструкции которого в качестве диспергирующего элемента использован перфорированный валик, характеризуется более неоднородным распределением волокон. Длины волны преобладающего размера структурных неоднородностей в потоках, формируемых напорными ящиками с перфорированным валиком и с узким каналом, составляют соответственно $9 \cdot 10^{-3}$ и $6 \cdot 10^{-3}$ м.

Высокая эффективность напорных ящиков с узким каналом объясняется тем, что высокие скорости движения бумажной массы в проточной части напорного ящика обеспечивают возникновение значительных градиентов сдвига в потоке, способствующих разрушению волокнистой структуры. В результате однородность структуры потока повышается и спектр пульсаций концентрации смещается в высокочастотную зону.

Необходимым условием получения высококачественной продукции является обеспечение оптимальных режимов движения бумажной массы в потокораспределителе и напорном ящике; отклонения в работе последних приводят к снижению качественных показателей бумаги и, прежде всего, к ухудшению стабильности распределения массы 1 м^2 по ширине бумажного полотна.

С целью устранения дефектов потокораспределения, формирования равноскоростного потока с равномерным распределением волокон по ширине сеточного стола в рабочие каналы напорных ящиков вводятся различные диспергирующие элементы: от подпорных линеек, стержневых выравнивателей и прутковых барабанов до перфорированных плит и валиков, пучков труб и блоков пластин, образующих узкие каналы различной конфигурации.

При оценке эффективности применения того или иного элемента напорных ящиков следует руководствоваться двумя критериями: гидродинамическими характеристиками, которые можно определить как факторы, влияющие на характер потока бумажной массы, и характеристиками, относящимися к технологии производства бумаги, определяющихся присутствием в суспензии волокон, которые не должны флокулировать и ориентироваться по

потоку. Эти две группы факторов зачастую накладывают на систему несовместимые требования.

С целью изучения влияния конструктивных элементов напорных ящиков на ориентацию потока было проведено комплексное обследование напорного ящика бумагоделательной машины № 3 Архангельского ЦБК. Проведены замеры скоростей потока в коллекторе многотрубного конического потокораспределителя, в диффузорном выравнивателе потока и в напускной щели напорного ящика.

Анализ полученных результатов, приведенных на рис.33, свидетельствует, что неравномерность распределения скоростей, наблюдаемая в потокораспределителе, сохраняется вплоть до напускного сечения. На входе в потокораспределитель имеется сильно развитая вихревая зона, возникающая в связи с несоосным подводом массы из массопровода в потокораспределитель. Эта зона оказывает существенное влияние на равномерность скоростей по длине потокораспределителя и ширине рабочих каналов напорного ящика.

Колебания скорости по длине потокораспределителя составляют приблизительно 100 %, по ширине каналов диффузора и напуска – соответственно около 30 и 3 %. В диффузоре и полости напорного ящика происходит частичное выравнивание структуры полотна, однако неравномерность профиля скоростей наблюдается и в напускном сечении.

Наиболее существенным фактором, влияющим на стабильность распределения массы 1 м^2 бумажного полотна в поперечном направлении, является напускное сечение, имеющее устройство для регулирования массы 1 м^2 . Приведенные на рис.33 результаты свидетельствуют о трудности выравнивания неравномерности массы 1 м^2 вырабатываемой бумаги, вызванной нестабильным распределением скоростей в рабочих каналах потокораспределителя и напорного ящика.

Сравнение профилей скорости потока бумажной массы по ширине рабочих каналов потокораспределителя и напорного ящика с характерным профилем массы 1 м^2 по ширине бумажного полотна указывает на наличие тесной взаимосвязи между скоростными потоками в напорном ящике и колебаниями массы 1 м^2 .

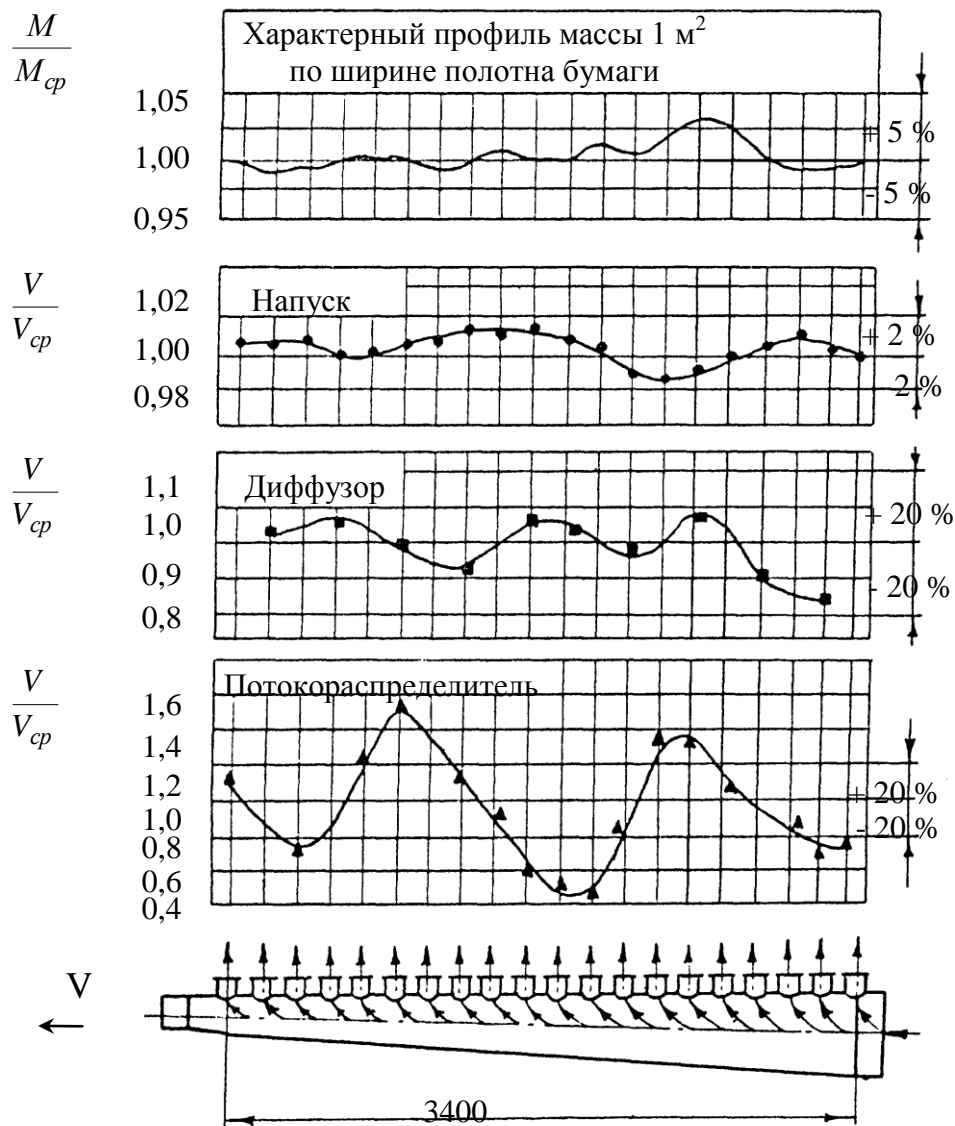


Рис.33. Зависимость распределения массы 1 м^2 по ширине полотна бумаги от структуры потока на трассе потокораспределитель – напорный ящик

В напускном сечении наблюдается относительно равномерное распределение скоростей, однако неравномерные скоростные потоки в потокораспределителе и в полости напорного ящика вызывают перераспределение концентрации по ширине напорного ящика, являющееся причиной нестабильности распределения массы 1 м^2 по ширине бумажного полотна.

Таким образом, необходимым условием получения высококачественной продукции является обеспечение

оптимальных режимов движения бумажной массы в потокораспределителе и напорном ящике; отклонения в работе последних приводят к ухудшению качественных показателей бумаги и, прежде всего, к нарушению стабильности распределения массы 1 м^2 по ширине бумажного полотна. Исследование влияния работы диспергирующих элементов на формирование внутренней структуры потока бумажной массы является весьма актуальной задачей в процессе создания новых и модернизации существующих массонапускных устройств. Обеспечение оптимальных условий работы диспергирующих элементов – одно из основных условий выработки высококачественной бумаги.

Внутренняя структура потока бумажной массы, степень его диспергированности определяются гидродинамическими условиями течения: напряжениями сдвига и турбулентными напряжениями в потоке. Поэтому при теоретической оценке условий диспергирования потока волокнистой суспензии необходимо учитывать влияние гидродинамических параметров потока, подаваемого в зону отлива и формования бумажного полотна.

Турбулентные напряжения, определяющие внутреннюю структуру потока, обусловлены энергетическим состоянием потока. Для получения качественного бумажного полотна необходимо обеспечить такие условия течения бумажной массы, чтобы запас энергии потока позволял сохранять состояние диспергированности волокон в нем, вплоть до напускного сечения. Оценка влияния гидродинамических параметров на формирование внутренней структуры потока волокнистой суспензии в зоне напуска проводилась путем сопоставления расчетных напряжений в потоке с напряжениями, необходимыми для разрушения флокул, взятыми из реологических кривых. Качественную оценку процесса диспергирования волокнистой суспензии проводили по методике, изложенной в главе 1.

Структура турбулентного потока со сдвигом при течении в каналах с разной степенью неоднородности турбулентности различна. Сказывается влияние работы диспергирующих элементов, создающих различную степень неоднородности помех. Ввиду этого изменяется распределение энергии по частотному диапазону, изменяется конфигурация спектров турбулентности.

С ростом интенсивности турбулентности и уменьшением величины крупных включений одновременно перераспределяется энергия турбулентности в область высоких частот, что приводит к росту диффузии жидких частиц из моля жидкости и соответственно к диффузии концентрации в окружающие области. Как указывалось ранее, данный процесс ведет к более равномерному распределению концентрации в потоке. При этом интенсивность неравномерности просвета, характеризующая неоднородность потока с точки зрения неравномерности распределения концентрации в нем, уменьшается.

Из сказанного следует, что с увеличением интенсивности турбулентности, геометрические характеристики потока (макро- и микромасштаб) уменьшаются пропорционально лишь для однородного изотропного турбулентного потока, для неоднородного потока, как это имеет место при течении бумажной массы в напорном ящике, зависимость носит более сложный характер, однако общая тенденция сохраняется.

Данные энергетического состояния турбулентного потока и его неоднородности позволяют оценить влияние диспергирующих элементов напорных ящиков на формирование внутренней структуры бумажной массы, а, следовательно, и на качество получаемой бумаги.

Исследование влияния диспергирующих элементов напорных ящиков на формирование внутренней структуры потока бумажной массы проводилось на гидродинамическом стенде, конструктивная схема и описание которого представлены в главе 1.

В качестве базового выравнивающего элемента принята конструкция потокораспределителя с пучком расширяющихся по длине труб с живым сечением 5,8 % на входе и 18,5 % на выходе – типа «Converflo». Длина трубной решетки 0,5 м. Из практики эксплуатации подобных систем известно, что такая конструкция создает более высокий уровень турбулентности в высокочастотной области спектра по сравнению с существующими конструкциями. Контрольные эксперименты показали правильность выбора данного элемента в качестве базового.

Для проведения сравнительной оценки влияния работы диспергирующих элементов на структуру потока, подаваемого в зону напуска, конструкцией экспериментального напорного ящика предусматривалась возможность исследования широкого ряда

элементов (перфорированных плит и валиков, различных насадок и диспергирующих секций) при регулировании скорости напуска и скорости потока на трассе напорного ящика. При исследовании влияния работы перфорированных валиков на организацию потоков использовался регулируемый по скорости и направлению вращения привод. Подвижность конструкции напорного ящика позволяла изменять высоту проточной части, угол схождения конфузора и форму напускной губы. Для гашения низкочастотных пульсаций, возникающих при работе массных насосов, на напорных трубопроводах были установлены демпфирующие вставки из гофрированных резиновых шлангов. Расход поступающих потоков регулировался задвижками, установленными на напорной линии и линиях рециркуляции. Этим обеспечивалась необходимая скорость потока в исследуемых сечениях.

Для оценки влияния работы диспергирующих элементов на организацию потоков необходимо знать распределение осредненных скоростей по трассе исследуемых каналов и турбулентные характеристики потока в соответствующих сечениях. Эти параметры позволяют в первом приближении оценить степень диспергированности суспензии и напряжения в потоке в сравнении с данными реологических характеристик. Для измерения осредненных скоростей в потоках волокнистой суспензии использовались различного рода зонды и скоростные насадки, работающие с начальным противодавлением.

При экспериментальном исследовании турбулентных составляющих в потоках волокнистых суспензий проводилось непосредственное измерение продольной составляющей пульсаций скорости u' . Полная энергия турбулентности рассчитывалась с использованием теоретических предпосылок, учитывающих зависимость между продольной и поперечной составляющими скорости.

Для качественной оценки степени диспергированности потока, поступающего в зону отлива и формования бумажного полотна, замерялась неравномерность просвета струи волокнистой суспензии, подаваемой из напорного ящика, использовалась методика, основанная на измерении неравномерности просвета струи суспензии, вытекающей из напорного ящика. Это позволило устранить недостатки, присущие косвенным методам оценки

работы напорных ящиков по качественным параметрам готовой продукции, на достоверность которых оказывает влияние работа сеточной, прессовой и сушильной частей, каландрирования, проклейки, крашения и т. д. Полученные результаты измерений свидетельствовали об эффективности работы напорного ящика.

Метод оценки формирования внутренней структуры основан на сопоставлении параметров турбулентности и относительной неравномерности просвета потока бумажной массы в зоне напуска. В промышленных условиях для выявления закономерностей, вызванных погрешностями в работе массонапускных систем в целом и диспергирующих элементов в частности, использовался метод оценки, основанный на анализе распределения массы 1 м^2 бумажного полотна в машинном и поперечном направлениях.

Для анализа отбиралось 20 образцов бумаги, взятых с одного съема по ширине бумажного полотна через один оборот тамбурного вала. Затем нарезались образцы по ширине полотна размером $100 \times 100 \times 10^{-6} \text{ м}^2$. Проводилось взвешивание образцов бумаги на аналитических весах. Для уточнения закономерностей пробы отбирались в различных сменах работы обслуживающего персонала с месячными перерывами в течение года.

Скорости напуска в процессе экспериментальных исследований варьировались в диапазоне от 4 до 8 м/с.

Оценка влияния внутренней структуры потока на качественные показатели бумажного полотна в промышленных условиях проводилась на Чеховском и Холмском целлюлозно-бумажных заводах ПО «Сахалинбумпром».

На бумагоделательной машине № 1 Чеховского ЦБЗ вырабатывалась этикеточная бумага массой 70 г/м^2 . Средняя скорость машины 210 м/мин. Напорный ящик типа ЯЗ-01 снабжен потокораспределителем прямоугольного сечения с перфорированной плитой и односторонним подводом массы, линией рециркуляции, двумя перфорированными валиками в горизонтальной проточной части и плоским напускным конфузуром с углом схождения 32° . Концентрация массы в напорном ящике 0,65 %, композиция – 100 % сульфитной беленой целлюлозы из хвойных пород древесины марки Б-1, степень помола 26 °ШР. Определялось влияние работы выходного перфорированного вала на равномерность распределения массы

1 м² с использованием методики оценки равномерности распределения.

На Холмском ЦБЗ оценивалась равномерность распределения массы 1 м² по ширине бумажного полотна. Устанавливалось влияние системы потокораспределения на формирование внутренней структуры потока бумажной массы.

В качестве диспергирующих элементов напорных ящиков среднескоростных бумагоделательных машин исследовались перфорированные и прутковые валики, трубные насадки в конфузоре, элементы напускной щели. Исследовалось влияние диспергирующих элементов на формирование внутренней структуры потока волокнистой суспензии, подаваемого на сеточный стол. Использовалась суспензия сульфитной небеленой целлюлозы концентрацией 0,6 %. Спектральные характеристики турбулентности и неравномерности просвета потока массы измерялись при постоянной конфигурации прочной части напорного ящика. Высота горизонтального плоского канала – $220 \cdot 10^{-3}$ м, длина – 1,8 м, высота щели – $10 \cdot 10^{-3}$ м, длина плоского напускного конфузора – 0,7 м. Средняя скорость потока в плоском канале составляла 0,18 м/с при скорости напуска 4 м/с. Диаметр исследованных валиков равнялся $206 \cdot 10^{-3}$ м, диаметр отверстий перфорации – $19 \cdot 10^{-3}$ м, толщина рубашки вала – $3 \cdot 10^{-3}$ м, что соответствует параметрам промышленных образцов.

Исследовались следующие виды и варианты компоновок основных диспергирующих элементов напорных ящиков среднескоростных бумагоделательных машин:

– два перфорированных валика с площадями живого сечения 30 и 50 %, отстоящих друг от друга на расстоянии 0,8 м. Ось вращения выходного перфорированного валика с площадью живого сечения 50 % расположена на расстоянии 0,7 м от напускной щели, т. е. на линии перехода в напускной конфузор;

– работа вышеназванных валов в сочетании с трубной насадкой, установленной в напускном конфузоре. Живое сечение насадки на входе равнялось 25 %, на выходе – 37,5 %, диаметр трубок – $21 \cdot 10^{-3}$ м, длина насадки – 0,25 м;

– работа одного перфорированного валика с площадью живого сечения 50 %, расположенного на входе в напускной конфузор на расстоянии 0,7 м оси вала от напускной щели;

перфорированного валика, установленного совместно с трубной насадкой в конфузоре; трубной насадки без перфорированного валика;

– работа пруткового валика установленного на расстоянии 0,7 м от напускного сечения. Диаметр двадцати прутков ($12 \cdot 10^{-3}$) м, диаметр образующей вала ($212 \cdot 10^{-3}$) м;

– изменение конфигурации напускной щели при использовании разравнивающей линейки – вертикальной острой ступеньки на выходе из напускного конфузора. При постоянной высоте щели $10 \cdot 10^{-3}$ м изменялась высота ступеньки в пределах от 0 до $10 \cdot 10^{-3}$ м.

При средней скорости потока в проточной части напорного ящика 0,18 м/с скорость поверхности рубашки валика варьировалась в диапазоне 0–0,53 м/с.

Из анализа проведенных исследований следует:

1. При средней скорости напуска, равной 4 м/с на спектральные характеристики турбулентности потока и неравномерности просвета потока, скорость и направление вращения перфорированных валиков не оказывают существенного влияния, вызывая добавочные потери энергии.

2. На спектральные характеристики влияет в целом количество диспергирующих элементов, их вид и местоположение на трассе напорного ящика.

Анализ спектральных характеристик пульсаций давления при работе одного и двух перфорированных валиков с площадью живого сечения 30 и 50 % в сравнении со спектром пульсаций для данной конфигурации проточной части без валиков показал, что спектры почти идентичны по всему диапазону длин волн. Об этом свидетельствуют и спектры неравномерности просвета потока. В коротковолновой области спектры пульсаций давления выше у конструкции с одним и двумя валиками по сравнению с напорным ящиком без валиков. Из этого следует, что валики оказывают диспергирующее воздействие на внутреннюю структуру потока в напорном ящике. Из совпадения спектров пульсаций в случае работы двух или одного перфорированного валика в коротковолновой области следует, что диспергирующее воздействие определяется работой выходного перфорированного валика. Направление и скорость вращения перфорированных

валиков в диапазоне 0–0,53 м/с не оказывают влияния на спектральные пульсационные характеристики струи в зоне напуска. Очевидно, влияние скорости и направление вращения валика сказываются на пульсациях давления в низкочастотной области, лежащей ниже диапазона измеренных частот. Нижний предел измерений составлял 12 Гц, а частота вращения валика лежала значительно ниже 0–2,1 Гц.

Спектры неравномерности просвета имеют уровень микронеоднородностей ниже в конструкции без валиков. Диспергирующее воздействие перфорированных валиков сказалось в увеличении уровня микронеоднородностей потока, подъеме коротковолновой части спектральной кривой неравномерности просвета и в снижении уровня крупномасштабных неоднородностей в длинноволновой области спектра. Положительный эффект работы перфорированных валиков сказывается на улучшении микроструктуры потока, увеличении степени его диспергированности. Несколько снижен и уровень неравномерности просвета в средневолновой области, что улучшает среднеинтегральную неравномерность просвета – качественную оценку структуры потока. На диспергированность потока в зоне напуска определяющее влияние оказывает работа выходного перфорированного валика.

Измерения спектральных характеристик для конструкций напорного ящика с трубной насадкой в конфузоре, работающей совместно с двумя перфорированными валиками, а также с насадкой с одним валиком и без него показывают преобладающее диспергирующее воздействие трубной насадки в конфузоре. Прежде всего, изменилась форма спектра – по сравнению с перфорированными валиками – увеличился уровень низкочастотных пульсаций. Влияние первого по ходу потока валика на эффективность работы всего устройства незначительно. О величине размеров вихрей, генерируемых трубной секцией, свидетельствуют длинноволновые ветви спектров пульсации давления, значительно превышающие уровень пульсаций, генерируемых перфорированными валиками. Отмечается также снижение неравномерности просвета, по сравнению со свободным каналом, хотя общее диспергирующее воздействие возрастает.

Результаты измерений показали, что при совместной работе двух перфорированных валиков с трубной насадкой в конфузоре скорость и направление вращения валиков не оказывали влияния на характеристики турбулентности и просвета – спектры практически совпадали по всему диапазону. Но в случае остановки валиков увеличивался уровень низкочастотных пульсаций, что сказалось на ухудшении просвета в длинноволновой области спектра, уменьшился и уровень микронеоднородностей.

Ухудшение внутренней структуры потока объясняется нарушениями в организации потока на входе в трубную насадку при обтекании валика. Увеличились придонные скорости, в центральной части увеличилась зона низких скоростей, что нарушило внутреннюю структуру потока на входе в трубную решетку и снизило в целом эффективность ее применения по сравнению с вращающимся валиком. При работе одной трубной насадки в конфузоре уровень длинноволновых пульсаций и микронеоднородностей просвета ниже, чем для совместной работы насадки с валиком. Лучшие показатели однородности просвета получены при вращении перфорированного валика, причем скорость поверхности валика равнялась средней скорости потока в проточной части – 0,2 м/с.

Спектральные характеристики при работе пруткового валика, установленного на входе в напускной конфузор, дают спектр турбулентных пульсаций практически постоянный при всех режимах вращения валика.

На рис.34 представлены спектральные характеристики, измеренные при исследовании влияния конфигурации верхней кромки напускной щели на выходном конце конфузора. Изменялась высота вертикальной подпорной планки в диапазоне от $0,5 \cdot 10^{-3}$ до $15 \cdot 10^{-3}$ м при постоянной высоте напускной щели $10 \cdot 10^{-3}$ м. Лучшая диспергированность потока была достигнута при равенстве высоты вертикальной планки высоте напускной щели $10 \cdot 10^{-3}$ м. Измерение неравномерности просвета было затруднено поджатием струи на выходе из щели и подсосом воздуха в мерный канал.

В табл.1 приведены характеристики турбулентности и неравномерности просвета потока бумажной массы, характеризующие внутреннюю структуру потока при работе

перфорированных валиков, трубной насадки в конфузоре, пруткового валика и изменении формы напускной щели, вычисленные по результатам измерений при постоянной скорости напуска 4,0 м/с.

Анализ представленных результатов свидетельствует о незначительном увеличении турбулентности при применении в конструкции напорного ящика одного перфорированного валика с площадью живого сечения 50 % и двух перфорированных валиков с площадью живого сечения 30 и 50 % соответственно. Наряду с этим незначительно возрастает и значение диспергирующих напряжений в потоке массы при работе перфорированных валиков.

Оказывает влияние на структуру напускаемого потока работа пруткового валика. Значение интенсивности турбулентности возрастает на 0,37 %, просвет потока при этом несколько ухудшается. Прутковый валик вносит более крупные возмущения в поток по сравнению с перфорированным валиком, что искажает распределение скоростей и ухудшает внутреннюю структуру потока. Существенно увеличивается значение интенсивности турбулентности и напряжений в потоке по сравнению с каналом без диспергирующих элементов в случае изменения конфигурации напускной щели. Подпорная линейка, установленная на выходе из напускного конфузора, оказывает значительное влияние на изменение структуры турбулентности с $8,59 \cdot 10^{-3}$ до $1,01 \cdot 10^{-3}$ м, что свидетельствует о мелкодисперсности структуры напускаемого потока.

Приведенные результаты позволяют сделать следующий вывод: при среднескоростных режимах работы напорных ящиков бумагоделательных машин в диапазоне до 250 м/мин влияние работы диспергирующих элементов на внутреннюю структуру напускаемого потока незначительно и сказывается в основном в изменении значений низкочастотных пульсаций давления потока в напускной щели. На внутреннюю структуру потока в зоне напуска определяющее воздействие оказывают элементы, установленные в непосредственной близости от напускного сечения: перфорированный валик, установленный на входе в напускной конфузор; трубная насадка в конфузоре; прутковый валик, расположенный на входе в конфузор; форма губы напускной щели.

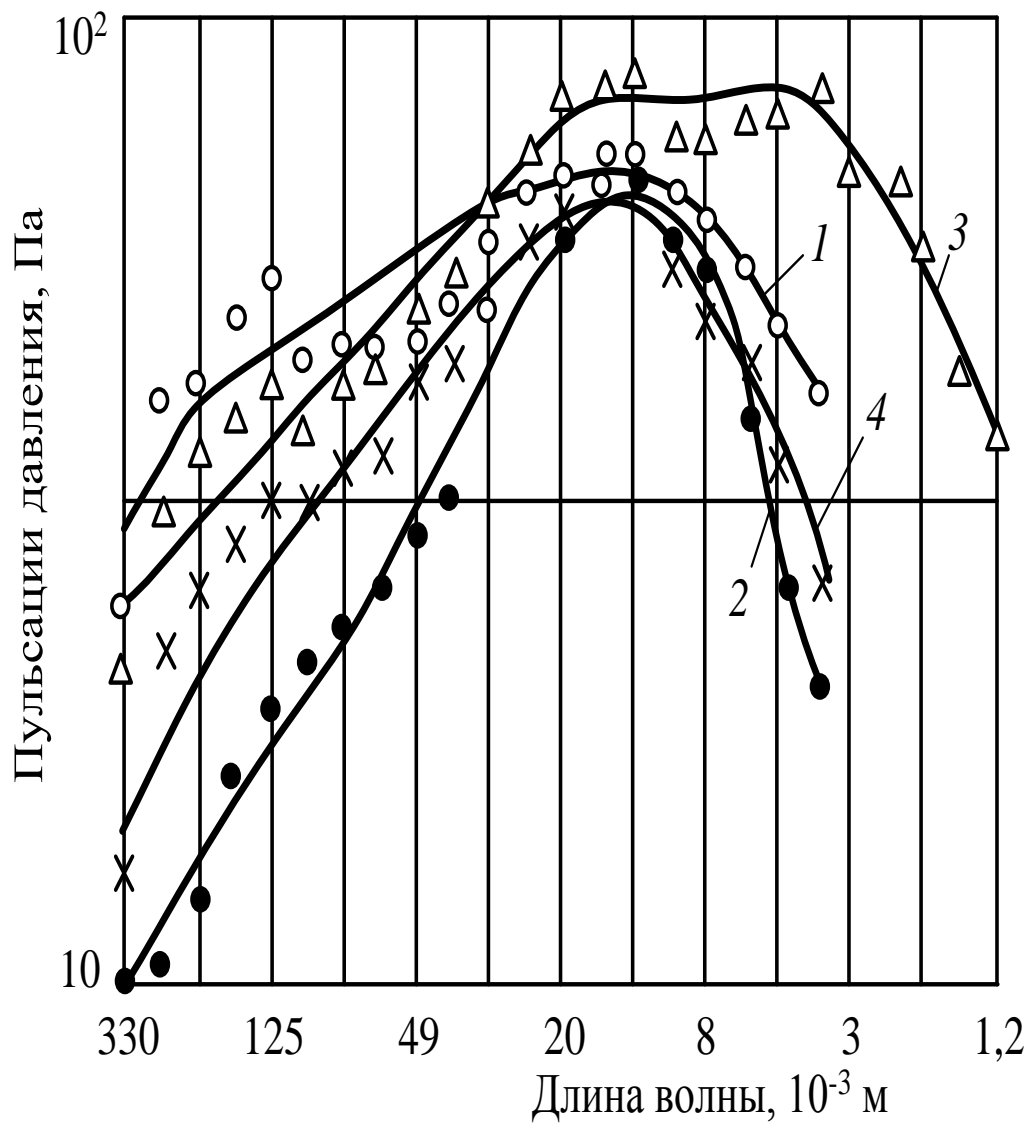


Рис.34. Влияние формы напускной щели на пульсационные характеристики струи бумажной массы в напускном сечении напорного ящика: 1 – величина ступеньки $x = 0$; 2 – $x = 5 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – $x = 10 \cdot 10^{-3}$ м; 4 – $x = 15 \cdot 10^{-3}$ м

Таблица 1

Характеристики турбулентности и неравномерности просвета потока в поточном канале при работе различных диспергирующих элементов. Скорость напуска 4,0 м/с.

№ позиции*	Характеристика турбулентности					Неравномерность просвета			
	средняя энергия, м ² /с ²	пульсационная скорость, м/с	интенсивность турбулентности, %	микромасштаб, ×10 ³ , м	напряжения, Н/м ²	среднеинтегральный показатель просвета ×10 ⁶ , В	интенсивность пульсаций	относительная неравномерность просвета, ×100, %	микромасштаб неравномерности просвета, ×10 ⁴ , м
1	0,01225	0,1565	3,91	8,59	110,3	177 604	690	100	0,41
2	0,01371	0,1656	4,14	7,85	123,4	116 149	582	84,3	0,42
3	0,01268	0,1593	3,98	8,22	114,2	186 937	611	88,6	0,39
4	0,02928	0,2420	6,05	8,94	183,5	187 713	613	88,8	0,40
5	0,02728	0,2336	5,84	8,87	171,4	260 580	622	90,1	0,42
6	0,02213	0,2104	5,26	8,51	164,5	221 649	666	96,5	0,41
7	0,01466	0,1712	4,28	7,09	145,2	210 950	650	94,2	0,45
8	0,04969	0,3153	7,51	4,11	447,2	–	–	–	–
9	0,06322	0,3556	8,47	4,30	569,0	–	–	–	–
10	0,26281	0,7250	17,26	1,01	2365	–	–	–	–

* 1 – напорный ящик без дополнительных диспергирующих элементов; 2 – два перфорированных валика с живым сечением 30 и 50 %; 3 – один перфорированный валик 50%; 4 – два валика с трубной насадкой в конфузоре; 5 – один валик 50 % с трубной насадкой; 6 – трубная насадка в конфузоре; 7 – прутковый валик; 8, 9, 10 – ступенька на верхней губе напускной щели: (5; 10; 15)·10⁻³ м

Выбор вида и условий эксплуатации диспергирующих элементов, определяющих формирование структуры потока, при высокоскоростных режимах работы в связи с кратковременностью пребывания бумажной массы в проточной части напорного ящика приобретает еще большую актуальность.

На рис.35 приведены схемы проточной части напорного ящика турбулентного типа и виды исследованных диспергирующих элементов. Высота канала проточной части составляла 0,07 м и

была принята по конструктивным соображениям с целью обеспечения режимов течения бумажной массы, сопоставимых с условиями течения в промышленных напорных ящиках турбулентного типа.

В исследованиях применялась суспензия сульфитной целлюлозы марки Ж-4 со степенью помола 27 °ШР концентрацией 0,6 %. Оценка потока массы, подаваемого из напускной щели, осуществлялась измерением турбулентных характеристик потока и характеристик неравномерности его просвета в проходящем луче света площадью $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Скорость потока варьировалась в диапазоне 4–8 м/с при высоте напускной щели $10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и длине выходного конфузора 0,5 м.

Исследованы следующие виды и варианты компоновок диспергирующих элементов:

– секция ламинирования напорного ящика турбулентного типа, установленная с возможностью перемещения на 0,5–1 м от напускной щели. Длина секции 0,5 м, толщина наклонных параллельных пластин, отстоящих друг от друга на расстоянии $20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, составляла $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Живое сечение пластины с прорезями составляет 40 %, угол отклонения пластин от вертикали 20^0 ;

– трубная секция «Bunch-Tube», с живым сечением 23,7 %, диаметром труб $23 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, длиной 0,5 м. Секция устанавливалась с возможностью перемещения на 0,5; 0,75 и 1 м от напускной щели;

– устройство типа «Converflo» и его составные элементы: плита с двумя рядами отверстий диаметром $25,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, живым сечением 25 %, отстоящая от щели на расстоянии 0,7 м с одним крылом длиной 0,55 м; плита с тремя рядами отверстий диаметрами $15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, живым сечением 25 %, расположенная на расстоянии 0,7 м от щели с двумя крыльями длиной 0,55 м; плита с двумя рядами отверстий диаметром $25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; плита с тремя рядами отверстий диаметром $15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; крылья из сетки длиной 0,55 и 0,3 м. Крылья крепились верхним по потоку концом к стержню, отстоящему от щели на расстоянии 0,7 и 0,45 м соответственно, длина камеры смешения 0,15 м соответствовала длине камеры смешения напорного ящика типа «Converflo»;

– стержень круглого сечения диаметром $10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, перемещавшийся по длине напускного конфузора на расстоянии 0,15–0,45 м от напускной щели.

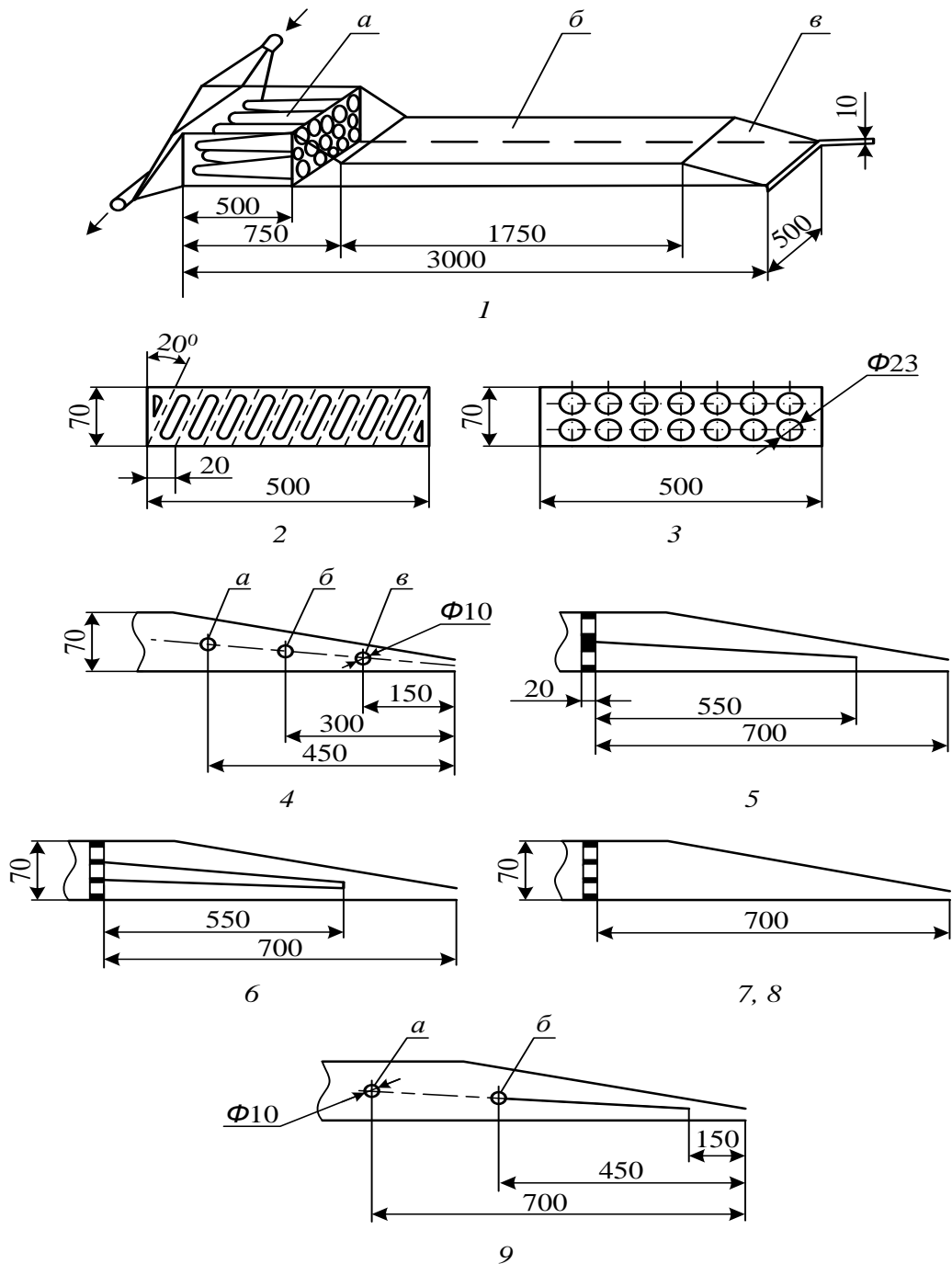


Рис.35. Конструкция напорного ящика и виды исследованных диспергирующих элементов: 1 – напорный ящик; *a* – потокораспределитель типа «Converflo»; *б* – плоский канал; *в* – конфузор; 2 – секция «Turboflo» ($\varphi_{ex} = 40\%$, $\varphi_{вых} = 96\%$, $L = 0,5$ м); 3 – секция трубная «Bunch-Tube» ($\varphi = 23,8\%$, $L = 0,5$ м); 4 – стержень в конфузоре; 5 – устройство типа «Converflo» (одно крыло, $\varphi_{нл} = 25\%$, $\varnothing_{отв} = 25,4 \cdot 10^{-3}$ м); 6 – устройство типа «Converflo» (два крыла, $\varphi_{нл} = 25\%$, $\varnothing_{отв} = 15 \cdot 10^{-3}$ м); 7, 8 – перфоплиты без крыльев; 9 – крыло на стержне (*a* – $L_{кр} = 0,55$ м, *б* – $L_{кр} = 0,3$ м)

Для сравнения эффективности воздействия диспергирующих элементов были измерены спектральные характеристики и рассчитаны параметры турбулентности и неравномерности просвета напорного ящика, работавшего без дополнительных элементов, что позволило более четко оценить влияние диспергирующих элементов.

На рис.36–рис.39 приведены спектры турбулентных пульсаций и спектры неравномерности просвета потока бумажной массы при скоростях напуска в диапазоне от 5 до 8 м/с для проточной части напорного ящика без дополнительных диспергирующих элементов и напорного ящика с диспергирующей секцией типа «Converflo», установленной с возможностью перемещения по трассе напорного ящика.

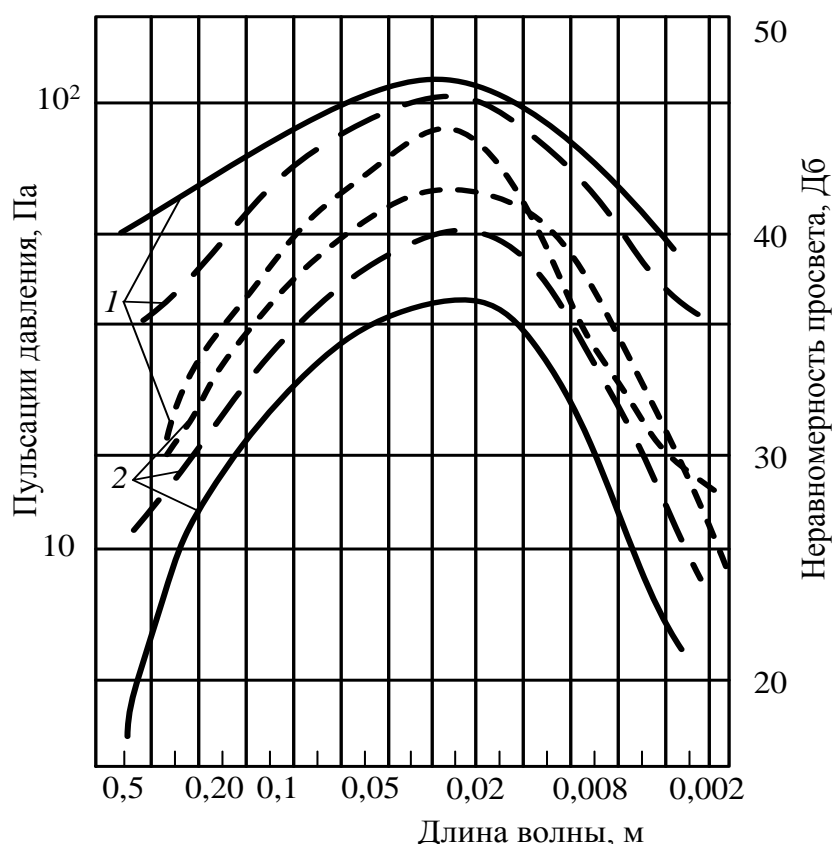


Рис.36. Спектры пульсаций скорости (1) и неравномерности просвета (2) в напускной щели экспериментального напорного ящика без диспергирующих элементов:

--- $u = 5$ м/с; - - - $u = 7$ м/с; — $u = 8$ м/с

Анализ приведенных графиков показывает, что с увеличением скорости напуска в общем случае возрастает энергия турбулентности напускаемого потока. Из оценки показателей просвета следует, что с увеличением скорости внутренняя структура потока также улучшается – показатели неравномерности просвета уменьшаются, т. е. улучшается однородность потока, увеличивается степень диспергированности. Все это свидетельствует, что установка диспергирующих элементов в каналах напорного ящика приводит к турбулизации потока волокнистой суспензии и улучшению просвета вырабатываемого полотна бумаги.

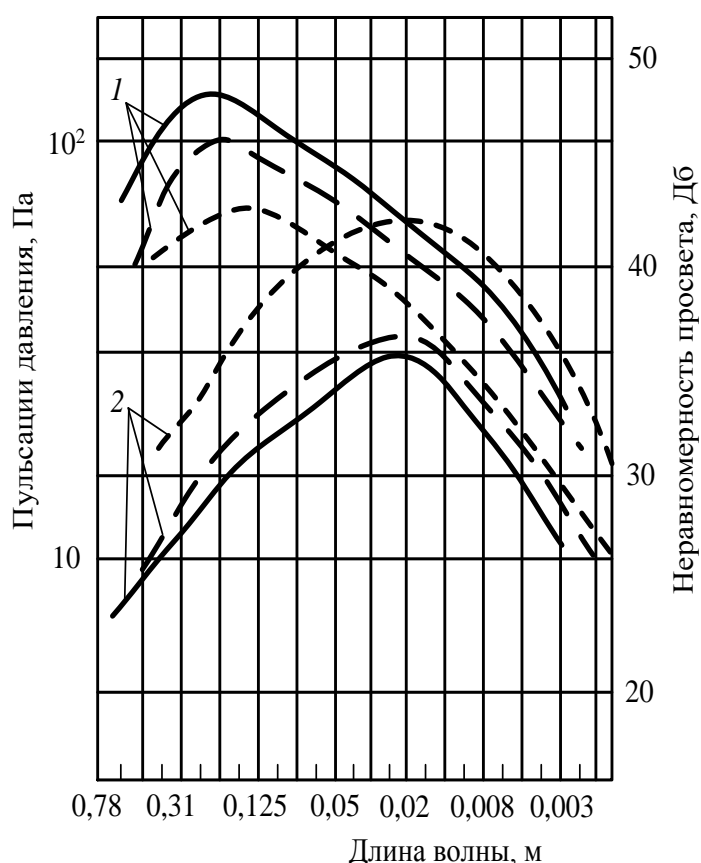


Рис.37. Спектры пульсаций скорости (1) и неравномерности просвета (2) потока бумажной массы в напускной щели в случае работы диспергирующей секции типа «Turboflo» на расстоянии 1 м до напускной щели:

$u = 5 \text{ м/с};$
 $u = 7 \text{ м/с};$
 $u = 8 \text{ м/с}$

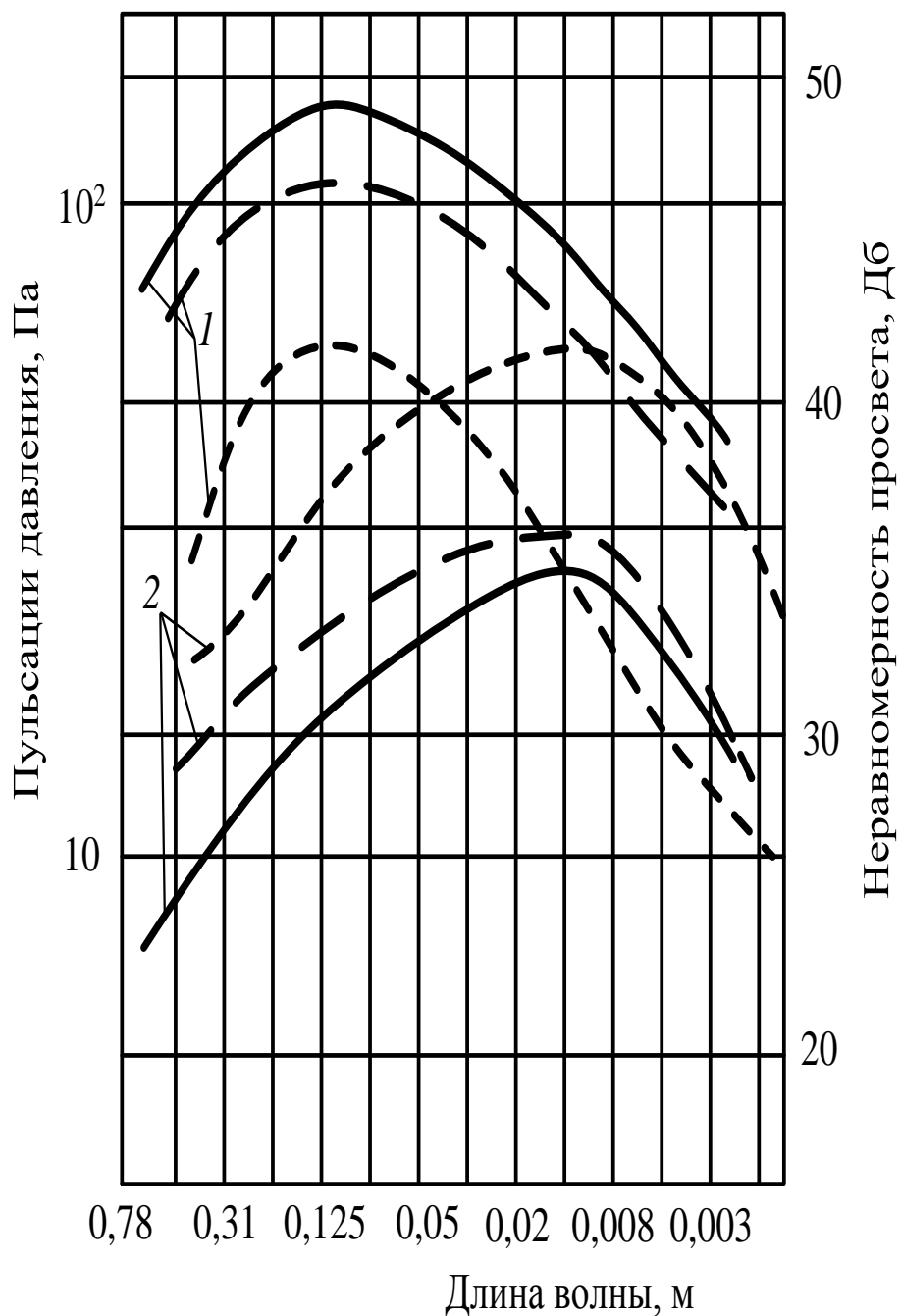


Рис.38. Спектры пульсаций скорости (1) и неравномерности просвета (2) потока бумажной массы в напускной щели в случае установки секции типа «Turboflo» на расстоянии 0,75 м от напускной щели:

--- $u = 5$ м/с; - - - $u = 7$ м/с; — $u = 8$ м/с

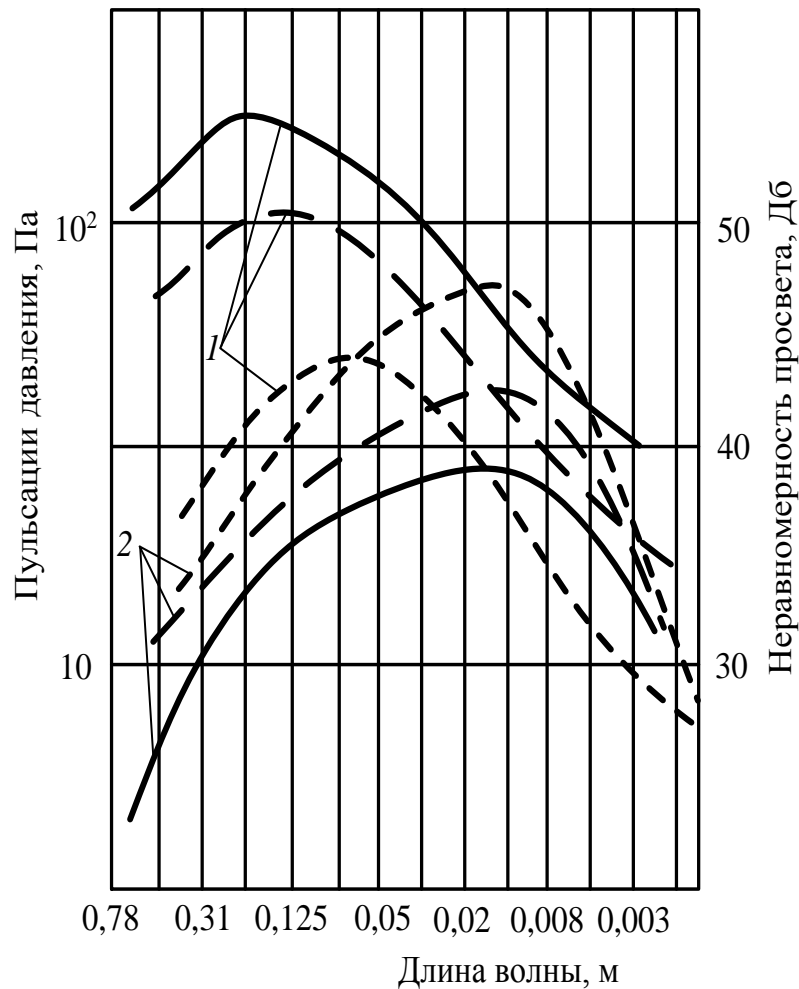


Рис.39. Спектры пульсаций скорости (1) и неравномерности просвета (2) потока бумажной массы в напускной щели в случае работы секции типа «Turboflo» на расстоянии 0,5 м:

- - - $u = 5$ м/с; - - - $u = 7$ м/с; — $u = 8$ м/с

Причем резкое увеличение интенсивности турбулентности не приводит к столь же резкому улучшению неравномерности просвета, но в любом случае эти величины взаимосвязаны.

На рис.40 и рис.41 представлены графики зависимостей характеристик турбулентности потока и неравномерности просвета при работе различных диспергирующих элементов с изменением скорости течения потока.

Энергия турбулентности растет с увеличением скорости потока, причем ее значение определяется в первую очередь

местоположением, а затем конструкцией используемого диспергирующего элемента.

Из анализа интегральной неравномерности просвета видно, что на нее преобладающее влияние оказывает местоположение и конструкция диспергирующего элемента и лишь затем скорость потока, т. е. эти параметры следует рассматривать совместно. Об этом также свидетельствуют увеличение интенсивности турбулентности и снижение относительной неравномерности просвета потока с увеличением скорости напуска (рис.42 и рис.43). Например, с ростом скорости напуска и приближением диспергирующего элемента к напускной щели интенсивность турбулентности максимально возрастает до 33 % (стержень в конфузоре, установленный на расстоянии 0,3 м от напускной щели), в то же время относительная неравномерность просвета снижается максимально на 16.6 % (устройство типа «Converflo»).

Судя по значениям интенсивности турбулентности (рис.42) наиболее эффективными диспергаторами являются следующие элементы: стержни, устройство типа «Converflo», перфорированные плиты, расположенные непосредственно на входе в напускной конфузор, трубная секция и секция «Turboflo» в ближнем положении от щели. На уменьшение неравномерности просвета существенное влияние оказывают конструкции, расположенные вблизи напускной щели. Однако в данном случае на однородность потока в большей степени влияет структура турбулентности, определяемая видом диспергирующего элемента и его местоположением в проточной части, а не общая интенсивность турбулентности. Об этом свидетельствует сопоставление интенсивности турбулентности и относительной неравномерности просвета потока при работе стержней в конфузоре и устройства типа «Converflo». При скорости напуска 8 м/с интенсивность турбулентности, генерируемая стержнем, расположенным на расстоянии 0,15 м от щели, составляла 43%, устройство же типа «Converflo» генерирует уровень пульсаций до 37,3 %. В то же время относительная неравномерность просвета потока составляла 54,0 и 56,6 % соответственно. Последнее свидетельствует о том, что преобладающее суммарное воздействие на увеличение интенсивности турбулентности и снижение относительной неравномерности просвета оказывает устройство типа «Converflo»,

причем эффект усиливается с увеличением числа крыльев, т. е. с ростом площади трения.

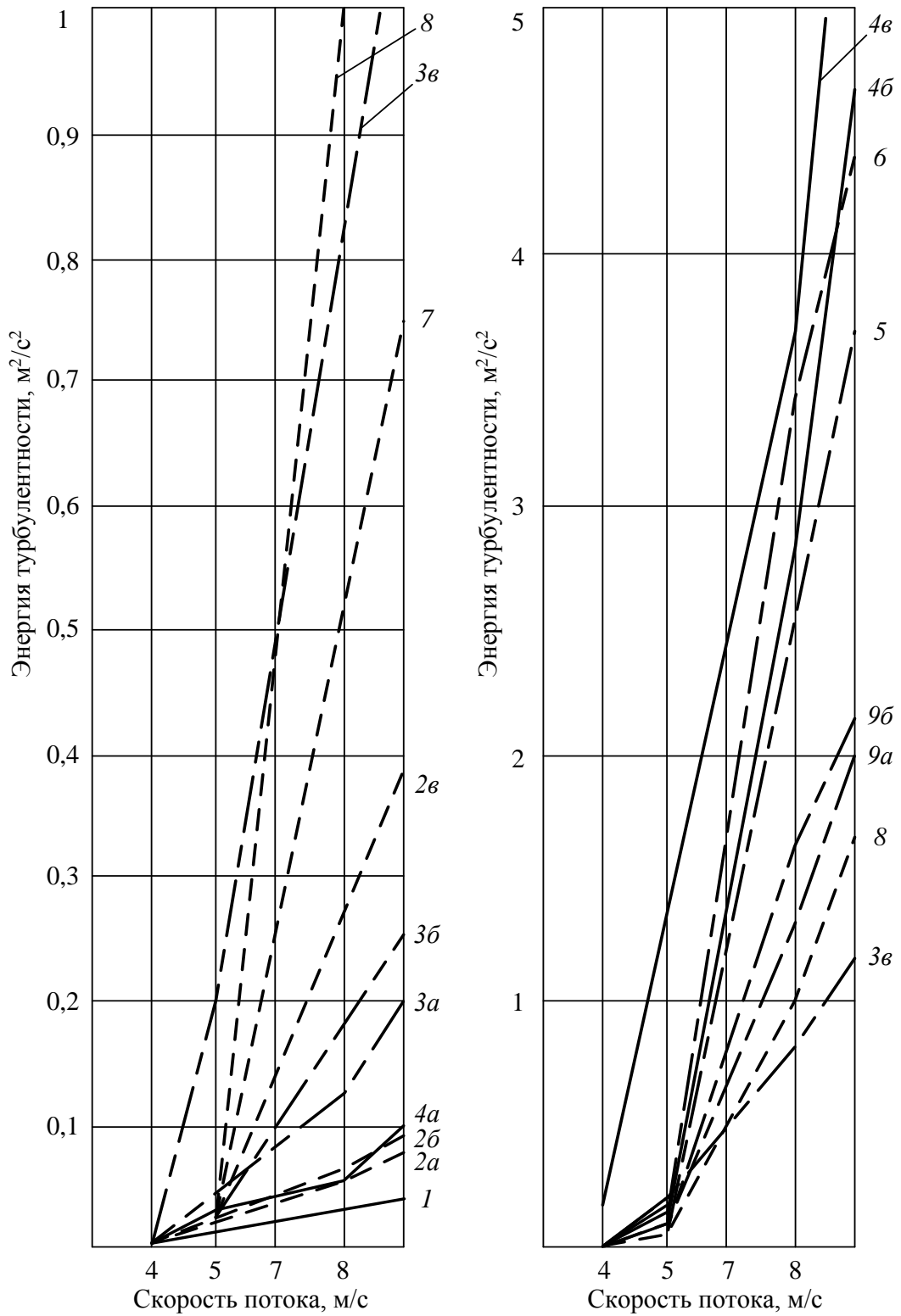


Рис.40. Влияние диспергирующих элементов на энергию турбулентности потока бумажной массы

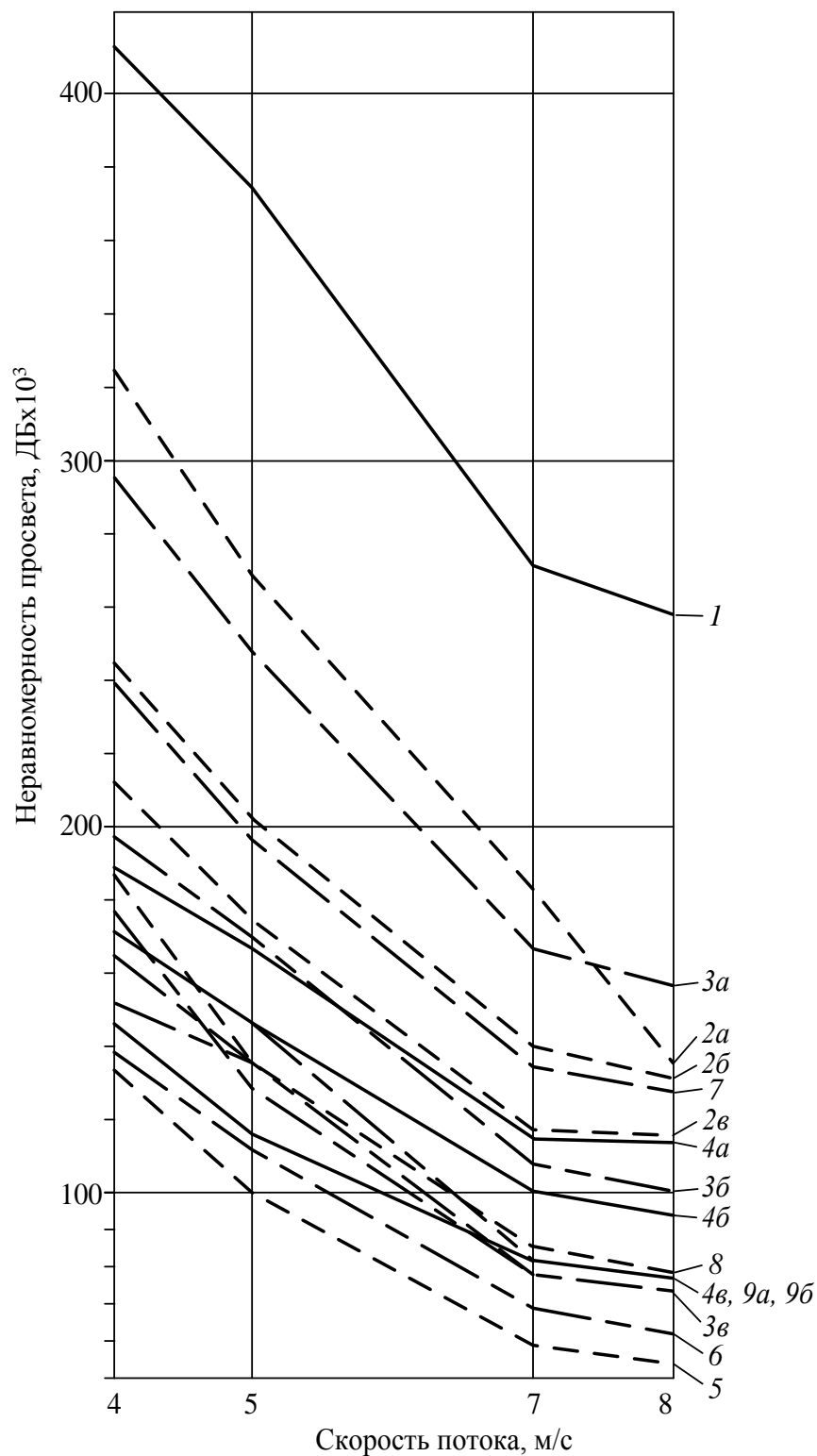


Рис.41. Влияние диспергирующих элементов на неравномерность просвета потока бумажной массы

Исследование изменения относительной неравномерности

просвета от скорости напуска показывает, что на структуру потока максимальное влияние оказывают элементы, длительно воздействующие на поток бумажной массы: устройства типа «Converflo», «Turboflo», трубные секции. В одном положении при изменении скорости потока от 4 до 8 м/с данные элементы снижают неравномерность просвета на 6–12 %, а устройства, кратковременно воздействующие на поток – плиты, стержени – на 1,2–4,0 %. Несомненно, что в данном случае сказываются релаксационные свойства бумажной массы.

Анализ показывает, что эффективность воздействия диспергирующих элементов на поток в напускном сечении зависит от их местоположения. С приближением элементов к щели увеличивается турбулентность и в общем случае улучшается внутренняя структура потока бумажной массы. Например, для устройства типа «Turboflo» оптимальным является положение на расстоянии 0,75 м от напускной щели. При установке секции на расстоянии 0,5 м при увеличении скорости начинает ухудшаться структура потока (рис.43).

На рис.44 приведены значения осредненных напряжений в потоке при работе различных диспергаторов. С ростом пульсационной скорости, генерируемой различными элементами, возрастают значения диспергирующих напряжений в потоке.

Турбулентные напряжения в потоке в напускном сечении значительно превышают критические напряжения сдвига для суспензий, взятые из реологических кривых.

Анализ влияния стационарных диспергирующих элементов на внутреннюю структуру потока бумажной массы позволяет сделать вывод, что наиболее эффективным диспергатором является устройство типа «Converflo». Причем, поэлементный анализ устройства свидетельствует, что определенную роль в нем играют число крыльев и диаметры отверстий перфорации плит при всех прочих равных условиях. С уменьшением диаметра отверстий плит и увеличением длины крыла увеличивается и воздействие на внутреннюю структуру потока.

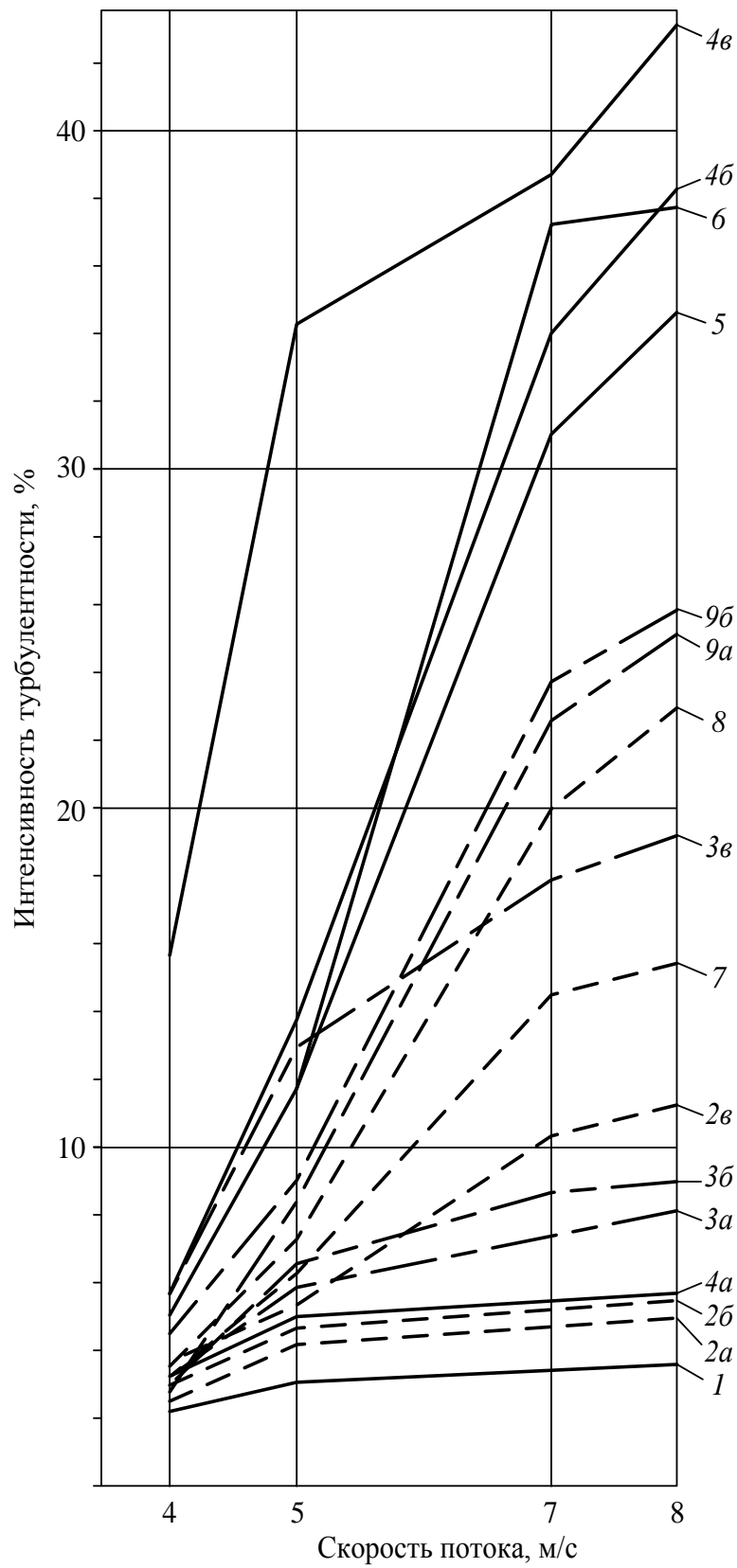


Рис.42. Влияние диспергирующих элементов на интенсивность турбулентности потока бумажной массы

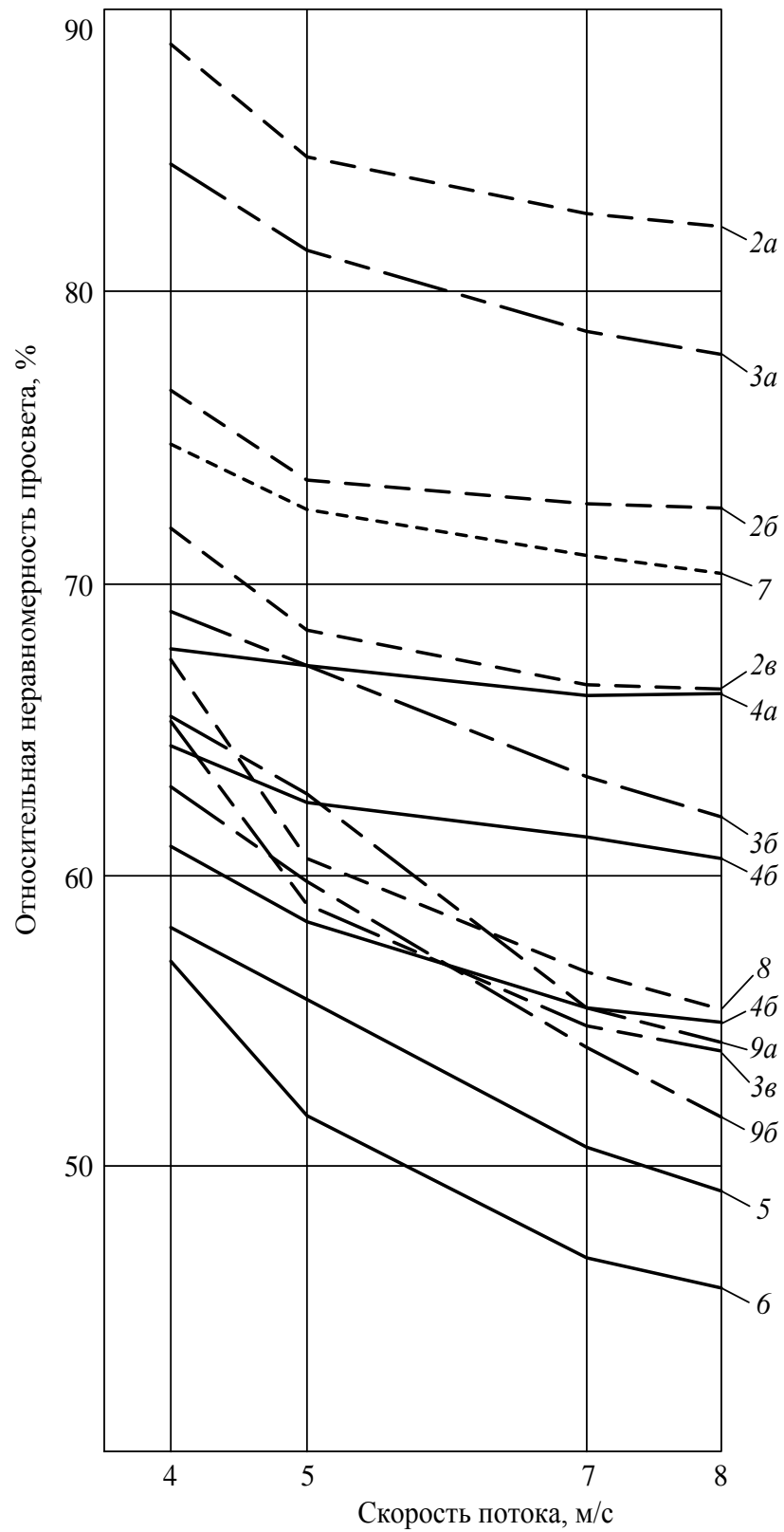


Рис.43. Влияние диспергирующих элементов на относительную неравномерность просвета

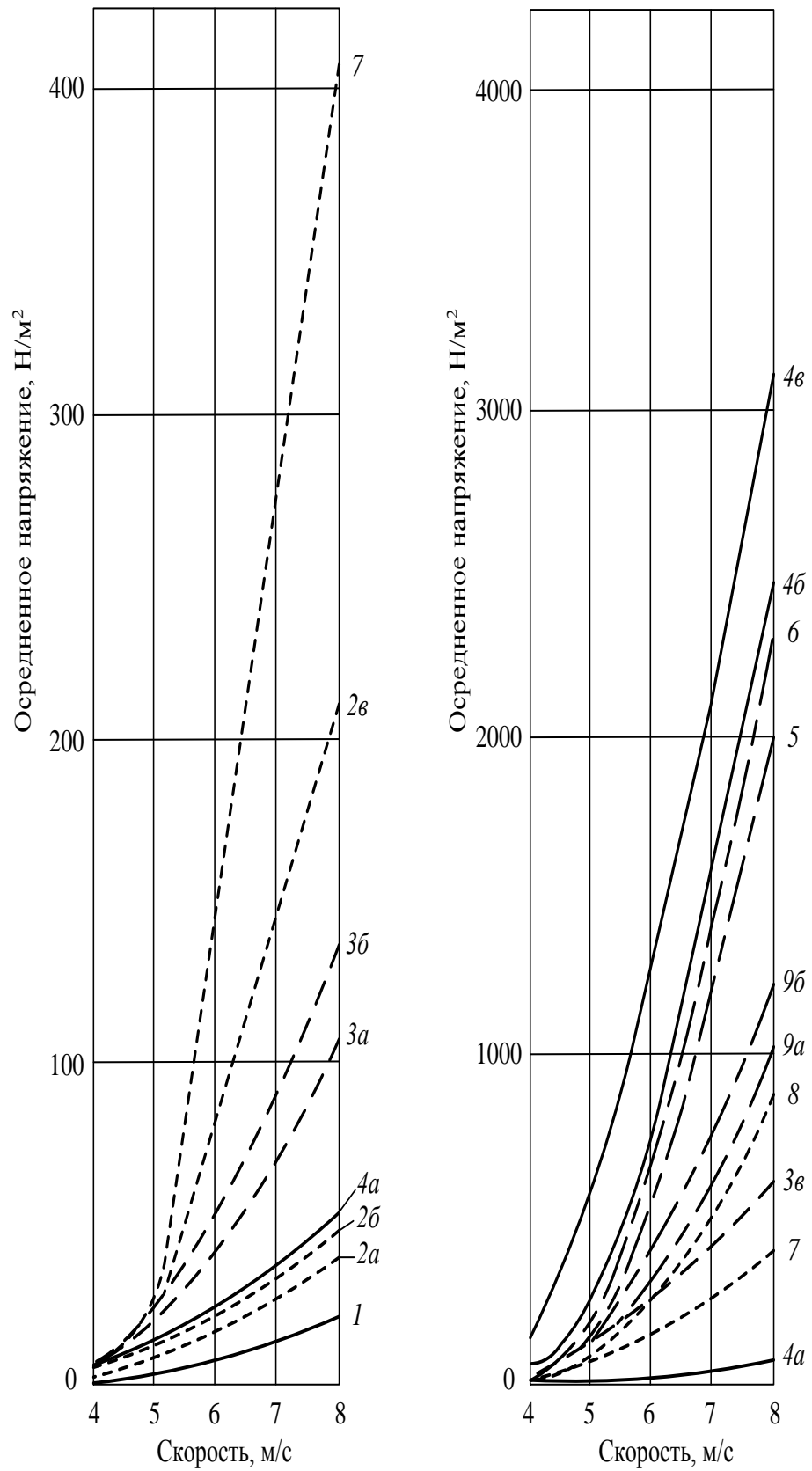


Рис.44. Осредненные напряжения на оси потока при использовании различных диспергирующих элементов в напорном ящике

3.4. Современные тенденции в совершенствовании конструкций массонапускных систем

Анализ конструкций массонапускных систем показывает, что главным направлением в проектировании напускных систем является стремление уменьшить масштаб турбулентности потока, подаваемого в зону отлива и формования бумаги. Сопоставление спектров турбулентности, генерируемых напорными ящиками различных типов, показывает, что у напорных ящиков турбулентного типа наблюдается сдвиг спектра турбулентности в область высоких частот по сравнению с напорными ящиками, в конструкции которых в качестве диспергаторов используются перфорированные валы. Экспериментальными исследованиями установлено, что высокая интенсивность турбулентности в коротковолновой области способствует диспергации бумажной массы и обеспечивает выработку бумаги с равномерным распределением массы 1 м^2 . Влияние конструкции проточной части напорных ящиков на совершенствование процесса формирования становится все более очевидным с повышением скорости и производительности бумагоделательных машин.

Проектируемые конструкции должны обладать следующими преимуществами по сравнению с существующими напорными ящиками:

- обеспечивать регулирование гидродинамических характеристик потока, подаваемого в зону отлива и формования бумаги, что особенно важно в момент отработки оптимальных режимов отлива и при переходе на новые виды продукции;
- требовать меньших капитальных затрат и эксплуатационных расходов;
- иметь меньшие габариты.

Проточные части проектируемых напорных ящиков должны рассчитываться с учетом реологических особенностей используемых бумажных масс на всей трассе «потокораспределитель - напорный ящик».

Одним из основных направлений оптимизации конструкций напорных ящиков является дальнейшее совершенствование систем потокораспределения. Эффективная система начального

распределения массы позволяет поддерживать минимальный объем массы в полости напорного ящика, устраняя необходимость применения дополнительных элементов выравнивания и диспергирования потока.

Наиболее перспективными из существующих напорных ящиков, как показывает обзор литературных данных, являются напорные ящики типа «Conwerflo» (рис.45) и находящие все более широкое применение напорные ящики с «узким» каналом, так называемые высокотурбулентные напорные ящики.

Напорные ящики типа «Conwerflo» успешно эксплуатируются при скоростях бумагоделательных машин до 1000 м/мин в диапазоне концентраций от 0,55 до 1,14 % (оптимальная концентрация, по данным фирмы-изготовителя, 0,7 - 0,8 %).

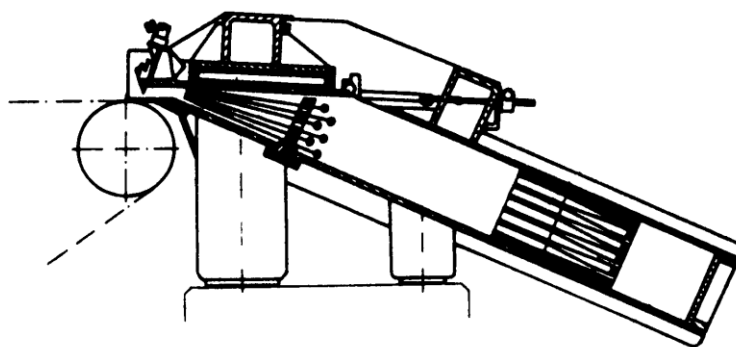


Рис.45. Схема напорного ящика «Conwerflo»

Анализ проточной части напорного ящика позволяет объяснить успех применения данной конструкции. Напорный ящик снабжен одной из наиболее современных распределительных систем - сужающимся потокораспределителем прямоугольного сечения с перфорированной плитой. Кроме того, напорный ящик дополнительно оснащен блоком труб, служащих как бы продолжением перфорированной плиты: большой перепад давления в блоке труб позволяет в значительной степени уменьшить влияние гидродинамических помех и неточности геометрии коллектора. Резкое расширение потока при выходе из блока труб в полость напорного ящика способствует дезориентации диспергированных волокон в потоке волокнистой суспензии. Окончательное формирование потока происходит в сужающихся каналах, образованных блоком пластин, установленных в

напускном устройстве – интенсивный сдвиг слоев потока бумажной массы в узких каналах предотвращает развитие крупномасштабной турбулентности и способствует диспергированию потока. В непосредственной близости от напускной щели потоки сливаются в единый поток, чем устраняется возможная ориентация волокон и однородный дефлокулированный поток подается в зону отлива и формирования бумажного полотна.

Отработка оптимальных конструкций распределительных систем позволяет перейти к конструкциям турбулентных напорных ящиков, проточная часть которых представлена совокупностью узких каналов. Наиболее широко используемые конструкции напорных ящиков этого типа представлены на рис.46.

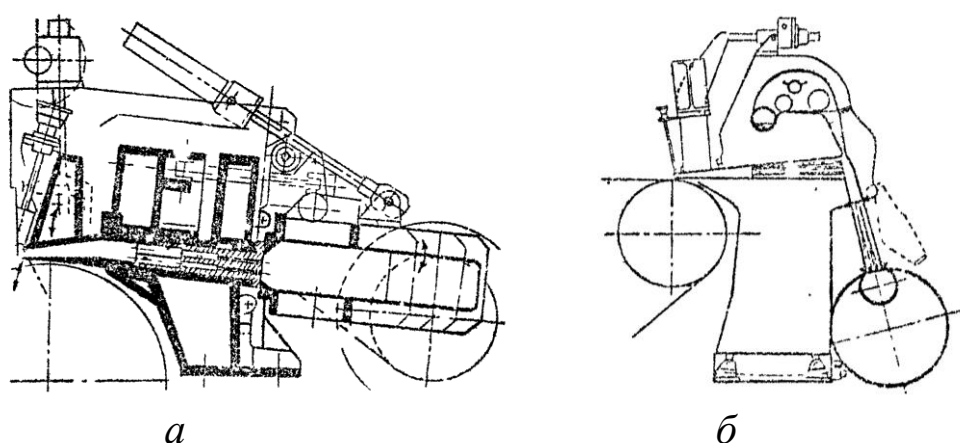


Рис.46. Схема высокотурбулентных напорных ящиков:

а – напорный ящик фирмы «Эшер-Висс»; *б* – напорный ящик фирмы «Фойт»

Выбор диапазона рабочих скоростей в проточной части таких напорных ящиков представляет сложную задачу, поскольку формирование потока осуществляется без введения дополнительных элементов выравнивания и диспергирования потока, таких как, например, перфорированные валики. На рис.47 представлена проточная часть напорного ящика типа «Turboflo» и примерная диаграмма скоростей по длине проточной части.

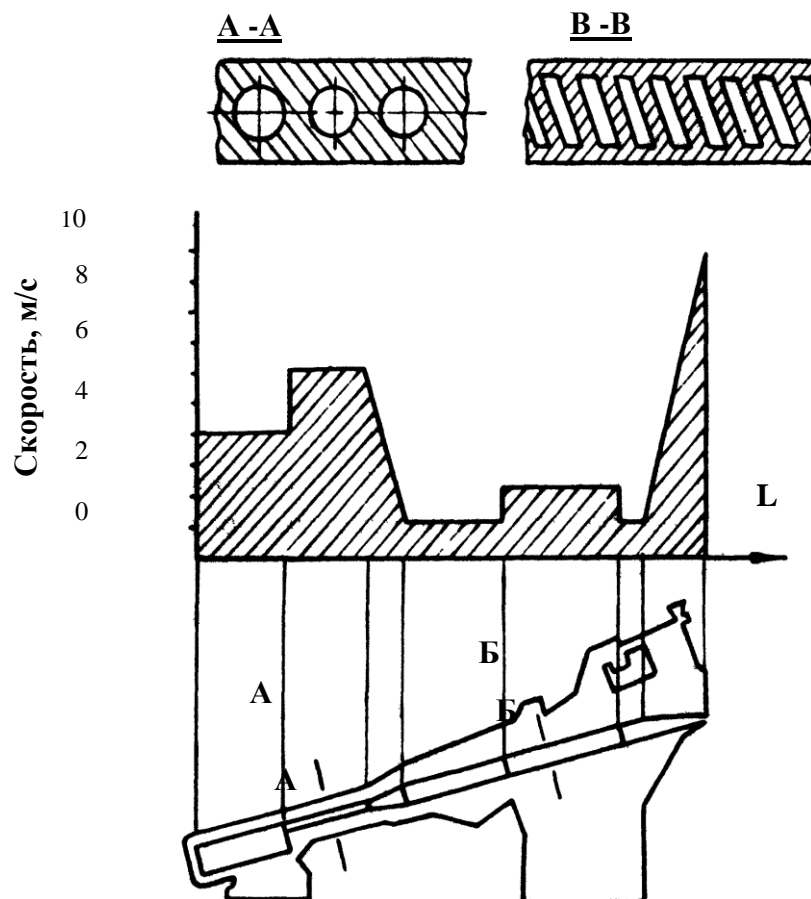


Рис.47. Распределение скоростей в напорном ящике типа «Turboflo»

Формирования потока в данном случае осуществляется введением специальных секций, имеющих различное живое сечение, и тем самым позволяющих регулировать скорость, а следовательно, и степень диспергирования и дезориентации волокон в потоке бумажной массы непосредственно перед напускной щелью. Эффективность применения напорных ящиков этого типа в значительной мере определяется качеством работы распределительной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии даны представления о реологических характеристиках волокнистых суспензий, приведены реологическое уравнение бумажных масс и уравнение движения бумажных масс в общем виде, рассмотрены реологические характеристики бумажной массы повышенной концентрации.

Показано влияние пульсационных характеристик в потоке волокнистой суспензии в рабочих каналах массонапускных систем бумагоделательных машин на качество формования бумажного полотна. Проанализированы причины возникновения пульсаций и предложены способы их устранения. Рассмотрены частотные, энергетические и силовые спектры пульсаций в потоках и показана их взаимосвязь с внутренней структурой бумажной массы, подаваемой в зону формования и равномерностью распределения массы 1 м^2 вырабатываемой бумаги. Приведены конструкции наиболее эффективных диспергаторов массонапускных систем.

С позиций необходимости учета реологических характеристик используемых бумажных масс, показаны современные тенденции в совершенствовании конструкций массонапускных систем бумагоделательных машин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Терентьев О.А. Гидродинамика волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве.– М.: Лесная промышленность, 1980. - 248 с.
2. Форгес О.А., Робертсон А.А., Мэзон С.Г. Гидродинамическое поведение волокон, применяемых при выработке бумаги (Основные представления о волокнах, применяемых в бумажном производстве). - М.: Гослесбумиздат, 1962. – 520 с.
3. Глобус Ф.Е. Исследование факторов, влияющих на хлопьеобразование при изготовлении бумаги: дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1973. 146 с.
4. Sara H. The characterization and Measurement of Paper Formation with Standart Deviation and Power spectrum. Doctoral Dissertation. Otaniemi, Finland. The Helsinky Uneversity of Technology, 1978. 162 p.
5. Александров А.В. Основы теории структурообразования бумажной массы в процессе напуска на сеточную часть БДМ: дис. ... д-ра техн. наук. – Л., 1988. 398 с.
6. Терентьев О.А. Массоподача и равномерность бумажного полотна. – М.: Лесная пропромышленность, 1986. – 264 с.
7. Шульман Г.З., Александров А.В., Андреев А.Г. Расчет напускных устройств бумаго- картоноделательных машин: учеб. пособие / СПбГТУРП. – СПб., 2010. – 48 с.
8. Александров А.В., Куров В.С., Александрова Т.Н. Гидродинамика начальной зоны формования бумагоделательной машины: учебное пособие / Тихоокеанский гос. университет. – Хабаровск, 2007. – 130 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ.....	3
1.	СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ В ПОТОКАХ БУМАЖНЫХ МАСС. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОЦЕНКИ.....	4
1.1.	Влияние реологических свойств бумажных масс на формирование внутренней структуры потока.....	5
1.2.	Гидродинамический стенд для моделирования движения бумажной массы в массонапускных и формующих устройствах бумагоделательных машин.....	16
1.3.	Измерение осредненных и пульсационных скоростей в потоках бумажных масс.....	20
1.4.	Измерение локальных концентраций волокон в потоках бумажных масс.....	25
1.5.	Измерение неравномерности просвета волоконистых структур.....	31
1.6.	Оценка эффективности работы напускных и формующих устройств по качественным показателям бумажного полотна.....	34
2.	РЕОЛОГИЯ БУМАЖНОЙ МАССЫ.....	42
2.1.	Основные характеристики суспензий растительных волокон и образованных ими суспензий.....	42
2.2.	Экспериментальные исследования реологических характеристик волоконистых суспензий.....	43
2.3.	Реологическое уравнение бумажных масс.....	51
2.4.	Релаксационные и упругие свойства бумажных масс.....	59
2.5.	Уравнение движения бумажных масс в общем виде.	66
2.6.	Реологические характеристики бумажной массы повышенной концентрации.....	69

3.	ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАССОНАПУСКНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОРГАНИЗАЦИЮ ПОТОКА И КАЧЕСТВО БУМАЖНОГО ПОЛОТНА.....	72
3.1.	Требования, предъявляемые к напорным ящикам. Классификация и основные конструкции напорных ящиков.....	72
3.2.	Влияние потокораспределительных и массоподводящих систем на организацию потока в напорных ящиках.....	86
3.3.	Влияние проточных частей напорных ящиков на структуру потока и качество вырабатываемой бумаги.....	96
3.4.	Современные тенденции в совершенствовании конструкций массонапускных систем.....	125
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	129
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	130

Учебное издание

Александр Васильевич Александров

Татьяна Николаевна Александрова

**РЕОЛОГИЯ И ГИДРОДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ
ОТЛИВА И ФОРМОВАНИЯ БУМАГИ**

**Часть I. Реология и гидродинамика волокнистых
суспензий**

Учебное пособие

Редактор и корректор Т.А. Смирнова

Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2015 г., поз.62

Подп. к печати

Формат 60x84/16. Бумага тип.№1

Печать офсетная. Печ. л. 8,5

Уч.-изд.л. 8,5 Тираж 100 экз. Изд № 62

Цена «С». Заказ

Ризограф Санкт-Петербургского государственного технологического
университета растительных полимеров, 198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.