

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Н.П. Мидуков, В.С. Куров

ГИДРОДИНАМИКА ВОЛОКНИСТЫХ СУСПЕНЗИЙ

Учебное пособие

Санкт-Петербург 2020

ББК 35.779 я 7

УДК 676.026.1:532.5(075.8)

М-578

Н.П. Мидуков, В.С. Куров

Гидродинамика волокнистых суспензий: учебное пособие/ ВШТЭ
СПбГУПТД. – СПб., 2020.- 88 с. – ISBN 978-5-91646-222-7

В учебном пособии рассмотрены особенности пульсационного движения бумажной массы в массоподводящих системах бумагоделательных машин как едином комплексе разномасштабного гидравлического оборудования. Особое место занимают вопросы демпфирования пульсаций давления в системах массоподачи с целью снижения массоемкости бумажного полотна, поскольку влияют на равномерность распределения волокон в бумаге и картоне, следовательно на свойства картона и расход сырья. Равномерность распределения волокон, неравномерность формования бумаги или картона оценивается с помощью новых приёмов анализа поперечного среза. Подробно описан инновационный метод оценки неравномерного распределения волокон в области среза путём получения поперечного среза ионной резкой с дальнейшей обработкой изображения графическими и расчетными программами. Технология ионной резки бумаги или картона в работе является подготовительной стадией для сканирующей электронной микроскопии, оснащённой также программой для получения панорамных изображений поперечных срезов.

Учебное предназначено для студентов, обучающихся по направлению 15.03.00, 18.03.00, магистров, аспирантов и инженерно-технических работников предприятий целлюлозно-бумажной промышленности.

Рецензенты: Яблокова М.А., д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой инженерного проектирования Санкт-Петербургского государственного технологического университета (Технического университета);

Александров А.В., д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой машин автоматизированных систем ВШТЭ СПбГУПТД.

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

ISBN 978-5-91646-222-7

© Высшая школа технологии
и энергетики СПбГУПТД, 2020

© Мидуков Н.П., Куров В.С. 2020

Введение

Одним из важнейших направлений современного технического прогресса является всесторонняя интенсификация производственных процессов. Особое значение при этом придается повышению эффективности производства и качеству готовой продукции при экономном и рациональном использовании сырьевых, топливно-энергетических и других ресурсов.

Для целлюлозно-бумажной промышленности решение этих задач невозможно без разработки и внедрения ресурсосберегающих, экологически чистых технологий, позволяющих значительно увеличить производство готовой продукции. Одним из основных путей экономного расходования древесного сырья в целлюлозно-бумажном производстве является выработка бумаги пониженной массоёмкости с высокой степенью однородности. Снижение массы на 1 м^2 бумаги в допустимых пределах позволяет получить значительную экономию волокнистых материалов и способствует дополнительному наращиванию объёмов производства. Равномерность распределения волокон в формуемом листе и снижение массоёмкости бумаги предопределяется степенью диспергированности бумажной массы и пульсационными процессами в массоподводящих и массонапускных системах. Оценку степени диспергированности и взаимосвязь внутренних напряжений структуры со скоростями деформации можно получить на основе реологических закономерностей. Во всех гидравлических машинах происходит изменение структуры потока, сопровождающееся изменением реологических параметров: напряжений и скоростей сдвига. Источником таких напряжений является турбулентность, которая фактически является пульсационным движением жидкости. Полный спектр пульсаций давления бумажной массы в напорном ящике характеризует сразу два процесса, сопровождающих напуск: высокочастотные пульсации способствуют диспергированию потока, а низкочастотные вызывают нестабильность напуска и значительные колебания массы 1 м^2 бумажного полотна. Производство бумаги пониженной массоёмкости с высокой степенью

равномерности сдерживается проблемой устранения низкочастотных пульсаций давления в массопроводящих системах, что приводит к значительным экономическим издержкам производства.

Несмотря на очевидную технологическую и экономическую актуальность рассматриваемой проблемы, до настоящего времени не уделялось достаточного внимания научно-обоснованным методам расчёта и прогнозирования низкочастотных пульсационных процессов в массоподводящих системах бумагоделательных машин (БДМ) и способам их устранения, что связано со сложностью гидродинамических реологических процессов при массоподаче. Актуальность этих исследований связана с необходимостью равномерного распределения волокон в бумаге и картоне, которое позволяет повысить качество и сократить затраты сырья. Очевидна взаимосвязь между особенностями массоподготовки, включая пульсационные процессы, возникающие при обработке волокнистой суспензии, обладающей необычными реологическими свойствами и равномерностью распределения волокон в бумаге и картоне. В связи с этим, в работе впервые рассматривается результат воздействия пульсаций давлений на неравномерность распределения волокон в бумаге и картоне. Для этого авторы использовали современные технологические приёмы подготовки образцов к сканирующей электронной микроскопии (ионную резку образцов) для последующей графической обработки изображения поперечного среза и оценки неравномерности распределения волокон в поперечном срезе картона большой протяжённостью.

Авторами обобщён экспериментальный материал на основании разработанных физических представлений о процессе массоподдачи и теоретической модели пульсационного движения бумажной массы. Принципиально новым является материал, касающийся метода получения изображений поперечного среза и оценки неравномерного распределения волокон в волокнистом материале.

1. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БУМАЖНОЙ МАССЫ ПРИ ПОДАЧЕ НА БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНУЮ МАШИНУ

1.1. Реологические основы процесса массоподачи

Бумажная масса является многофазной средой со специфическими законами движения, коренным образом отличающимися от законов движения чистой воды.

В состоянии покоя волокнистая суспензия образует пространственную сетчатую структуру. Сцепление волокон обеспечивается за счет механических сил трения, сил химического и электростатического взаимодействия. При увеличении скорости структура начинает разрушаться, и на определённой стадии поток становится полностью диспергированным за счет сил сдвига и турбулентности.

Наиболее полно вопросы реологии и гидродинамики волокнистых суспензий представлены в работах О.А. Терентьева и его школы. Анализ внутренней структуры потока показал, что волокнистые суспензии представляют собой сложные полидисперсные системы, реологическое поведение которых описывается уравнением, справедливым для многомерного движения [1]:

$$\tau_{ij} = \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \dot{\gamma}_{ij}} + \mu \dot{\gamma}_{ij}, \quad (1.1)$$

где τ – касательное напряжение;

A_k, α_k – коэффициенты реологического уравнения;

μ – коэффициент динамической вязкости;

$\dot{\gamma}$ – скорость сдвига.

Уравнение (1.1) как девиаторная часть тензора напряженного состояния волокнистых суспензии в общем виде записано в векторной форме следующим образом:

$$\rho \frac{d\bar{u}}{dt} = \rho \bar{F} grad p + div(\sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \dot{\gamma}_{ij}} + \mu \dot{\gamma}_{ij}), \quad (1.2)$$

где ρ – плотность суспензии;

\bar{U} – вектор абсолютной скорости;

\bar{F} – вектор массовых сил;

p – среднее гидростатическое давление потока.

Существующая теоретическая модель и уравнения реологических характеристик волокнистых суспензий касаются, в основном, таких режимов течения, при которых после значительных структурных изменений устанавливается диспергированный режим течения, характеризующийся прямолинейным участком реологической характеристики. Достоинством данной физической модели является то, что она впервые позволила качественно и количественно дать характеристику волокнистых суспензий как специфического класса неньютоновских жидкостей и стала методической основой для создания других моделей на основе природных древесных волокон, в частности, низкой концентрации, характерной для массоподводящих систем бумагоделательных машин.

Особенностью бумажной массы при подаче на БДМ является ее относительно низкая концентрация (как правило 1-1,5 % и ниже). По тракту массоподачи бумажная масса движется со скоростью до 5 м/с, т.е. практически в переходном режиме. Так как массоподводящая система представляет ряд последовательно расположенных машин и аппаратов, которые соединены трубопроводными коммуникациями и имеют проточные каналы различных размеров и конфигураций, то при движении через них бумажная масса претерпевает глубокие структурные изменения. Последним звеном массоподводящей системы является напорный ящик, одним из основных требований, предъявляемых к которому, является организация напуска бумажной массы в диспергированном режиме. Диспергирование бумажной массы достигается созданием высокой степени турбулентности, генерируемой специальными устройствами различных конструкций. Турбулентное движение по своей природе является пульсационным и сопровождается изменениями давления и скорости.

Таким образом, указанные особенности технологического процесса массоподачи могут быть успешно реализованы лишь на основе использования законов внутреннего структурообразования при движении потока суспензии, т.е. на основе реологических характеристик бумажной массы.

Ранее было установлено, что волокнистые суспензии являются коагуляционными структурами, которые упрочняются во времени, сжимаются, освобождая часть воды, заключенной в сетке. Поэтому при упрочнении структуры вода фильтруется через волокнистый каркас с стенками и вдоль оси канала, образуя, тем самым, водную прослойку между волокнистым каркасом и стенкой канала. С учетом вышесказанного, уравнение напряженного состояния бумажной массы будет иметь вид:

$$\tau = \tau_{\text{трст}} + \tau_{\text{трв}} + \tau_{\text{пр}} + \tau_{\text{н}}, \quad (1.3)$$

где $\tau_{\text{трст}}$ – напряжение водяной прослойки о стенку канала;

$\tau_{\text{трв}}$ – напряжение трения водяной прослойки о волокнистую структуру;

$\tau_{\text{пр}}$ – напряжение, характеризующее прочность волокнистой структуры;

$\tau_{\text{н}}$ – напряжение ньютоновской вязкости, характерное для диспергированного режима.

Проанализируем члены уравнения (1.3), характеризующие процессы, связанные с трением. В предлагаемой реологической модели бумажной массы трение волокнистой структуры разделяется на трение водяной прослойки о стенку канала и о волокнистую структуру. Причем, так как в этих слоях содержатся различные по масштабам единицы течения, то этот факт необходимо учитывать различными временами релаксации, т.е. α_1 и α_3 . Процесс разрушения структуры происходит аналогично процессам, рассмотренным ранее [1]. Тогда имеем

$$\tau = A_1^I e^{-\alpha_1 \dot{\gamma}} + A_1^{II} e^{-\alpha_3 \dot{\gamma}} + A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}} + \tau_{\text{н}}. \quad (1.4)$$

Рассмотрим последний член уравнения (1.4), характеризующий напряжение ньютоновской вязкости.

Как указывалось выше, при движении бумажной массы через проточные каналы гидравлического оборудования массоподводящих систем создается высокий уровень турбулентности. Поэтому для описания закономерностей изменения касательных напряжений в условиях ламинарного и турбулентного движения бумажной массы предлагается использовать реологическую характеристику, содержащую после прямолинейного участка (при высоких скоростях сдвига) криволинейную часть, характеризующую турбулентное течение.

На рис.1.1 показаны реологические характеристики волокнистых суспензий концентрацией 6 и 5 г/л соответственно, полученные на ротационном вискозиметре, конструкция которого и методика проведения исследований подробно изложены в работе [1].

Рассмотрим подробнее одну из представленных экспериментальных кривых течения.

Реологическая характеристика (кривая 1) бумажной массы (содержащей 50 % древесной массы степени помола 78-79 °ШР, 25 % сульфитной бленой и 25 % сульфатной бленой целлюлоз степенью помола 18-20 °ШР), представляет собой обычную реологическую кривую, имеющую аномальную часть “а б”, соответствующую структурным преобразованиям в суспензии, прямолинейный участок “б в” диспергированного режима течения, а также криволинейный участок “в г”, определяющий начало турбулентного течения суспензии [2]. Кривая 2 является реологической характеристикой суспензии бленой сульфитной целлюлозы концентрацией 5 г/л, отличающейся от кривой 1 меньшими аномальными свойствами и наступление турбулентного режима течения при более низких скоростях сдвига.

С учетом того, что в зазоре вискозиметра существует достаточно однородное поле осредненных скоростей сдвига и напряжений, полученные касательные напряжения τ_{xy} для турбулентного потока представим формулой

$$\tau_{xy} = (\mu + \mu_T) \frac{dU}{dy}, \quad (1.5)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости (ламинарного течения);

μ_T – динамический коэффициент турбулентной вязкости;

$\frac{dU}{dy} = \dot{\gamma}$ – градиент скорости сдвига для осредненного движения.

Для характеристики, представленной на рис. 1.1 (кривая 1, участок “а в”), О.А. Терентьевым разработано реологическое уравнение (1.1). Тогда с учетом рассматриваемых физических представлений для суспензии низкой концентрации, движущейся в системе массоподачи в турбулентном режиме, реологическое уравнение будет иметь следующий вид:

$$\tau_{ij} = A_1^I e^{-\alpha_1 \dot{\gamma}^{ij}} + A_1^{II} e^{-\alpha_3 \dot{\gamma}^{ij}} + A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}^{ij}} + (\mu + \mu_T) \dot{\gamma}_{ij}, \quad (1.6)$$

где A_1^I – напряжение водяной прослойки о стенку канала;

A_1^{II} – напряжение трения водяной прослойки о волокнистую структуру;

A_2 – напряжение, характеризующее внутреннюю прочность структуры;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – временные факторы структурных изменений;

μ – коэффициент динамической вязкости в диспергированном режиме;

μ_T – динамический коэффициент турбулентной вязкости.

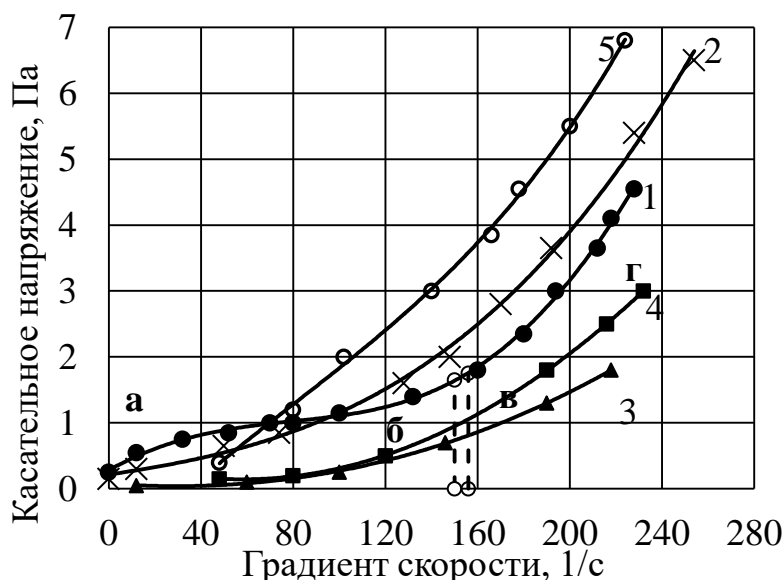


Рис. 1.1. Реологические характеристики бумажной массы:

1 – бумажная масса концентрацией 6 г/л; 2 – волокнистая суспензия беленой сульфатной целлюлозы 5 г/л; 3 – волокнисто-порошковая суспензия 7 г/л; 4 – вода (рифленый внутренний цилиндр); 5 – вода (шероховатые измерительные поверхности)

На рис. 1.2 показано графическое представление реологического уравнения (1.6).

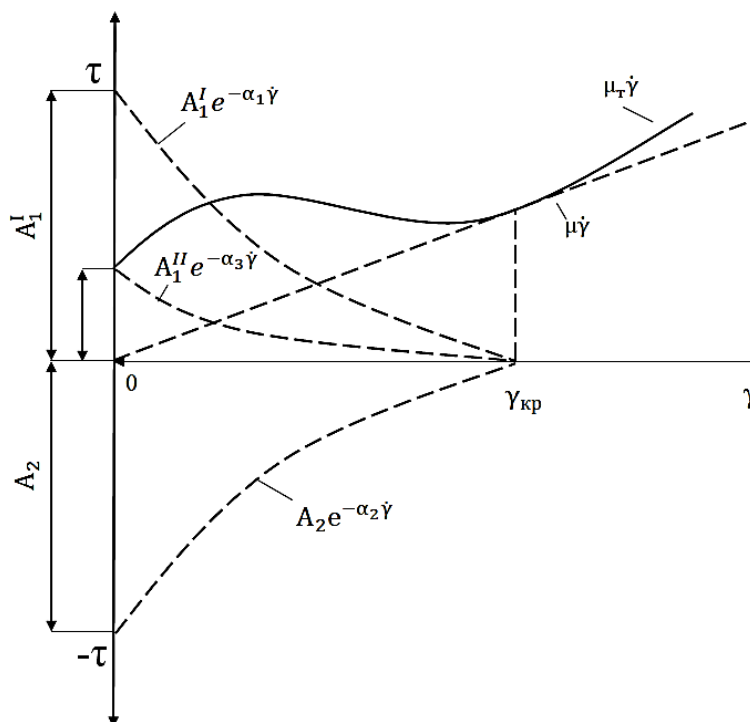


Рис.1.2. Графическое представление реологического уравнения

Выбор реологической модели бумажной массы в значительной степени зависит от свойств волокнистой структуры. Например, коротковолокнистая масса, полученная в условиях режущего размола, является более однородной по сравнению с длиноволокнистой, легче обезвоживается. Поэтому можно не выделять отдельно внутреннюю прочность стержня и флокул, которые характеризуются экспоненциальными членами $A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}}$ и $A_3 e^{-\alpha_3 \dot{\gamma}}$, а заменить их экспоненциальным членом $A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}}$, определяющим внутреннюю прочность волокнистой структуры в соответствии с уравнением (1.6).

Реологическая характеристика в данном случае представляет монотонно возрастающую кривую, либо кривую с небольшим первым максимумом (значительные величины первого максимума на реологической кривой обычно соответствуют длиноволокнистой структуре).

Уравнение (1.6) можно записать следующим образом:

$$\tau = (A_1^I e^{-\alpha_1 \dot{\gamma}} + A_1^{II} e^{-\alpha_3 \dot{\gamma}} + A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}} + \mu \dot{\gamma}) + \mu_T \dot{\gamma}, \quad (1.7)$$

В уравнении (1.7) коэффициент турбулентной вязкости определяется непосредственно из реологической кривой.

В соответствии с уравнением (1.6) на реологической характеристике (рис.1.1, кривая 1) из полной величины касательных напряжений, зафиксированных на поверхности измерительного цилиндра, можно выделить значения турбулентных напряжений, которые появляются в суспензии после скоростей сдвига $\dot{\gamma}_T$. Из величины турбулентных напряжений вычислены значения турбулентной вязкости, представленные на рис. 1.3.

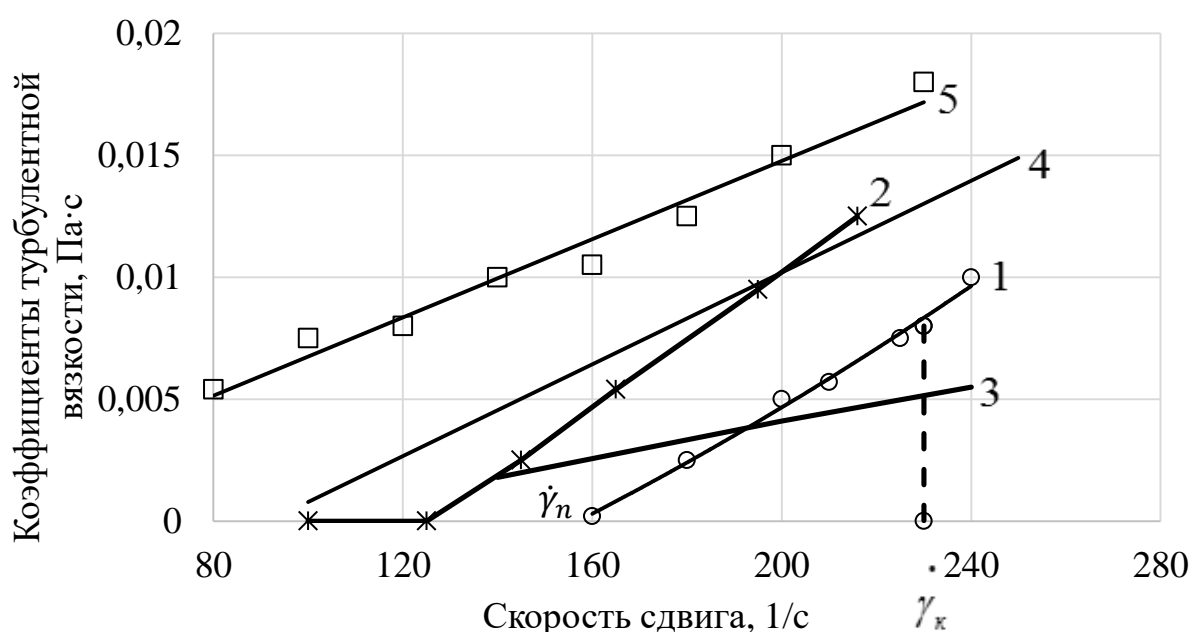


Рис. 1.3. Зависимость динамического коэффициента турбулентной вязкости от скорости сдвига: 1 – бумажная масса ($C=6$ г/л); 2 – суспензия СФИБ ($C=5$ г/л); 3 – волокнисто-порошковая суспензия ($C=7$ г/л); 4 – вода (рифленый внутренний цилиндр); 5 – вода (шероховатые измерительные поверхности)

Как следует из рис. 1.3, турбулентная вязкость представляет собой функцию, линейно возрастающую с увеличением скорости сдвига. Причем, линеаризация начинается не с точки $\dot{\gamma}_k$, а с несколько более высоких скоростей сдвига (точка $\dot{\gamma}_n$), где наблюдается значительное изменение турбулентной вязкости.

Соответственно, турбулентную вязкость после точки можно определить с помощью коэффициента β :

$$\beta = \frac{\mu_{т.кон} - \mu_{т.п}}{\gamma_{кон} - \dot{\gamma}_п}, \quad (1.8)$$

где $\mu_{т.п}$, $\dot{\gamma}_п$ – значения турбулентной вязкости и скорости сдвига в точке перегиба;

$\mu_{т.кон}$, $\gamma_{кон}$ – координаты какой-либо конечной точки прямой.

Тогда уравнение (1.7) для определения касательных напряжений в любой точке реологической характеристики можно записать, с учетом формулы (1.8), в следующем виде:

$$\tau_{ij} = \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \dot{\gamma}_{ij}} + [\mu + \beta(\dot{\gamma}_{ij} + \dot{\gamma}_п)] \dot{\gamma}_{ij}. \quad (1.9)$$

Для невысоких скоростей сдвига (до наступления турбулентного режима течения) уравнение (1.9) превращается в реологическое уравнение (1.1):

$$\tau_{ij} = \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \dot{\gamma}} + \mu \dot{\gamma}. \quad (1.10)$$

По величинам турбулентной вязкости, найденным из реологической характеристики волокнистой суспензии, предлагается оценивать масштаб турбулентности, исходя из формулы Прандтля:

$$\tau = \rho l^2 \left(\frac{d\bar{U}}{dy} \right)^2 = \mu_T \frac{d\bar{U}}{dy}. \quad (1.11)$$

Динамический коэффициент турбулентной вязкости вычисляется следующим образом:

$$\mu_T = \rho l^2 \left| \frac{d\bar{U}}{dy} \right| = \rho l^2 |\dot{\gamma}_{ij}|. \quad (1.12)$$

где l – путь смешения;

ρ – плотность суспензии.

Из формулы (1.12) определяем путь смешения или масштаб турбулентности:

$$l = \sqrt{\frac{\mu_T}{\rho|\gamma_{ij}|}}. \quad (1.13)$$

Сравнение реологических характеристик волокнисто-порошковых суспензий (рис.1.1, кривая 3) и чистой воды (кривые 4, 5), полученных на рифленых и шероховатых измерительных поверхностях соответственно, показывает, что присутствие мелковолокнистой фракции в дисперсной системе снижает значения турбулентных напряжений, хотя характер изменения динамического коэффициента турбулентной вязкости остается приблизительно линейным (рис.1.3, кривые 3,4,5).

Вычисленные из этих данных величины пути смешения или масштаба турбулентности, представлены на рис. 1.4.

Как следует из рис.1.4, пути смешения турбулентных потоков рассматриваемых выше сред возрастают с увеличением скорости и не превышают $3 \cdot 10^{-4}$ м.

Размер волокон рассматриваемых суспензий, кроме волокнисто-порошковых, как правило, составляет в среднем $1 \cdot 10^{-3}$ м, т.е. в пристенном слое возникает мелкомасштабная турбулентность, размеры вихрей которой меньше длины волокна в 3 раза. Увеличению масштаба турбулентности способствует повышение скорости потока.

В рассматриваемом диапазоне скоростей сдвига величины динамического коэффициента турбулентной вязкости волокнистых суспензий сравнимы с величинами коэффициента динамической вязкости диспергированного режима течения. Однако в случае чистой воды этот коэффициент превышает коэффициент вязкости при ламинарном течении более чем в 10 раз. Сравнение масштабов турбулентности потоков волокнистой суспензии и воды (рис. 1.4, кривые 1,2,5) показывает, что наличие волокон способствует уменьшению длины пути смешения турбулентного течения, т.е. замедляется развитие турбулентности.

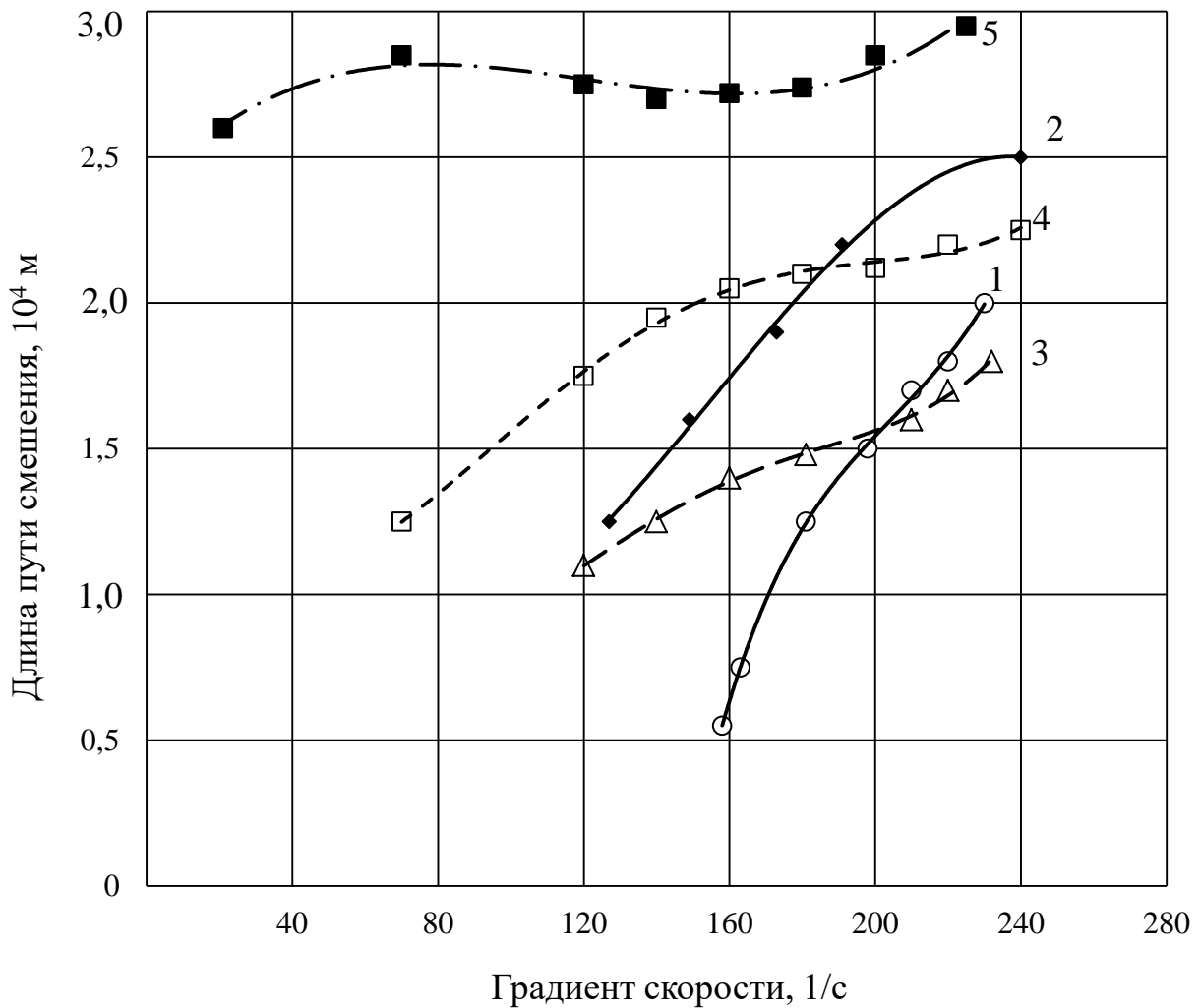


Рис. 1.4. Зависимость масштаба турбулентности от скорости сдвига: 1 – бумажная масса ($C=6$ г/л); 2 – суспензия СФИБ ($C=5$ г/л); 3 – волоконисто-порошковая суспензия ($C=7$ г/л); 4 – вода (рифленый внутренний цилиндр); 5 – вода (шероховатые измерительные поверхности)

В качестве примера приведено аналитическое выражение для реологической характеристики суспензии небеленой сульфатной целлюлозы концентрацией 15 г/л при степени помола 72 °ШР (рис. 1.5, кривая 2) [2].

Для выполнения расчета с реологической характеристики получены следующие параметры: динамическая вязкость диспергированного потока $\mu = 0,1459$ Па·с ; координаты точки максимума $\tau_{\max} = 32,8$ Па, $\gamma_{\max} = 80$ с⁻¹; координаты точки минимума $\tau_{\min} = 32,4$ Па, $\gamma_{\min} = 125$ с⁻¹; первоначальное напряжение сдвига $\tau_0 = 9$ Па. Выбраны коэффициенты $\alpha_1 = 0,0105$ с; $\alpha_2 = 0,043$ с; $\alpha_3 = 0,055$ с.

В результате получено реологическое уравнение

$$\tau = 51,89e^{-0,0105\dot{\gamma}} + 8,71e^{-0,055\dot{\gamma}} - 51,6e^{-0,043\dot{\gamma}} + 0,149\dot{\gamma} . \quad (1.14)$$

Как следует из рис. 1.5, расчетная кривая 1 хорошо описывает экспериментальную реологическую характеристику.

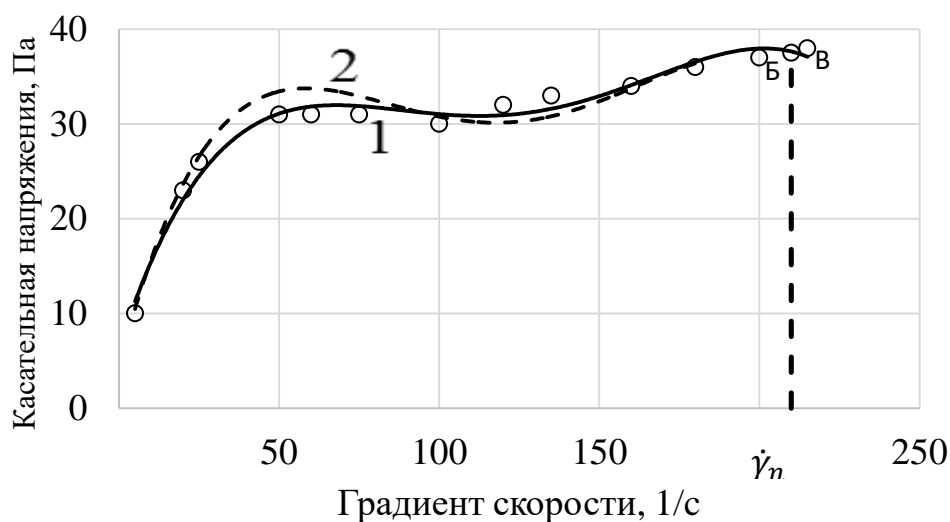


Рис. 1.5. Реологическая характеристика небеленой сульфатной целлюлозы: 1 – экспериментальная кривая; 2 – расчетная кривая

Анализ уравнения 1.1 показывает, что трение водяной прослойки о стенку канала (член $51,89e^{-0,0105}$) значительно больше, чем о волокнистую структуру ($8,71e^{-0,055}$). Действительно, экспериментальная реологическая характеристика (кривая 2) построена на основании результатов, полученных в вискозиметре с шероховатыми измерительными поверхностями, где имеет место значительное трение о стенки. Характеристика имеет участок развития турбулентного течения АВ ввиду достаточно высокой концентрации массы (15 г/л). Поэтому в конечной точке В динамическая турбулентная вязкость незначительна: $\mu_{т.кон} = 0,00454 \text{ Па} \cdot \text{с}$. Воспользуемся ранее разработанной методикой определения турбулентной вязкости с помощью коэффициента $\beta(-1,8)$.

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

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

Тогда $\beta = 0,000211$.

Окончательно реологическое уравнение для кривой 2 с учетом

турбулентного участка запишется как:

$$\tau = 51,89 \cdot e^{-0,0105\dot{\gamma}} + 8,71 \cdot e^{-0,055\dot{\gamma}} - 51,6 \cdot e^{-0,043\dot{\gamma}} + [0,1493 + 0,00211(\dot{\gamma} - 210)]\dot{\gamma}. \quad (1.15)$$

Таким образом, предложена и подтверждена экспериментально модель, характеризующая глубокие структурные изменения в потоке бумажной массы при подаче на БДМ. Предложенные теоретические зависимости позволяют учитывать деформационные процессы в суспензии бумажной массы при ее движении в проточных каналах гидравлического оборудования и соединяющих его трубопроводных коммуникациях массоподводящей системы в целях обеспечения технологически необходимой внутренней структуры потока непосредственно при массоподаче и напуске, что дает возможность уменьшить колебания массы 1 м² бумаги и повысить равномерность распределения волокон в формируемом бумажном полотне.

1.2. Использование реологической характеристики и уравнения движения бумажной массы в прикладных целях

Рассмотрим принципиальную возможность применения реологического уравнения и уравнения движения бумагой массы при решении конкретных практических задач, связанных с оценкой степени диспергированности в каналах гидравлического оборудования ЦБП.

Напорный ящик является ярким примером аппарата, имеющего возможные проточные каналы (канал круглого поперечного сечения, плоский канал, конфузор и др.). Рассмотрим схему напорного ящика «Turbo flowl», успешно зарекомендовавшего себя в промышленности (рис. 1.6). Подробнее конструкция этого напорного ящика рассматриваются в главе 2.

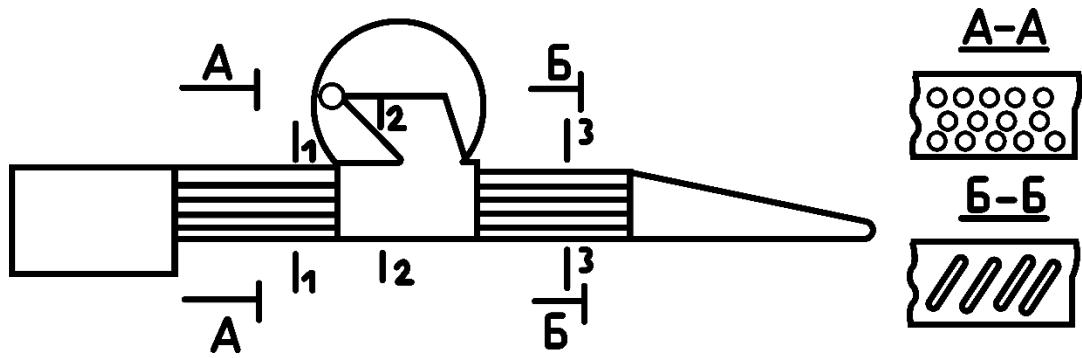


Рис.1.6. Схема проточной части напорного ящика

Из потокораспределителя масса поступает в трубный диспергатор. Для оценки эффективности работы диспергирующих элементов необходимо выполнение условия:

$$\dot{\gamma}_{\text{раб}} \geq \dot{\gamma}_{\text{кр}}, \quad (1.16)$$

где $\dot{\gamma}_{\text{раб}}$ – градиент скорости в проточном канале;

$\dot{\gamma}_{\text{кр}}$ – критический градиент скорости, определяемый из реологической характеристики.

Для труб малого диаметра, к которым относятся трубы перфорированной плиты ($d = 10-12$ мм), определение рабочего градиента сдвига возможно через среднюю скорость потока:

$$\dot{\gamma}_{\text{раб}} = \frac{2U_{\text{ср}}}{d}, \quad (1.17)$$

где U – средняя скорость потока в канале;

d – диаметр канала.

Это представляется возможным, поскольку такое усреднение не дает большого расхождения от истинного распределения поля скоростей. Для каналов малых размеров это расхождение составляет 5-15 %, что вполне допустимо для инженерных расчетов.

В случае проточных каналов больших размеров (сечение 2-2) для определения истинного градиента скорости формула (1.17) не может быть использована, так как погрешность превышает допустимый для инженерных расчетов предел 16 %.

В этом случае для расчета рабочего градиента скорости необходимо

построить эпюру скоростей в рассматриваемом сечении напорного ящика. Расчетная схема показана на рис 1.7.

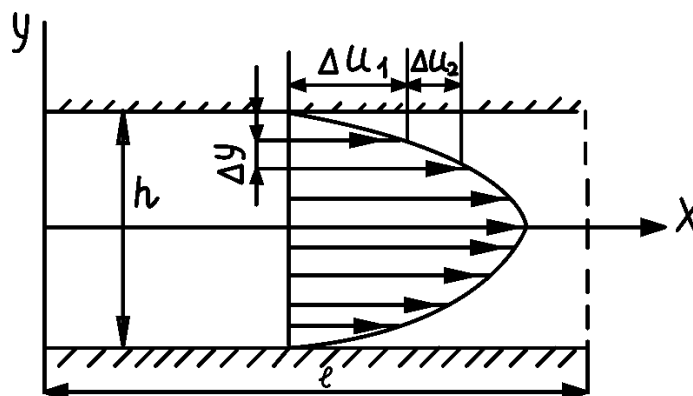


Рис. 1.7. Схема расчета эпюры скоростей в плоском канале

Расчет скорости в любой точке по высоте рассматриваемого сечения производится исходя из общего уравнения движения бумажной массы, предварительно представленного в проекциях на оси прямоугольной системы координат [1]:

$$u_i = \frac{\Delta P h^2}{8l(\mu - A_1 \alpha_1 - A_2 \alpha_2)} \left(1 - 4 \frac{y^2}{h^2}\right), \quad (1.18)$$

где ΔP – перепад давления на участке l ;

h – высота канала;

$A_1, A_2, \alpha_1, \alpha_2$ – коэффициенты реологического уравнения;

μ – коэффициент динамической вязкости;

y – текущая координата.

В процессе прохождения бумажной массы через сечение 1-1 диспергированные волокна при больших скоростях приобретают ориентированное движение вдоль оси трубы. В сечении 2-2 происходит резкое уменьшение скорости и дезориентация волокон. В этом канале эпюра скоростей даже в турбулентном режиме характеризуется высокой степенью неоднородности скорости по высоте канала. В центре канала низкие градиенты скоростей, а у стенок высокие. С учетом релаксационных свойств бумажной массы можно ожидать в центре канала стержневой режим или флокулированный, что может привести к технологической нестабильности

работы напорного ящика.

Для обеспечения диспергированного состояния бумажной массы в полости 2-2 напорного ящика принципиально возможно обеспечить такие высокие скорости, при которых даже минимальный градиент в центре канала будет превосходить значение критического градиента сдвига или длина участка свободного хода l должна быть достаточно малой, чтобы после прекращения воздействия диспергирующих элементов бумажная масса не успевала бы сфлокулировать. Таким образом, время, за которое волокно проходит участок длиной l , должно быть меньше времени релаксации для данного вида бумажной массы. Тогда исследование реологических характеристик волокнистых суспензий в зависимости от времени воздействия на них диспергирующих усилий приобретает высокую прикладную значимость. Наиболее полное описание поведения волокнистой суспензии в этом случае можно получить на основе учета релаксационных свойств, которыми обладают бумажные массы высоких и низких концентраций.

Скорость структурообразования может быть определена исходя из формулы [2]:

$$V_{СТ} = \frac{a}{t}, \quad (1.19)$$

где a – размер флокул;

t – время достижения касательными напряжениями установившегося значения (определяется из релаксационной характеристики).

В современных условиях производства трудно обеспечить постоянное качество исходного волокнистого сырья, для которого время релаксации будет неизменным. Для решения этих задач необходимо обеспечить аппаратное оформление для непрерывного контроля за внутренним состоянием потока бумажной массы в полости напорного ящика.

Возможность приспособливания напорного ящика к различным бумажным массам должна базироваться на их реологических

характеристиках. Необходимо также обеспечить взаимосвязь параметров, оценивающих технологическую структуру потока с системой управления положения подвижных частей и узлов напорного ящика в автоматическом режиме.

1.3. Линейная математическая модель движения бумажной массы при подаче на бумагоделательную машину

Особенностью подачи бумажной массы на бумагоделательную машину является то, что движение ее по системе массоподвода является пульсационным. Это связано с тем, что ряд агрегатов, установленных в массоподводящей системе, генерируют гидравлические пульсации давления, которые распространяются в виде продольных волн давления со скоростью, близкой к скорости звука.

Для разработки математической модели пульсационного движения бумажной массы в массоподводящей системе бумагоделательной машины воспользуемся уравнением движения в проекциях на оси цилиндрической системы координат, а также уравнением неразрывности [2].

Считаем, что бумажная масса движется на тракте подачи только вдоль оси трубопровода OZ, т.е. $\omega \gg U \gg V$. Тогда для решения поставленной задачи запишем уравнение движения в направлении оси OZ:

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + U \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} = \rho \bar{F}_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial \varphi} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \sum_{k=1}^{n+1} \alpha_k A_k \left[e^{-\alpha_k \left(\frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)} \cdot \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial z} \right) + \frac{1}{r} e^{-\alpha_k \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \right)} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r \partial \varphi} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \varphi^2} \right) + 2e^{-\alpha_k \frac{\partial \omega}{\partial z}} \frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} \right] \frac{1}{r} \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \left(\frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)}, \quad (1.20)$$

где ρ – плотность;

ω, U, V – проекции вектора скорости на оси z, r, φ ;

t – время;

μ – коэффициент динамической вязкости.

Необходимо отметить, что уравнение (1. 20) представляет проекцию уравнения движения на ось OZ в цилиндрической системе координат для бумажной массы как вязкой сжимаемой среды. Данное уравнение сохраняет

принципы соответствия, так как для несжимаемой среды принимает вид уравнения движения, полученного О.А. Терентьевым; имеет качественную сходимость с уравнением Навье-Стокса.

Аналогичным образом могут быть записаны уравнения движения в проекциях на оси or и $o\varphi$.

К уравнению (1.20) необходимо также добавить уравнение неразрывности, которое в цилиндрических координатах записывается обычно следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r U) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\rho \dot{\varphi}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \omega) = 0. \quad (1.21)$$

Эти уравнения могут быть использованы при решении прикладных задач, связанных с пульсационным движением бумажной массы в каналах, имеющих форму тел вращения, для которых удобно пользоваться цилиндрической системой координат. Необходимо также отметить, что полученные уравнения чрезвычайно громоздки, а решение прикладных задач не требует учета всего многообразия факторов. Поэтому при решении конкретных задач с учетом граничных условий данные уравнения могут быть приведены к более простому виду, пригодному для практического применения.

Проанализируем уравнение (1.20) с целью определения значимости входящих в него членов. Массовыми силами в потоке пренебрегаем.

В качестве линейного масштаба выбираем длину трубы l ; в качестве масштаба скорости – среднюю скорость движения бумажной массы ω ; а в качестве масштаба скорости распределения пульсационных процессов – скорость звука в бумажной массе – c . Член $\omega \frac{\partial \omega}{\partial z}$ - входящий в уравнение (1.20) с учетом введенных масштабных факторов можно записать как ω^2/l , а член $\frac{\partial \omega}{\partial t}$ – как $\omega c/t$.

Так как для пульсационных процессов, протекающих в бумажной

массе, характерна скорость их распространения, близкая к скорости звука, то выражение $\frac{\partial \omega / \partial z}{\partial \omega / \partial t} \omega$ может быть записано как ω / c .

На основании проведенных рассуждений при $\omega \ll c$, что имеет место в реальных процессах массоподачи на бумагоделательную машину, $\omega \frac{\partial \omega}{\partial z}$ и $U \frac{\partial \omega}{\partial r}$ будут значительно меньше по сравнению с членом $\frac{\partial \omega}{\partial t}$.

Длина рассматриваемого участка трубопровода массоподводящей системы между гидравлическими агрегатами значительно превосходит его радиус, т.е. $r \ll l$. Проведя рассуждения, аналогично рассмотренным выше и принимая во внимание введенные масштабы, а также тот факт, что $r/l \ll 1$, член $\frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2}$ будет малой величиной по сравнению с членами $\frac{\partial \omega}{\partial r}$ и $l/r \frac{\partial \omega}{\partial r}$.

Тогда с учетом рассмотренных допущений, а также принимая во внимание возможность записи реологического члена, характеризующего аномалию вязкости в структурированном режиме, в функциональном виде $f(\dot{\gamma}_{ij}) = \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \dot{\gamma}}$ представим уравнение (1.20) следующим образом:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \nu \left[\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} \right) - f(\dot{\gamma}) \right] + \frac{\nu}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{U}{r} \right). \quad (1.22)$$

Необходимо отметить, что данное уравнение характерно для неустановившегося движения бумажной массы в круглой трубе. В диспергированном режиме $f(\dot{\gamma}) = 0$ уравнение (1.22) качественно совпадает с уравнением неустановившегося движения ньютоновских жидкостей. Отличие заключается в величине коэффициента кинематической вязкости, численное значение которого для бумажной массы всегда превосходит значение того же коэффициента для воды.

Приведем уравнение (1.22) к виду, удобному для решения прикладных задач, связанных с процессом массоподачи на бумагоделательную машину. Для этого воспользуемся стандартными приемами для ньютоновских жидкостей. Умножим все члены уравнения (1.22) на $2\pi r dr$ и проинтегрируем

их по r в пределах от $r = 0$ до $r = R$, где R – радиус трубы.

Имеем

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^R 2\pi r \omega dr, \quad (1.23)$$

$$\int_0^R 2\pi r \rho dr = \pi R^2 \rho. \quad (1.24)$$

Интеграл (1.23) представляет собой количество бумажной массы, протекающее через поперечное сечение трубопровода, а интеграл (1.24) равен произведению изменения давления в данный момент времени на площади сечения трубопровода.

Особое внимание обратим на член, заключенный в квадратных скобках уравнения (1.22). Величина $\frac{\partial \omega}{\partial r}$ является градиентом скорости, который согласно принятым ранее обозначениям равен $\dot{\gamma}$ и может быть связан с нестационарным касательным напряжением τ_H . Учитывая, что $f(\gamma) = \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \gamma}$, окончательно данное выражение может быть записано как :

$$\int_0^R 2\pi r \left[\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) - f(\dot{\gamma}) \right] dz = \frac{2\pi r (\tau_H - \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-d_k \dot{\gamma}})}{\rho \mathcal{V}}. \quad (1.25)$$

Последний интеграл в уравнении (1.22) на основании рассмотрения деформационных процессов в трубе и после ряда преобразований запишется следующим образом:

$$\int_0^R 2\pi r \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{U}{r} \right) dr = \frac{2\pi R^3}{E_{CT} \delta_{CT}} \frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad (1.26)$$

где E_{CT} – модуль упругости материала стенки ;

δ_{CT} – толщина стенки трубопровода.

Подставив значения рассмотренных интегралов и поделив все члены уравнения на πR^2 , получим

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{2(\tau_H - \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \dot{\gamma}})}{\rho R} + \frac{2}{3} \mathcal{V} \frac{R}{E_{CT} \delta_{CT}} \frac{\partial^2 \rho}{\partial z \partial t}, \quad (1.27)$$

или вследствие того, что $\frac{2}{3} \mathcal{V} \frac{\rho c R}{E_{CT} \delta_{CT} l} \ll 1$ при принятых выше масштабах

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{2(\tau_H - \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \dot{\gamma}})}{\rho R}. \quad (1.28)$$

Рассмотрим уравнение неразрывности. Данное уравнение, в отличие от уравнения движения, не претерпевает значительных изменений и его вывод базируется на представлениях Н.Е. Жуковского:

$$\frac{\partial P}{\partial t} \left(\frac{1}{E} + \frac{2R}{E_{\text{ст}} \delta_{\text{ст}}} \right) + \frac{\partial \omega}{\partial z}, \quad (1.29)$$

где E – модуль объёмной упругости суспензии.

В гидродинамических расчетах часто пользуются приведенным модулем упругости, который можно получить по работам Н.Е. Жуковского:

$$E_{\text{пр}} = \frac{E}{1 + \frac{2RE}{E_{\text{ст}} \delta_{\text{ст}}}}. \quad (1.30)$$

Тогда окончательно с учетом уравнения движения и уравнения неразрывности получим систему

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{2(\tau_n - \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \dot{\gamma}})}{\rho R} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}, \quad (1.31)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial z} = - \frac{1}{E_{\text{пр}}} \frac{\partial \rho}{\partial t}.$$

Данная система может служить для описания пульсационного движения бумажной массы в каналах массоподводящих систем бумагоделательных машин и проточных каналах технологического оборудования целлюлозно-бумажного производства.

Необходимо отметить, что в диспергированном режиме (близком к турбулентному) профиль скорости бумажной массы близок к параболическому, что связано с демпфирующим воздействием волокнистой фазы на турбулентность чистой воды.

Характерной особенностью уравнения движения в системе (1.31) является наличие в нем реологического члена, характеризующего глубокие структурные изменения в суспензии при трансформации от структурированного режима движения к диспергированному. В диспергированном режиме при полностью разрушенной структуре первое уравнение системы (1.31) качественно совпадает с уравнением движения ньютоновских жидкостей. Отличительной особенностью является величина касательного напряжения, значительно превосходящая аналогичное значение

для ньютоновских сред. Касательное напряжение, входящее в уравнение движения, определяется исходя из реологических моделей бумажной массы. При этом необходимо помнить, что нестационарное касательное напряжение может быть заменено квазистационарным при условии параболического распределения скоростей по сечению потока. При подаче бумажной массы на бумагоделательную машину имеет место переходный режим, в котором отсутствует сплошной волокнистый стержень, однако в потоке имеется флокулы и диспергированные волокна, подавляющие турбулентность сплошной среды. Поэтому в данном случае имеет место распределение скорости по сечению трубопровода, близкое к параболическому.

2. ВЛИЯНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В МАССОПОДВОДЯЩИХ СИСТЕМАХ БДМ НА КОЛЕБАНИЯ МАССОЕМКОСТИ БУМАГИ

2.1. Колебания массы 1 м² бумажного полотна на бумагоделательной машине

Колебания массы 1 м² бумаги вызваны неоправданно завышенным содержанием волокнистого материала в формируемом листе, что, в конечном счете, сказывается на потребительских свойствах, и в результате чего предприятия несут значительные убытки. На качественные характеристики бумажного полотна оказывает влияние в разной степени большое количество факторов, некоторые из которых приведены в табл. 2.1 [3]. Из данной таблицы видно, что гидродинамические процессы в мокрой части БДМ и особенно система массоподачи и напуска (главным образом пульсационные возмущения в ней) играют заметную роль в формировании качественных показателей и, в частности, колебаний массы 1 м² бумаги.

Эти же процессы оказывают большое влияние на экономические показатели производства бумаги.

Для определения колебаний массы 1 м² используется метод взвешивания образцов различных стандартных размеров (100 x 100 мм, 200 x 250 мм), взятых из продольной полосы бумаги длиной 10-25 м.

Таблица 2.1. Влияние отдельных частей БДМ на формирование качественных показателей бумажного полотна

Качественные показатели бумаги	Система подвода массы	Напуск массы	Сеточная часть	Прессованная часть	Сушильная часть
Масса 1 м ² бумаги					
машинное направление	++	++	-		
поперечное направление	+	++	++		+
Влажность					
машинное направление	++	+	-	+	-
поперечное направление	+	++	++	++	++
Гладкость					
машинное направление	-	-	-	-	-
поперечное направление	+	+	+	+	+
Сопротивление раздиранию	-	++	++	+	+
Структура листа		++	++		

Примечание: ++ сильное влияние; + среднее влияние; - слабое влияние.

Съем образцов производится из поперечной полосы в конце каждого рулона бумаги. Весовой метод определения колебаний считается более точным, но требует больших затрат времени. Значение частоты колебаний массы 1 м² бумаги позволяет определить основные источники, вызывающие эти колебания в массоподводящей системе, тем самым целенаправленно воздействовать на них для снижения уровня пульсационных возмущений. Применяются также косвенные методы измерений, например, на основе бета-метров, позволяющих непрерывно сканировать образцы бумаги или бумажное полотно непосредственно на БДМ, профилометрия, измерение толщины и просвета.

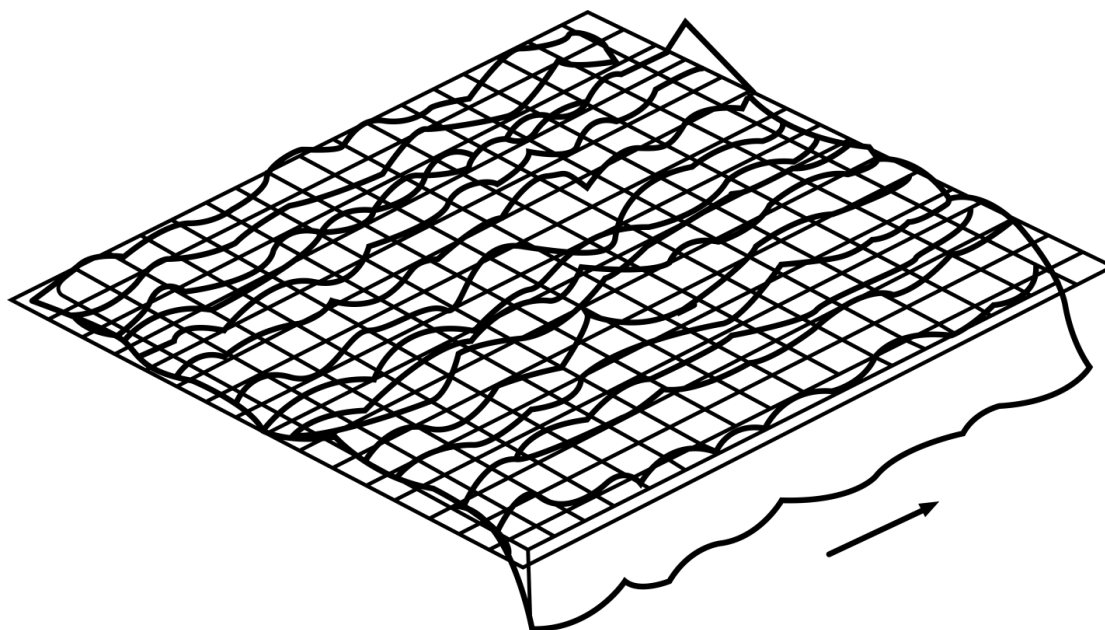


Рис. 2.1. Колебания массоемкости бумаги в продольном направлении на БДМ-3 Архангельского ЦБК

На рис. 2.1. представлена общая картина и на рис. 2.2 частотный спектр колебаний массой 1 м^2 в продольном направлении бумаги-светоосновы для БДМ-3 Архангельского ЦБК. Такая же качественная зависимость характерна в равной степени для всех видов вырабатываемой бумаги на разных бумагоделательных машинах.

Из спектра частот видно, что периодические составляющие колебаний массы 1 м^2 наиболее сильно проявляются в низкочастотной области в пределах 1-40 Гц, т.е. в тех частотах, на которых работает основное гидравлическое оборудование массоподводящих систем – генераторы пульсаций давления. Для анализируемой картины на БДМ-3 Архангельского ЦБК основным генератором пульсаций давления является узлоловитель УЗ-13, установленный достаточно близко перед напорным ящиком и вносящий основной вклад в колебания массы 1 м^2 бумаги на основной и кратной лопастной частотах. Частотный анализ колебаний массы 1 м^2 бумаги позволяет определить источники этих колебаний в массоподводящих системах БДМ.

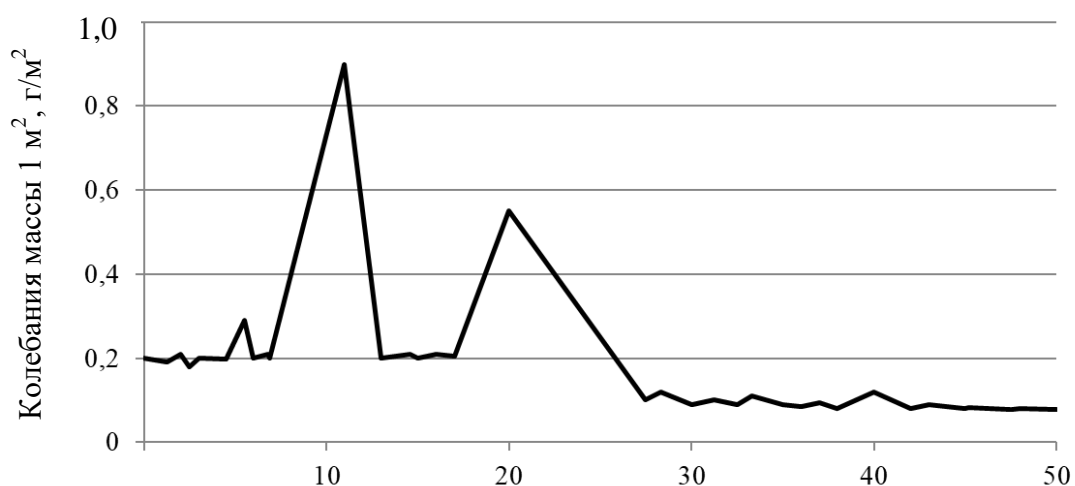


Рис. 2.2. Частотный спектр колебаний массы 1 м² бумажного полотна

Пульсации давления оказывают наибольшее влияние на неравномерность массы 1 м² бумаги. Пульсации давления можно разделить на акустические (низкочастотные) и турбулентные (высокочастотные). Установлено, что спектры пульсации давления могут быть интерпретированы следующим образом: высокая интенсивность пульсаций давления на коротких длинах волн способствует диспергированию суспензии, в то время как высокая интенсивность на длинных волнах вызывает колебания массы 1 м² бумаги.

Считается, что на частотах более 40 Гц происходит сглаживание пульсаций при их распространении в потоке. Разные исследователи дают различные граничные условия контроля диапазона частот колебаний массы 1 м² бумаги, но ни в одной работе предельное значение не превышает 100 Гц.

Изменение массы 1 м² бумаги состоит из длинных периодических и непериодических отклонений с периодом, измеряемым в минутах и даже в часах, и из быстропеременных отклонений с периодом от сотых долей секунды до секунды.

Длительные периодические колебания массы 1 м² вызываются технологическими факторами, такими как колебания композиции, концентрации, степени помола и т.д. Причинами быстропеременных колебаний являются динамика напуска массы на сетку и вибрации узлов

бумагоделательной машины. Происхождение случайной составляющей колебаний обусловлено множеством случайных факторов, действующих в процессе формирования полотна, например, возмущения, передаваемые от рядом стоящих машин, колебания гидропланок и т.д.

Механизм влияния пульсаций давления на распределение массы 1 м^2 состоит в следующем. Акустические колебания в виде продольных упругих волн, распространяясь со скоростью звука в бумажной массе, достигают напускной щели. Таким образом, истечение струи из напускной щели напорного ящика происходит под действием переменного давления, а расход меняется пропорционально давлению. Так как поперечное сечение напускной щели напорного ящика можно считать в первом приближении постоянным и если также полагать, что осредненная концентрация бумажной массы остается неизменной за достаточно большой промежуток времени, намного превышающий период колебаний, то распределение массы 1 м^2 будет пропорционально пульсациям расхода, что подтверждается экспериментально.

Для выявления характера распределения массы 1 м^2 строятся гистограммы распределения, анализ которых показывает, что распределение плотности вероятности близко к нормальному закону. Наибольшие амплитуды имеют гармонические составляющие, являющиеся следствием пульсационных возмущений в бумажной массе.

Обработка экспериментальных данных колебаний массы 1 м^2 в продольном направлении проводится с целью выявления открытых периодичностей. Выявление частот, на которых наиболее явно проявляются скрытые периодичности, в первом приближении производится методом Бью-Балло. По этому методу производится подсчет амплитудных пиков, как и в случае записи на самописец. Однако этим способом трудно определить амплитуду колебаний искомой функции на интересующей частоте. Поэтому дальнейшие расчеты необходимо проводить на ЭВМ с помощью

интегральных косинус-синусных преобразований Фурье для дискретно-заданной функции.

Методы приближенного анализа широко используются при анализе осциллограмм периодических процессов с наложением двух-трех гармонических составляющих. Обработка более сложных осциллограмм проводится с применением теории случайных функций, поскольку приближенными методами невозможно определить весь частотный спектр колебаний.

Спектральный метод выявления периодических составляющих применяется в том случае, когда выявление их с помощью корреляционных функций затруднительно при большом коэффициенте случайности или из-за нечетко выраженных гармоник с большой флуктуацией по частоте. При исследовании спектра, полученного в результате частотного анализа, можно наблюдать острые пики, которые являются следствием периодических колебаний.

Экспериментальные исследования показывают, что, кроме пульсационных возмущений, на неравномерность массы 1 м^2 оказывают влияние механические колебания, усиливающие отрицательное воздействие, в частности, колебания напорного ящика как основного источника, наряду с сеточным столом дополнительного усиления неравномерного распределения волокна в формируемом полотне.

Генерация импульсов в системе присутствует всегда, но не всегда однозначно влияет на массу 1 м^2 . Например, на одной и той же машине при выпуске одного сорта бумаги, это влияние может проявляться сильнее, при выпуске другого сорта – менее сильно. Это положение относится также и к явлению усиления колебаний при напуске на сетку. Механизм усиления состоит в том, что элементарные объемы массы, выходящие из напускной щели напорного ящика в момент повышения давления, имеют большую скорость и догоняют элементарные объемы массы, вышедшие в момент меньшего давления. При синусоидальных колебаниях скорости струи

получаются несинусоидальные колебания массы 1 м^2 с “узким” максимумом и “широким” минимумом.

Теоретическое обоснование некоторых причин, вызывающих неравномерность массы 1 м^2 бумажного полотна в продольном и поперечном направлениях, кратко приведено в работе [2]. Известно, что

$$q_{\text{абс}} = Ah_{\text{щ}} \frac{U_{\text{м}}}{U_{\text{с}}} (C_{\text{ня}} - C_{\text{р}}), \quad (2.1)$$

где $q_{\text{абс}}$ – абсолютно сухая масса 1 м^2 бумаги;

$h_{\text{щ}}$ – высота щели напорного ящика;

$U_{\text{м}}$ – скорость напуска бумажной массы из напорного ящика;

$U_{\text{с}}$ – скорость сетки;

$C_{\text{ня}}$ – концентрация бумажной массы в напорном ящике;

$C_{\text{р}}$ – концентрация регистровой воды;

A – константа.

Чтобы обеспечить постоянной абсолютно сухую массу 1 м^2 бумаги по ширине машины, необходимо чтобы высота щели и скорость напуска бумажной массы были бы постоянны. Скорость напуска, пренебрегая трением, может быть определена как

$$U_{\text{м}} = \sqrt{U_0^2 + 2gH}, \quad (2.2)$$

где H – напор, обеспечивающий напуск бумажной массы;

U_0 – скорость массы в вертикальном сечении напорного ящика перед узлом напуска;

g – ускорение свободного падения.

Анализируя данную формулу, можно сказать, что масса 1 м^2 бумаги будет постоянной величиной, если такой будет и величина U_0 . Из теории потокораспределения известно, что поперечное сечение потокораспределителя зависит от метода расчета и реологических свойств бумажной массы. Эта площадь вдоль потокораспределителя меняется по сложным зависимостям. Поэтому при конструировании потокораспределительных систем изменение площади поперечного сечения

потокораспределителя определяется по более простым зависимостям, т.е. уже на стадии проектирования закладывается некоторое отклонение равномерности профиля по массе 1 м² бумаги от идеального распределения. Необходимо также отметить, что и реологические свойства бумажной массы при напуске не будут являться постоянными вследствие широкого изменения поставок исходного сырья, что связано с ограничением лесосырьевой базы. Это также приводит к дополнительным колебаниям массоемкости бумаги. Поэтому реально необходимо добиваться, чтобы масса 1 м² бумаги не превышала какой-либо максимально допустимой величины, например, значений ГОСТа. Еще одним фактором, вызывающим отклонения профиля массы 1 м², является трудность учета влияния торцевых стенок напорного ящика. В середине напорного ящика течение бумажной массы тормозится только дном и верхней стенкой, а по краям к этим факторам торможения добавляется влияние торцевых стенок. В итоге, даже при одинаковой разнице давлений бумажной массы в потокораспределителе и при напуске скорость в вертикальном сечении, входящая в формулу (2.2), меньше на краях напорного ящика, чем в середине. Поэтому, как правило, на краях происходят завалы массы 1 м² бумаги или картона по сравнению с серединой, где массоемкость несколько выше (рис. 2.3).

Колебания массы 1 м² бумаги вызываются и пульсациями давления бумажной массы в массоподводящей системе БДМ. Требуемая величина напора, входящая в формулу (2.2), обеспечивается работой смесительного насоса. Однако обеспечить эту величину постоянной на выходе смесительного насоса не представляется возможным вследствие прерывистого течения бумажной массы в проточных каналах насоса. В данном случае колебания величины напора приводят к колебаниям скорости напуска, что при постоянной скорости сетки приводит к колебаниям массоемкости бумаги на БДМ. Эти и другие факторы, вызывающие колебания массы 1 м² бумажного полотна, а также методы их уменьшения рассматриваются в следующих главах.

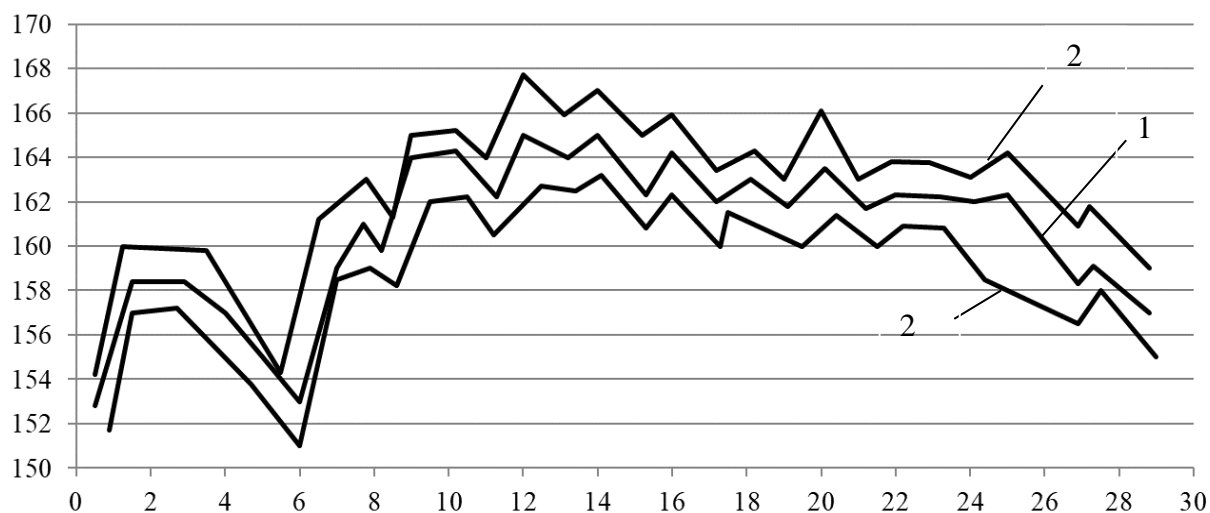


Рис. 2.3. Колебания массы 1 м² картона на КДМ-1 АЦБК: 1 – средняя масса 1 м²; 2 – дисперсия

2.2. Зависимость продольных колебаний бумаги от частотного распределения пульсаций давления в напорном ящике

Как правило, между частотой пульсаций давления и частотой колебаний массы 1 м² бумаги существует прямая зависимость: максимальные амплитуды колебаний массоемкости бумаги соответствуют максимальному уровню пульсаций давления в системе массоподачи на той же частоте. Однако абсолютные колебания всегда превышают колебания бумаги на дискретных частотах. Это происходит вследствие наложения колебаний от различных источников пульсаций давления.

На предприятиях отрасли масса 1 м² бумаги определяется взвешиванием образцов размерами 100x100 или 200x250 мм, при этом контролируется среднее значение и максимальные отклонения от него. На современных быстроходных бумагоделательных машинах осуществляется автоматизированный контроль, который позволяет определять некоторые параметры полотна перед накатом в поперечном направлении. В продольном направлении эта система контроля позволяет определять необходимые параметры с большим периодом, что не отражает влияние многих быстропеременных факторов. Это приводит к большой погрешности, а

быстропеременные колебания массы 1 м^2 вообще не контролируются и их можно считать скрытыми дефектами.

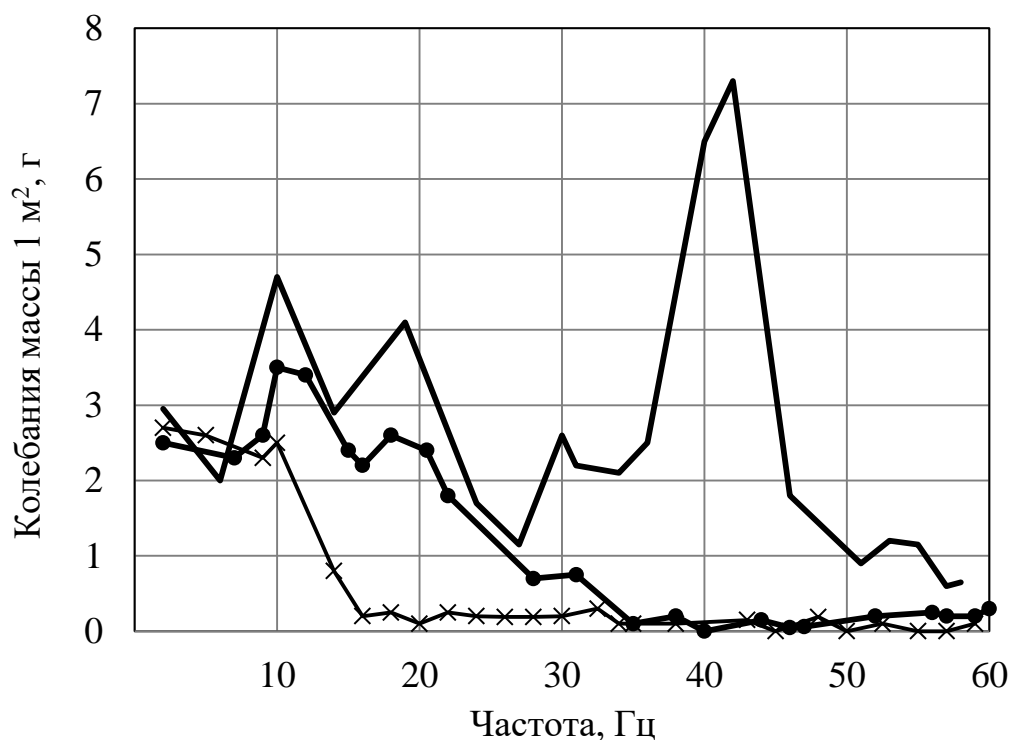


Рис. 2.4. Зависимость колебаний массы 1 м^2 бумаги от частоты взятия проб: $\times\times$ – образцы длиной 200 мм; $\bullet\bullet$ – 100 мм; — — — 50 мм

Для определения влияния высокочастотных составляющих пульсаций давления на колебания массы 1 м^2 бумаги необходимо стандартные образцы бумаги разрезать на более мелкие в продольном направлении. На рис. 2.4 показаны спектрограммы колебаний массы 1 м^2 бумаги-светоосновы на БДМ-3 Архангельского ЦБК для трех размеров образцов 200 х 250 (стандарт), 100 х 250 и 50 х 250. Это позволяет контролировать колебания массы 1 м^2 бумажного полотна с более высокой частотой.

Из рис. 2.4 видно, что анализ образцов длиной 200 мм дает на спектре пик на частоте 10 Гц, генерируемой узлоловителем. При анализе образцов длиной 100 мм появляется новый пик на частоте около 18 Гц, который возникает от наложения колебаний с оборотной частотой насоса 16 Гц и лопастной частотой узлоловителя 20 Гц. Пики на характерных частотах становятся более ярко выраженными.

На спектре, полученном по образцам длиной 50 мм, виден значительный пик в частоте 42 Гц, который не контролируется при анализе образцов стандартных размеров и причиной которого является вибрация напорного ящика.

Отсюда можно сделать вывод, что контроль по образцам стандартных размеров не всегда дает полную информацию о колебаниях массы 1 м² и не гарантирует необходимых потребительских свойств готовой продукции.

Длина полосы и продольный размер образцов бумаги зависят от скорости движения полотна и диапазона исследуемых частот. Можно рекомендовать определение длины полосы и продольного размера образца, исходя из следующих зависимостей:

$$L \geq \frac{U}{f_{min}}; l \leq \frac{U}{2f_{max}}; , \quad (2.3)$$

где U – скорость движения бумажного полотна;

f_{min} – нижний предел исследуемого частотного диапазона;

f_{max} – верхний предел исследуемого диапазона частот.

Таким образом, необходима разработка и стандартизация новой методики контроля колебаний массоемкости готовой продукции целлюлозно-бумажного производства, а основой такой методики должно быть стандартное аппаратное обеспечение с универсализацией контроля переменных параметров готовой продукции.

2.3. Массоподводящие системы бумагоделательных машин

Массоподводящие системы предназначены для подготовки, очистки, деаэрации и равномерной подачи бумажной массы на сетку бумагоделательной машины.

На современных быстроходных машинах применяются закрытые системы подачи бумажной массы, где масса от машинного бассейна до напорного ящика проходит по оборудованию закрытого типа и по трубопроводам, не соприкасаясь с воздухом.

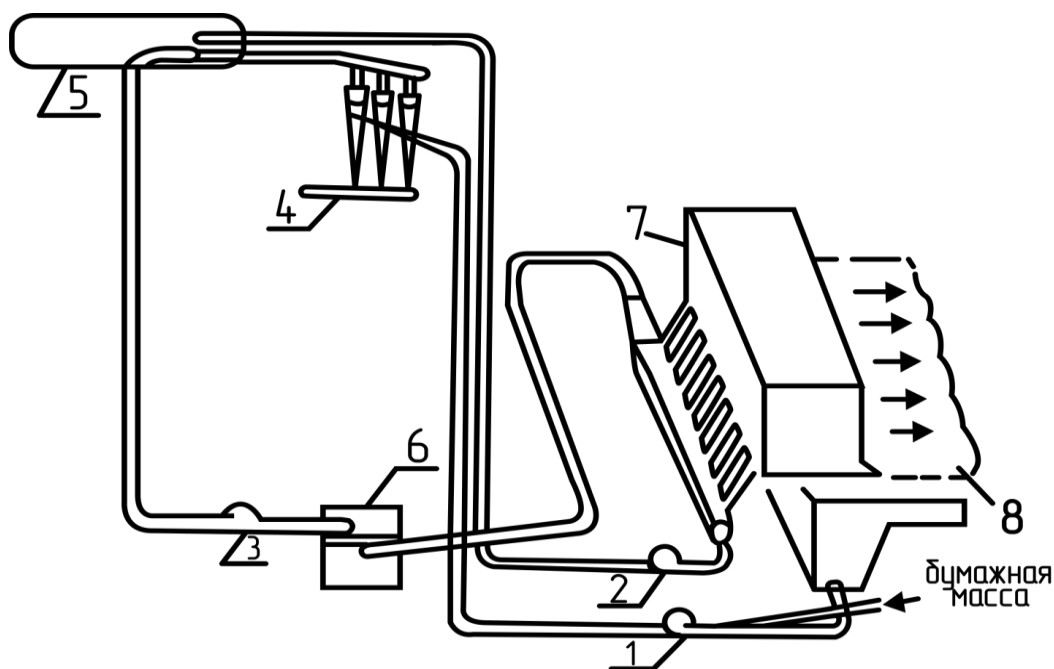


Рис.2.5. Типовая схема массоподводящей системы БДМ; 1 – смесительный насос; 2,3 – центробежные насосы; 4 – цетриклинеры; 5 – деаэратор; 6 – напорная сортировка; 7 – напорный ящик; 8 – сетка

На рис. 2.5 в качестве примера, представлена типовая система подачи бумажной массы на бумагоделательную машину. Все массоподводящие системы отличаются друг от друга, в основном, лишь конструкциями своих отдельных элементов, количеством очистного и сортирующего оборудования, их местоположением, а также схемой трубопроводных коммуникаций.

Таким образом, в зависимости от производительности бумагоделательной машины, технологических требований, предъявляемых к вырабатываемой продукции, компоновочные схемы массоподводящих систем могут быть различны и содержать разное количество гидравлических машин и аппаратов. Однако принципиально гидравлическое оборудование массоподводящих систем не отличается, что позволяет обобщить системы массоподдачи различных бумагоделательных машин.

2.3.1. Массные и смесительные насосы

Конструкции насосов для подачи бумажной массы на подвергаются, как правило, принципиальным изменениям. Совершенствование конструкций насосов сводится к улучшению их рабочих характеристик и повышению стабилизации потока подаваемой массы.

Из всех характеристик насосов наибольшую информацию об их техническом состоянии дают вибрации корпуса насоса и пульсации давления бумажной массы.

Массные и смесительные насосы являются одними из основных источников пульсаций давления. В технологическом потоке бумагоделательной машины используется от 50 до 100 насосов, причем с точки зрения надежности работы ЮДМ во многих местах предусматриваются комплектные запасные агрегаты, т.е. выход из строя только одного насоса может вызвать остановку всего технологического процесса. Кроме того, насосное оборудование предприятия потребляет от 25 до 30 % от суммы общих затрат энергии. На рис. 2.6 приведена диаграмма распределения по количеству насосов и затратам энергии для двух бумагоделательных машин различной производительности 50 000 т/год и 110 000 т/год. У машины с меньшей производительностью насосы с потребляемой мощностью от 0 до 30 кВт составляют 71 % всех насосов, мощностью от 30 до 75 кВт – 20 % и мощностью более 75 кВт – всего 9 %. Однако эти 9 % крупных насосов потребляют более 37 % электроэнергии. У бумагоделательной машины большой производительности эта зависимость проявляется намного сильнее.

Так как наблюдается тенденция к увеличению производительности бумагоделательных машин, а наиболее реальным параметром, способствующим такому увеличению, является скорость, то массные насосы должны иметь значительный напор. Возрастание напора неизбежно приводит к увеличению низкокачественных пульсаций давления, генерируемых насосом и, как следствие, к возрастанию колебаний массоёмкости бумаги.

При рассмотрении физической картины возникновения пульсаций давления в центробежном насосе, процесс движения жидкости в проточном канале рабочего колеса можно представить как совокупность фазы нагнетания и фазы прерывания потока. Фаза нагнетания соответствует такому положению, когда при вращении рабочего колеса выходное отверстие проточного канала совпадает с отверстием отводного патрубка. Разность давлений жидкости в проточном канале и отводе, с одной стороны, обеспечивает нагнетание жидкости в напорную систему, с другой стороны, является причиной возникновения пульсаций давления.

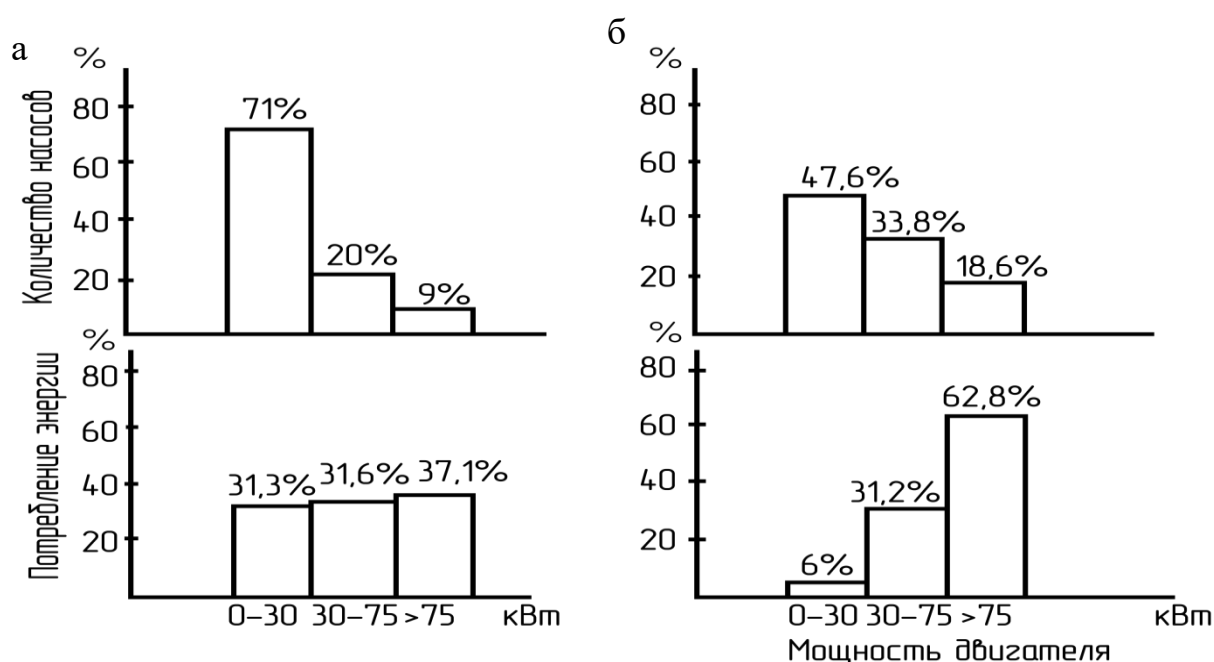


Рис. 2.6. Сопротивление насосного хозяйства двух бумагоделательных машин: а – производительностью 50 000 т/год; б – производительностью 100 000 т/год

Фаза прерывания потока соответствует такому положению, когда проточный канал рабочего колеса перекрывается языком улитки и в проточном канале происходит явление, подобное гидроудару. Поток оказывается, на очень короткий промежуток времени, в замкнутом объеме канала, так как частота вращения ротора достаточно велика, при этом динамическое воздействие вызывает вибрации потока, распространяется в направлении, противоположном движению жидкости, и отражается от корпуса. При вращении рабочего колеса совокупность этих импульсов

преобразуется в пульсации давления на выходе из насоса на лопастной частоте, а их амплитуда определяется разностью давлений на периферии рабочего колеса и в отводящем патрубке [3].

В фазе прерывания скорость потока в проточном канале падает практически до нуля, а при вращении рабочего колеса постепенно увеличивается, вплоть до фазы нагнетания, где происходит приращение скорости потока (рис. 2.7, кривая 1).

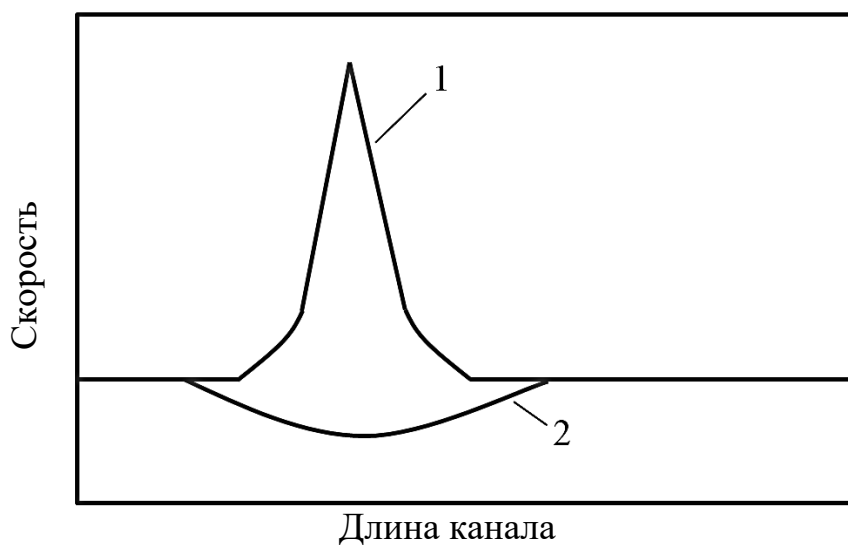


Рис.2.7. Колебание скорости потока при движении по каналам колеса: 1 – нормальное колесо; 2 – колесо с расширяющимися проточными каналами

Неравномерность скорости потока в проточном канале за один полный оборот рабочего колеса вызывает соответствующие колебания нагрузки на валу ротора. Это явление наряду с техническим состоянием насоса является причиной вибраций и пульсаций давления на обратной частоте, а их амплитуда определяется конструкцией насоса. При выходе жидкости из проточного канала (в фазе нагнетания) создается реактивное воздействие, вызывающее вибрации ротора. Можно полагать, что вибрации ротора воздействуют на жидкость, вызывая пульсации давления и на корпус насоса, усиливая его собственные колебания. Минимальный уровень пульсаций давления, как было установлено при исследованиях на лабораторном стенде, достигается при работе насоса с максимальным коэффициентом полезного действия, т.е. в оптимальном режиме подачи на конкретную

массоподводящую систему. В конечном счете, изменение амплитуды пульсаций давления связано с изменением условий работы насоса на систему массоподачи, определяемыми ее полным гидравлическим сопротивлением. Отсюда следует, что генерирование пульсаций давления смесительным насосом необходимо рассматривать только при его работе на конкретную массоподводящую систему. Это необходимо учитывать при проектировании массоподводящих систем бумагоделательных машин, в частности, при выборе смесительных насосов (рис. 2.8).

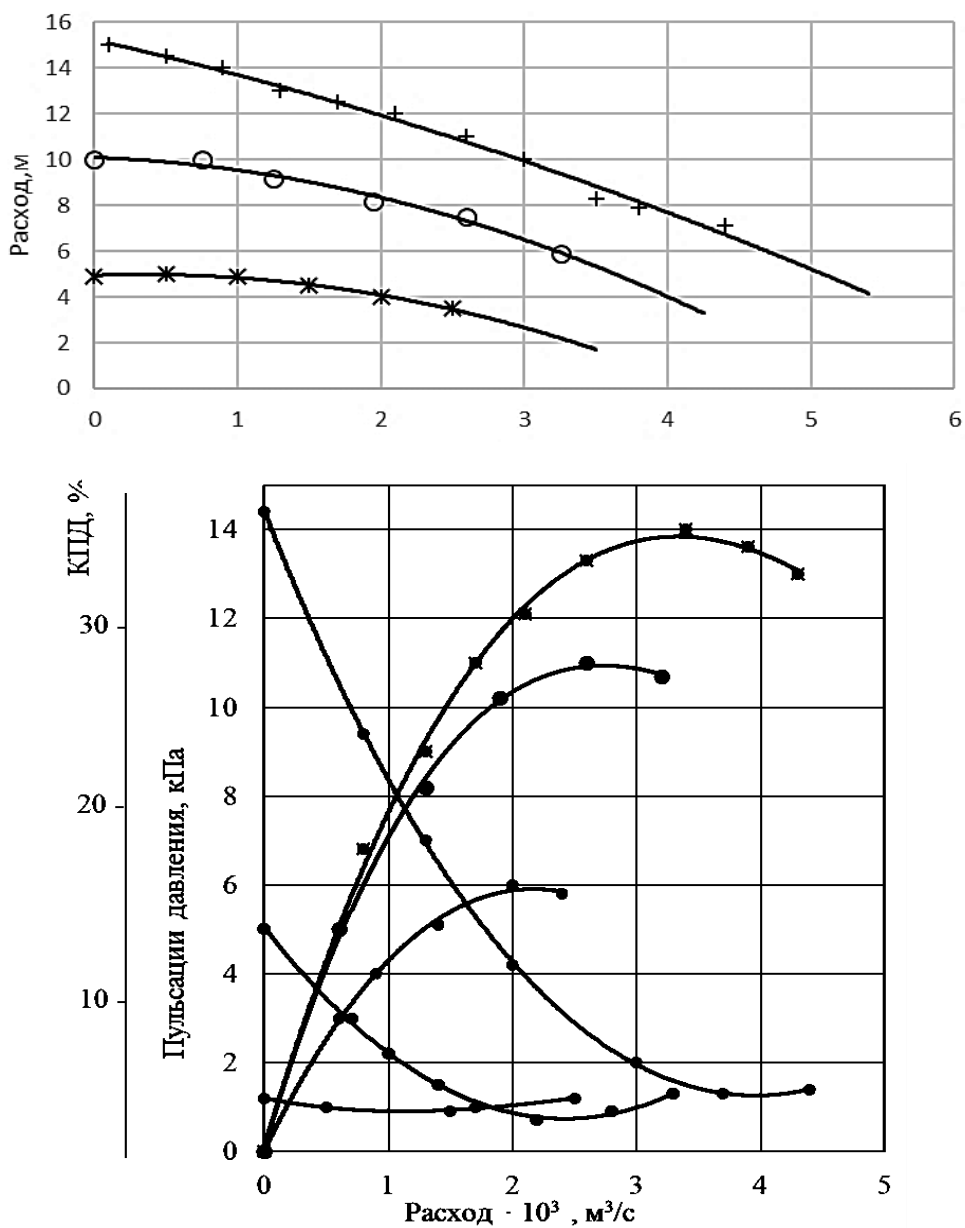


Рис. 2.8. Взаимосвязь гидравлических и пульсационных характеристик центробежного насоса: \times – $n = 2900 \text{ об/мин}$; \circ – $n = 2500 \text{ об/мин}$; \bullet – $n = 1980 \text{ об/мин}$

При перекачивании волокнистых суспензий наблюдается некоторое отличие по сравнению с работой на воде. Работа насоса в требуемом режиме характеризуется точкой пересечения характеристики насоса и характеристики массоподводящей системы, причем эта точка должна находиться после перегиба кривой потерь напора, что соответствует минимальным потерям напора (рис. 2.9).

Достигается это при движении суспензии в диспергированном режиме, определяемом из реологической характеристики для конкретной суспензии по величине критического градиента скорости сдвига. Как правило, подача бумажной массы на бумагоделательную машину осуществляется в переходном режиме, т.е. при градиентах скорости меньше критических. Отклонение градиента скорости от его критического значения приводит к увеличению потерь напора. При этом увеличивается разность давлений в насосе и массоподводящей системе, что, в свою очередь, вызывает увеличение уровня пульсационных возмущений.

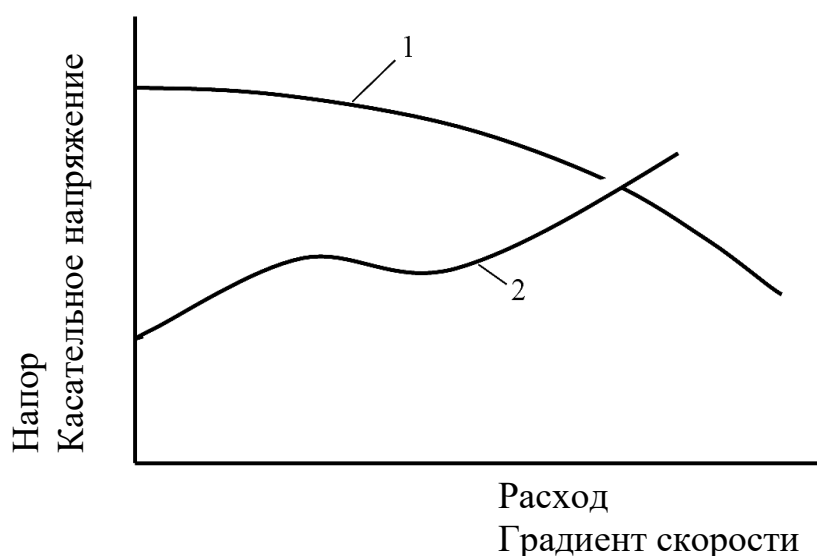


Рис. 2.9. Сопоставление характеристики насоса и реологической кривой течения: 1 – характеристика насоса; 2 – реологическая характеристика

Частота базовых пульсаций или «оборотная» частота зависит от числа оборотного раствора. Число пульсаций за один оборот ротора равно числу лопаток колеса. Эти пульсации вызываются прерывистым режимом,

создаваемым лопастями в потоке, протекающем через ротор. Частота лопастных и оборотных пульсаций давления определяется из соотношений

$$f_{л} = \frac{nz}{60}; f_0 = \frac{n}{60}, \quad (2.4)$$

где n – частота раствора;

z – число лопастей.

Применяемые в ЦБП спиральные насосы с рабочим колесом двухстороннего всасывания из-за большой номенклатуры, как правило, работают не в оптимальном режиме. При перегрузке наблюдаются пульсации давления из-за развития кавитации на лопастях рабочего колеса насоса, что значительно снижает рабочие характеристики и способствует разрушению проточной части. Кавитация – это образование в жидкости квансионных пузырьков, заполненных газом. Кавитация образуется в результате местного понижения давления в жидкости, которое может происходить либо при увеличении скорости, либо при прохождении акустической волны большой интенсивности во время полупериода ее разряжения. Перемещаясь в области более высокого давления или во время полупериода сжатия, квансионный пузырек захлопывается, излучая при этом ударную волну.

Насосы со связанными с ними устройствами-трубопроводами, арматурой, бассейнами рассчитываются по максимальному расходу бумажной массы. При расходе меньше расчетных (как правило, насосы работают не в оптимальном режиме) в проточных каналах возникают обратные течения, которые приводят к низкочастотным пульсациям давления. Рассогласование привода насоса приводит к пульсациям давления на двойной оборотной частоте, а кавитация – на нескольких частотах, кратных обратной.

Для оптимизации режима подачи фирма «Стремберг» предлагает использовать преобразователи частоты вращения насоса. Наряду с известными способами регулирования расхода (дросселирование клапаном и способ «включения-отключения» насосов) предлагаемый способ позволяет достичь значительной экономии энергии (до 50 %), обеспечивает меньший

износ оборудования, стабильный поток бумажной массы в широких диапазонах по расходу, а также создания систем автоматического управления.

Фирма «Серлакиус» проводила исследования амплитудно-частотных характеристик пульсаций давления в зависимости от частоты вращения ротора, числа лопастей, диаметра рабочего колеса, угла расположения лопастей и ряда других параметров. Полученные результаты доказывают существенное влияние вышеуказанных факторов на пульсации давления : при увеличении частоты вращения ротора уровень пульсации возрастает; несистематичность ротора особенно заметна на оборотной частоте; в результате уменьшения диаметра колеса ротора было замечено снижение амплитуды пульсаций; увеличение числа лопаток влечет за собой снижение лопастной частоты, но не влияет на оборотную; разница ширины каналов между лопастями также способствует увеличению колебаний, так как вызывает несимметричность ротора.

Обычно достичь максимального коэффициента полезного действия насоса практически не удается. Центробежные насосы изготавливаются в основном путем литья, что ограничивает их конструкцию. Поэтому на практике насосы часто оказываются, как правило, большей производительности, чем необходимо для конкретной массоподводящей системы.

Для решения проблемы оптимизации массоподдачи корпорация «Alles Chalmer» разработала стандартный ряд одноступенчатых центробежных насосов для массоподводящих систем, которые проектируются с помощью компьютера таким образом, чтобы производительность насоса точно совпала с требуемой для конкретной системы массоподдачи. В этом случае значительно снижаются пульсации и вибрации насоса, увеличивается срок службы и, как следствие, улучшается качество вырабатываемой бумаги. Для выравнивания колебаний давления могут применяться специальные направляющие аппараты на выходе насоса.

Одним из возможных путей снижения пульсаций давления, генерируемых насосами двухстороннего всасывания, является также установка рабочих колес с лопатками левого и правого хода, смещенными относительно друг друга на полшага.

В этом случае лопастная частота будет определяться по формуле

$$f_{л} = \frac{2nZ}{60}, \quad (2.5)$$

где 2 – коэффициент, учитывающий смещение лопастей.

Частоты, на которых смесительный насос генерирует пульсации давления, будут иметь более высокое значение, что облегчает их демпфирование. Кроме того, импульс перепада давления между лицевой и тыльной сторонами лопаток одного хода частично компенсируется смещением импульса перепада давления между сторонами лопаток другого хода. Тем самым достигается более низкая амплитуда пульсаций давления, генерируемая смесительным насосом. Данное конструкторское решение было реализовано на БДМ-1 Котласского ЦБК, что позволило уменьшить массу 1 м² мешочной бумаги и сократить расход дорогостоящего волокнистого материала.

На колебания корпусов насосов воздействуют также дефекты электродвигателя, отрывные течения и вихреобразование из-за неудачной формы проточной части насоса. Кроме того, пульсации давления могут возникать из-за отсутствия натяжения в гибком соединении насоса с приводом и трубопроводом.

Уровень базовых пульсаций давления зависит от технического состояния насоса. Требования к балансировке роторов массоподводящих систем в 5 раз выше требований, предъявляемых к обычным промышленным насосам. Более чем в два раза уменьшить пульсацию давления позволяет шлифование поверхности ротора, ликвидация отклонений от геометрии лопастей (выступы, впадины), оптимальная геометрия выпускного отверстия и ряд других мероприятий. Центровка насоса позволяет снизить вибрации в 5-7 раз, а пульсации давления в 2-3 раза.

Минимум пульсаций давления генерируют насосы, работающие в точке наилучшего режима (ТНР) [3]. На рис. 2.10 показано, что при 100 % производительности уровень пульсаций минимальный. Ниже или выше (ТНР) уровень пульсационных возмущений резко возрастает. Указывается, что в точке «115 %» развивается кавитация.

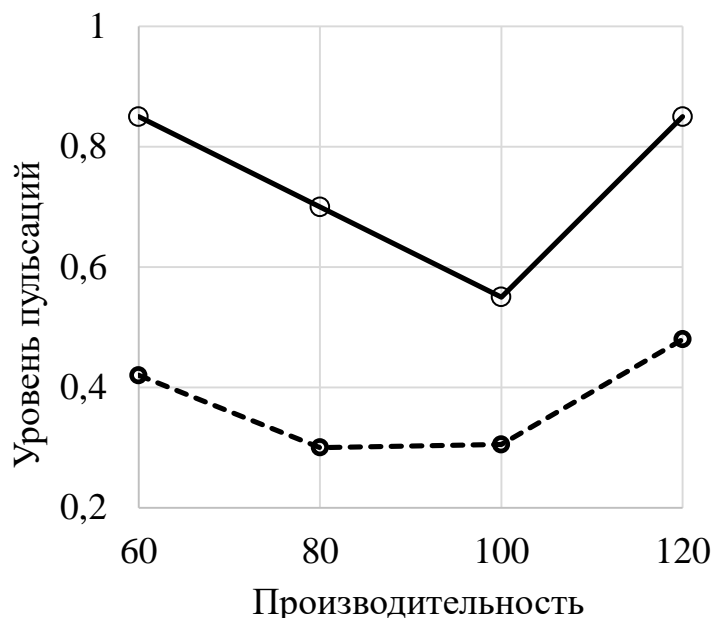


Рис. 2.10. Работа насоса в точке наилучшего режима: — обычный центробежный насос; - - - - - специальный насос

Единых требований к уровню максимально допустимых пульсаций давления на выходе смесительных насосов не существует. Различные фирмы-изготовители рекомендуют предельные значения амплитуды пульсаций давления, на выходе насоса, например, 10^3 Па или в диапазоне $1,5-3,5 \cdot 10^3$ Па; 0,5 % от величины развиваемого напора, но не более ± 1 МПа. Поэтому этот вопрос требует дальнейшего изучения с выходом на конкретные виды бумаги.

2.3.2. Очистка бумажной массы в поле центробежных сил

Включения, отличающиеся по плотности от волокна, удаляются из бумажной массы в аппаратах циклонного типа. К таким аппаратам относятся различные конструкции вихревых конических очистителей (гидроциклоны), а также установки, в которых гидроциклоны малого диаметра соединены в

блоки и могут быть расположены в одном корпусе (радиклоны) или работать самостоятельно, имея общие коллекторы для подвода и отвода бумажной массы (центриклинеры).

В вихревых очистителях отсутствуют вращающиеся части, такие как рабочее колесо в центробежном насосе или ротор у гидродинамической сортировки, что исключает возможности генерирования пульсаций давления путем механического прерывания потока. Однако это еще не гарантирует возможность рассматривать аппараты данного типа как гасители пульсаций давления. При неправильном расположении вихревых очистителей в системе подвода бумажной массы в аппарате могут возникать резонансные явления, вызывающие их вибрацию и, как следствие, увеличение уровня пульсаций давления.

В связи с жесткостью требований, предъявляемых к стабильности условий напуска бумажной массы на сеточную часть бумагоделательной машины, существует необходимость рассматривать вихревые очистители как гасители пульсаций давления объёмного типа, без нарушения их основной технологической функции – очистки [3]. Однако распределение составляющих потока бумажной массы в вихревом очистителе имеет более сложный характер, что в итоге и определяет отличие его демпфирующего действия от гасителей объёмного типа.

Установки вихревых конических очистителей имеют разнообразные конструкции и размеры. В их состав может входить разное количество очистителей, однако их объединяет одно общее свойство – высокое гидравлическое сопротивление. При движении в вихревом очистителе волокнистой суспензии вследствие ее ускорения происходит переход из одного структурного состояния в другое. Это определяет высокие потери напора, а также соответствующие потери энергии пульсации давления.

Основное действие вихревого очистителя как демпфера заключается в образовании так называемой волновой пробки, затрудняющей прохождение волн давления вследствие упругости бумажной массы. Многократно

отражаясь от стенок аппарата, акустические волны изолируются в замкнутом объеме и не проходят в полной мере в выходной трубопровод. Таким образом, демпфирование может происходить потому, что энергия пульсаций давления изолируется в емкости и рассеивается в упруго-вязкой среде. Разложив пульсационные возмущения на тангенциальную, радиальную и осевую составляющие, можно сделать вывод, что их уровень, в основном, будет определяться осевой составляющей, так как она направлена в восходящем потоке к выходному патрубку вихревого очистителя.

Вихревой очиститель может обеспечить снижение уровня пульсаций давления в широком диапазоне частот. Однако следует иметь в виду, что он будет сохранять недостатки объёмного гасителя, а именно, при значительных длинах акустических волн, соответствующих низкокачественным пульсациям давления, эффективность демпфирования снижается. Несмотря на это, вихревой очиститель имеет преимущество перед объёмным гасителем. Которое заключается в том, что входной и выходной патрубки аппарата расположены в разных плоскостях. Это затрудняет прохождение прямой акустической волны в выходной патрубок, так как наиболее энергоемкие волны давления, распространяющиеся без заметного ослабления, через вихревые очистители не проходят в систему массоподачи.

Резкое расширение потока на входе в аппарат обеспечивает рассеивание энергии и снижение за счет этого уровня пульсаций давления. При тангенциальном движении нисходящего потока, данный поток отжимается центробежной силой к стенкам аппарата, что увеличивает силы трения волокнистой суспензии о стенки и тем самым усиливаются диссипационные процессы пульсационной энергии. Кроме того, в центре аппарата по оси к направлению выходного патрубка восходящий поток играет роль эластичного цилиндра, что также обеспечивает дополнительное снижение уровня пульсаций давления.

Постоянное изменение составляющих скорости способствует перераспределению энергии в различных составляющих потока, вызывает ее

рассеивание в упруго-вязкой среде, какой является волокнистая суспензия. При этом часть пульсационной энергии переходит в работу сжатия воздушного столба на оси вихревого очистителя. Необходимо отметить, что демпфирующее воздействие потоков, образующих эластичные цилиндры, более эффективно для тангенциальной и радиальной составляющих потока, направленных перпендикулярно. Представим физическую картину распространения акустических волн давления в плоскости вихревого очистителя (рис. 2.11).

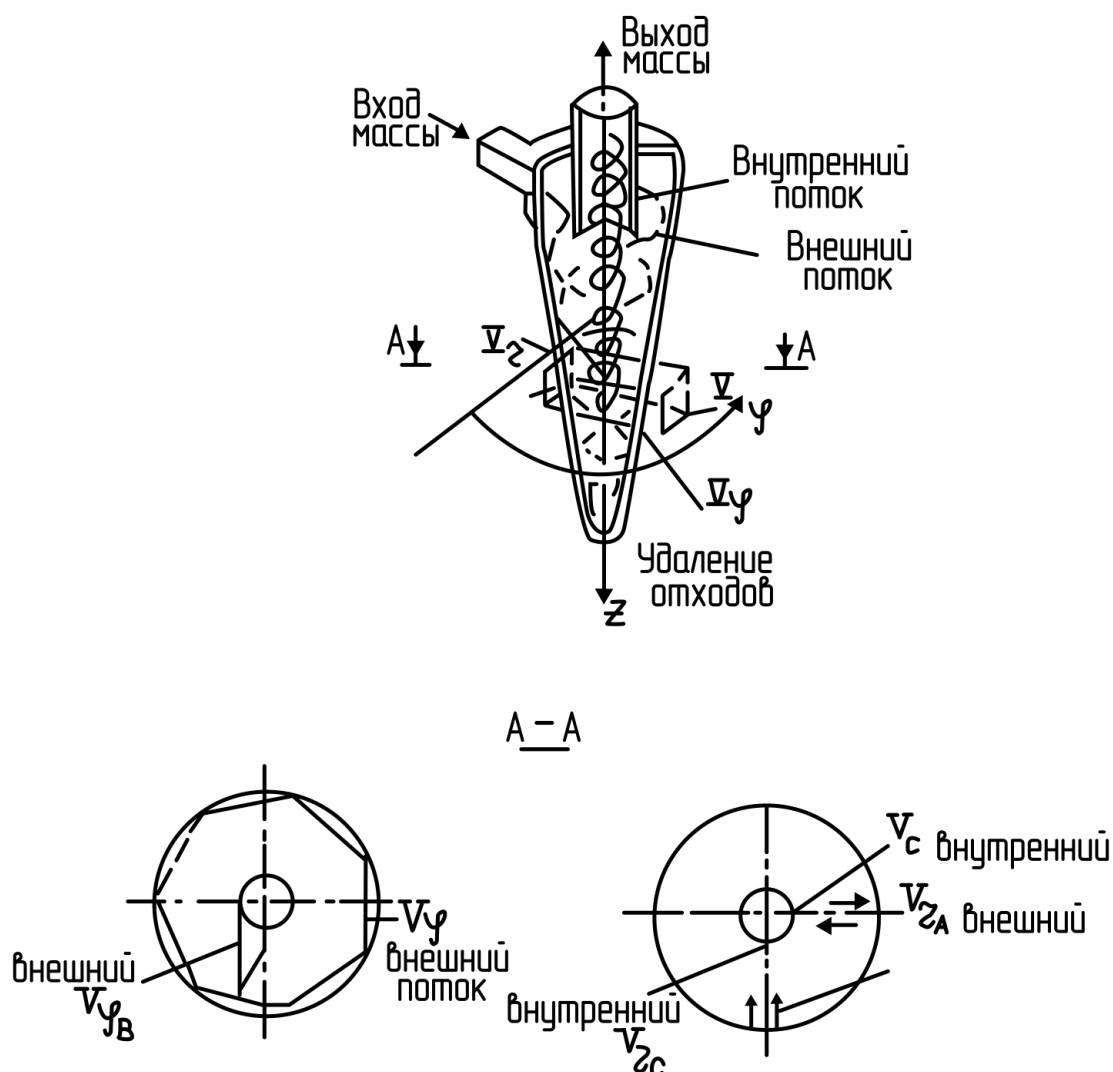


Рис. 2.11. Распространение потока на вихревом очистителе

В аппарате опускающийся поток бумажной массы разделяется на поток очищенной суспензии, резко меняющей направления движения и поднимающийся вверх в виде столба малого диаметра и потока отходов, т.е. происходит разделение пульсационной энергии по двум составляющим. В

нижней части аппарата возрастает скорость, что приводит к увеличению турбулентности и смещению пульсационного спектра в высокочастотную область. Кроме того, за счет изменения направления потока происходит интерференционное наложение акустических волн, что в зависимости от их фазового сдвига может либо сглаживать, либо несколько увеличивать амплитуду. Однако учитывая тот факт, что часть пульсационной энергии уходит вместе с потоком отходов в нижней части аппарата, общий уровень пульсаций давления на выходе вихревого очистителя значительно ниже, чем на входе. Качество очистки в аппарате циклонного типа можно определить по фактору разделения, который представляет отношение центробежной силы к силе тяжести:

$$\Phi = \frac{U^2}{rg}, \quad (2.6)$$

где r - радиус аппарата.

Как видно из формулы, фактор разделения увеличивается с уменьшением радиуса вихревого очистителя, это привело к созданию установок гидроциклонов. Шведская фирма «Noss» выпускает установки вихревых очистителей типа «Радиклон», которые устанавливаются непосредственно перед бумагоделательной машиной. Установки типа «Бауэрвак» и «Форжект» наряду с эффективной очисткой бумажной массы обеспечивают частичное удаление воздуха из бумажной массы. Уровень пульсаций давления при прохождении потока через эти установки снижается практически в два раза.

Широкое распространение получили также циклонные аппараты фирмы Альстрем – «Твинклинер» (рис. 2.12), которые выпускаются в различных модификациях, причем количество очистителей может варьироваться от 2 до 36. Данные аппараты имеют общие коллекторы для подачи и отвода массы, а также для отвода отходов после очистки. Несмотря на повышение эффективности очистки в аппаратах малых размеров, определяющую роль в снижении уровня пульсационных возмущений играет

объем вихревого очистителя. Так, на БДМ-3 Архангельского ЦБК в системе массоподвода после смесительного насоса был установлен магноклинер – вихревой очиститель большого объёма, который демпфирует пульсации давления в 20 раз.

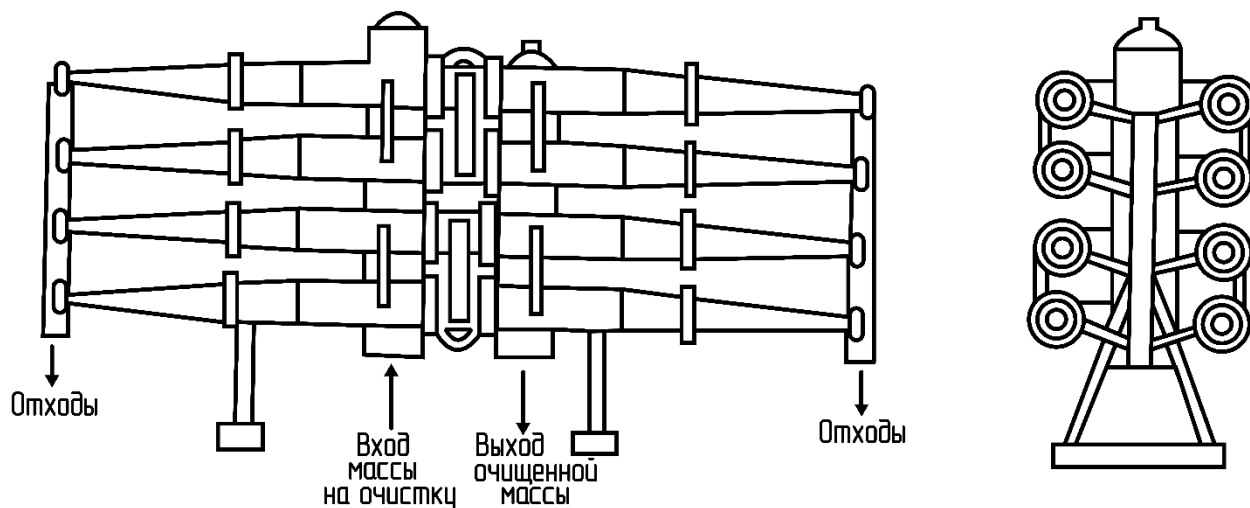


Рис. 2.12. Циклонные аппараты «Твинклинер»

2.3.3. Деаэрация бумажной массы

Удаление воздуха из бумажной массы является необходимым условием стабильности работы бумагоделательной машины. С увеличением содержания воздуха в массе до 2 % увеличивается время обезвоживания в 2,5 раза, пористость бумаги – в 2 раза, разрывная длина уменьшается на 15 %, гладкость – на 20 %, а прочность при сухости 12,6 на 40 %. И наоборот, при деаэрации бумажной массы снижается пенообразование, уменьшается флокуляция, улучшается структура бумажного полотна, увеличивается его влагопрочность, уменьшается обрывность на машине, увеличивается скорость обезвоживания, снижается расход пара на сушку, улучшаются характеристики насосов, что в совокупности позволяет увеличивать скорость машины на 10-15 %, т.е. создаются условия для устойчивой стабильной работы бумагоделательной машины [2].

Установлено, что воздух содержится в бумажной массе в объёме 1-5 %. Воздух, находящийся в массе, можно разделить на свободный, связанный и растворенный. Свободный воздух вызывает пенообразование, способствует

образованию слизи и оседанию смолы; он находится в массе в виде пузырьков и легко удаляется. Связанный воздух оседает внутри и на поверхности волокон и вызывает расслоение массы. Он может занимать до 25 % объёма волокна и более. Удаление этого воздуха из массы возможно только под действием вакуума. Растворенный воздух, содержащийся в массе в виде молекулярного растворенного газа (около 0,5 %), является потенциальным источником связанного воздуха. В то же время нерастворенные газы даже при очень низких содержаниях существенно увеличивают сжимаемость среды.

В работе [2] описаны пути попадания воздуха в бумажную массу и механизм образования пены. Значительное количество воздуха попадает в бумажную массу со свободной падающей струёй из подвешенного трубопровода, который должен быть ниже уровня массы. Воздух может попадать в бумажную массу через задвижки, уплотнения технологического оборудования, находящегося под вакуумом. В трубопроводах, подающих массу к насосу, следует избегать зон, в которых скапливается воздух. Всасывающий патрубок насоса должен быть установлен в месте наиболее спокойного течения массы, а для исключения попадания воздуха в насос при небольшом уровне бумажной массы в бассейне патрубков должен быть изогнутым.

Постоянное присутствие воздуха в вертикальном трубопроводе может обуславливаться слишком высоко установленной задвижкой, так как ниже задвижки образуется “водопад”. В некоторых случаях попадание воздуха в массопроводящую систему происходит через бак постоянного напора из-за небольшой высоты перегородок. Для обеспечения естественной деаэрации оборотной воды скорость потока к подсеточной яме должна быть не более 0,15 м/с.

Рассматриваются различные способы деаэрации, в том числе механический и физико-химический. Особое внимание уделено химической деаэрации, основанной на введении в массу углеводов,

модифицированных полярными группами, при добавках 0,04 – 0,07 % за 3-6 раз. Наилучшие результаты дает комбинированный способ с применением вакуум-систем и химических реагентов.

Частичная деаэрация массы происходит в вихревых очистителях. Специальные аппараты для деаэрации бумажной массы (декуляторы) имеют вакуум-камеру. Масса впрыскивается через сопла в резервуар при повышающемся вакууме вплоть до точки кипения массы. Этим способом удаляется весь свободный воздух, но часть связанного остается в массе. Следующим этапом развития деаэратора являлась установка вихревых очистителей под резервуаром декулятора, что позволило подавать в декулятор массу с повышенным содержанием воздуха.

Очистители “Форжект” создают более благоприятные условия для удаления воздуха из массы, так как имеют удлиненную, по сравнению с коническими очистителями, цилиндрическую часть, в которой масса удерживается дольше; эффективность удаления воздуха – 88,5 – 95 %.

Наиболее эффективным устройством для удаления воздуха из бумажной массы является деаэратор “Энсовак”, в котором суспензия поступает в камеру с отрицательным давлением и рассеивается, выделяющийся при этом воздух откачивается вакуумным насосом, а деаэрированная масса поступает далее в систему массоподачи (рис.2.13).

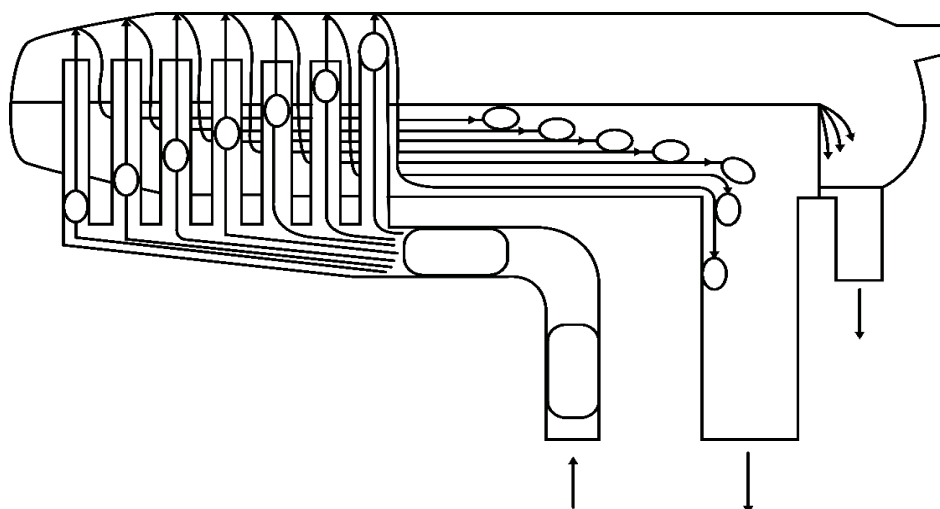


Рис.2.13. Схема удаления воздуха из бумажной массы в деаэраторе «Энсовак»

Наряду с удалением воздуха положительный эффект этого аппарата заключается в снижении пульсаций концентрации, что также является важным условием производства однородного бумажного полотна.

На рис. 2.14 показана диаграмма, характеризующая эффект выравнивания колебаний концентрации в деаэраторе «Энсовак».

Имеются данные о влиянии воздуха на пульсации давления. Отмечается, что пузырьки воздуха несколько смягчают пульсации. Однако вредное влияние воздуха несоизмеримо больше, так как воздух накапливается в различных карманах трубопроводов и оборудования и при отрыве части накопившегося объёма создаёт неустановившиеся пульсации в системе, а также является причиной дефектов в бумажном полотне.

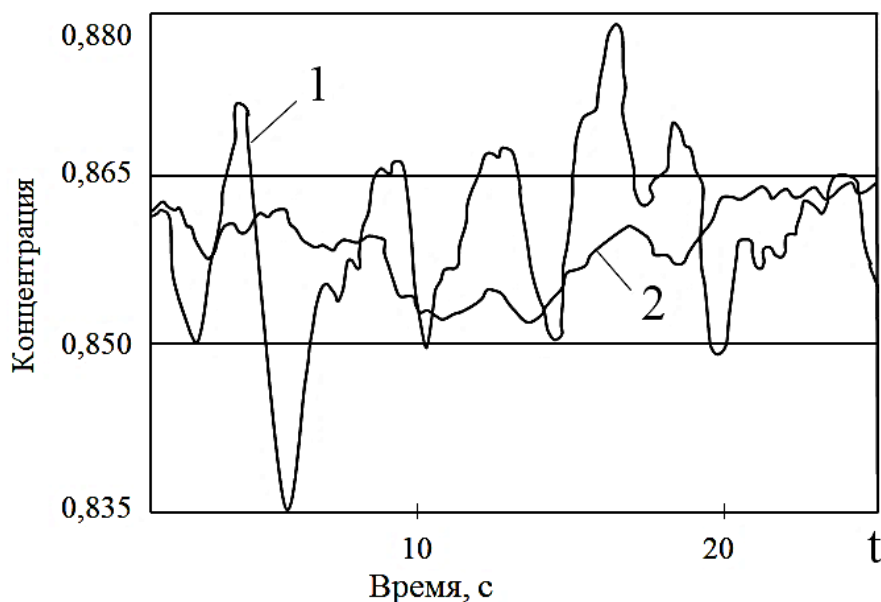


Рис. 2.14. Изменение колебаний концентрации: 1 – на входе; 2 – на выходе

2.3.4. Гидродинамические сортировки

Сортировки с гидродинамическими лопастями, так же как и смесительные насосы, необходимо рассматривать в качестве основных источников пульсационных возмущений в массоподводящих системах бумагоделательных машин, так как в самом принципе их работы заложено создание знакопеременных импульсов давления, являющихся их технологической функцией. Причем их отрицательное воздействие, как

правило, значительно больше по сравнению со смесительными насосами. Это объясняется тем, что по схеме массоподвода сортировки устанавливаются непосредственно перед напорным ящиком, что и определяет их значительно большее отрицательное влияние на колебания массы 1 м^2 бумаги [3].

Сортировки гидродинамического типа являются в системе массоподвода высоким гидравлическим сопротивлением, поскольку практически вся бумажная масса проходит через сито с мелкой перфорацией. Создаваемый при этом перепад давления на сите обеспечивает проведение процесса сортирования. Основными факторами в напорных сортировках, способствующими генерированию пульсации давления, являются лопасти ротора и частота вращения. Процесс возникновения пульсаций давления можно представить в виде двух фаз. При вращении лопасти в бумажной массе вблизи внутренней поверхности сита между средней кромкой лопасти и поверхностью сита образуется зона повышенного давления, что обеспечивает прохождение волокон через перфорации сита, а между задней кромкой лопасти и ситом создается зона пониженного давления (разрежения), необходимого для очистки сита. Кроме того, лопасть своей поверхностью частично прерывает поток на отдельных участках. Амплитуда пульсаций давления, возникающая при этом, будет определяться, в основном, перепадом давления на сите. Периодическое чередование зон повышенного и пониженного давления в зазоре между лопастью и ситом создает в потоке волны давления (рис. 2.15). Дискретное воздействие лопастей сортировки на поток бумажной массы вызывает пульсации давления на лопастной частоте. Воздействие лопасти на поток бумажной массы обеспечивает в зазоре между лопастью и ситом, а также в отверстиях перфорации градиент скорости, превышающий критический, что гарантирует диспергированный режим течения.

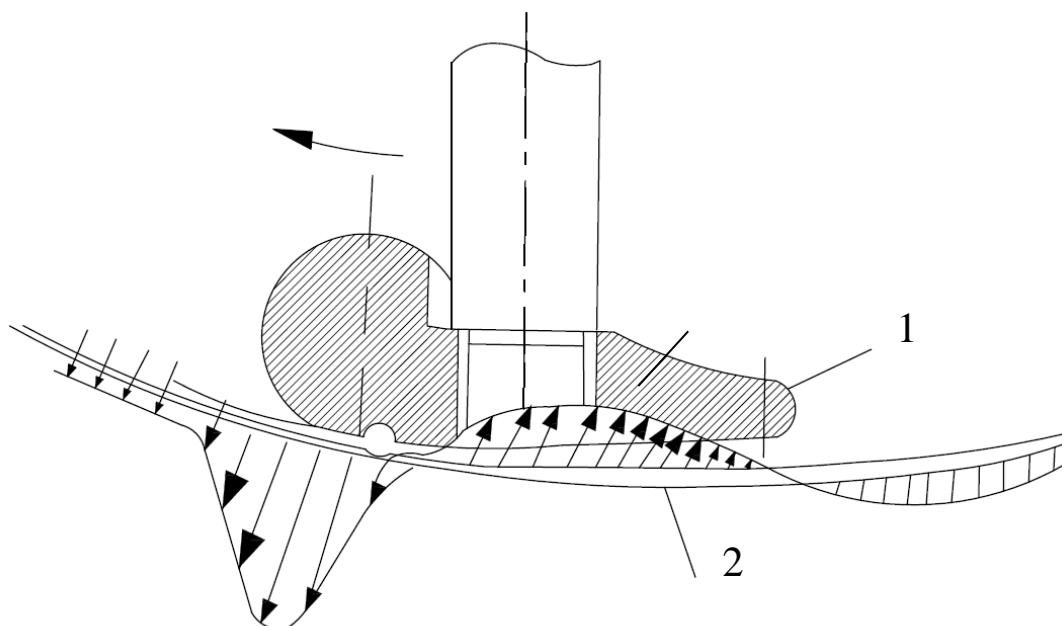


Рис. 2.15. Схема генерирования напорной сортировкой импульсов давления: 1 – лопасть; 2 – сито

В этом случае амплитуда определяется формой лопасти и скоростью вращения ротора. Заметим, что амплитуда импульса разрежения должна превосходить перепад давления на сите для обеспечения процесса очистки. Преобладающей в процессе возникновения пульсаций давления является вторая фаза, когда статический перепад давления на сите под воздействием лопасти преобразуется в динамические импульсы.

Важным аспектом является распространение волн пульсационного давления в рабочей камере напорной сортировки. Длина волны акустических пульсаций давления значительно превосходит габариты кольцевой камеры сортировки. При прохождении потока бумажной массы через сито, являющееся мощным гидравлическим сопротивлением, происходит частичная потеря пульсационной энергии. Акустические волны давления проходят через сито, достигают корпуса, отражаются от него, создавая тем самым волну, распространяющуюся в обратном направлении к сити (рис. 2.16).

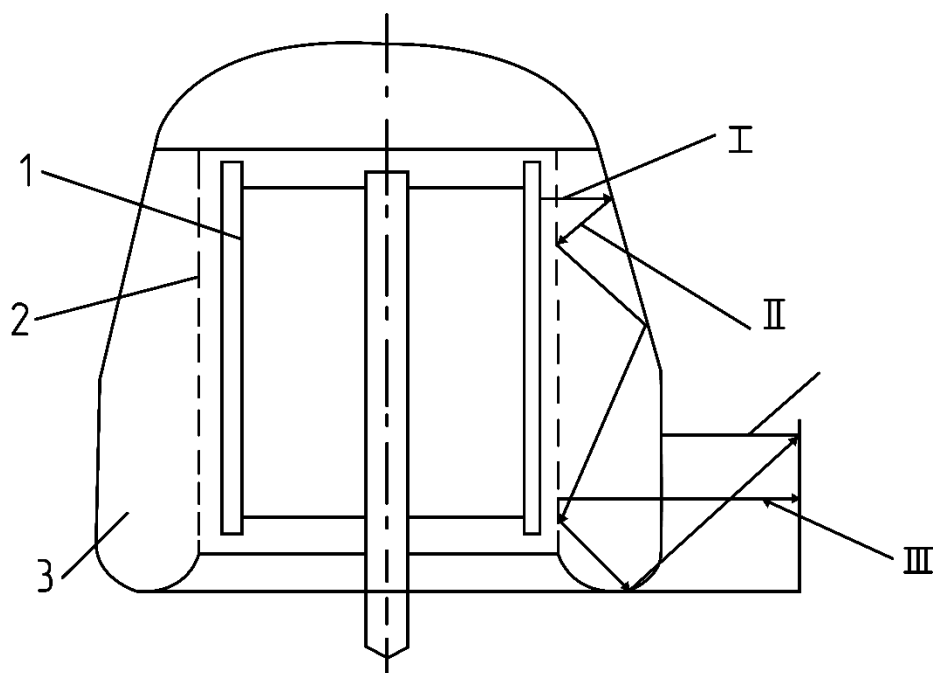


Рис. 2.16. Схема прохождения полных и отраженных волн давления в напорной сортировке: 1 – лопасть; 2 – сито; 3 – корпус; 4 – выходной патрубок; I, III – прямые волны, II – отраженная волна

Для сортировок отрицательное влияние отраженных пульсаций давления может проявиться в ухудшении процесса сортирования. Неоднократно отражаясь от стенок корпуса и от поверхности сита, эти волны создают сложную интерференционную картину, аналогичную гасителям объемного типа, при этом теряют значительную часть своей первоначальной пульсационной энергии и достигают выходного патрубка сортировки ослабленными. Кроме неоднократного отражения акустических волн давления, происходит диссипация пульсационной энергии, вызванная силами трения на стенках кольцевой камеры сортировки внутри потока. Как было показано выше, проходя через сито, поток полностью становится диспергированным, однако поступая в камеру практически мгновенно, происходит рефлокуляция, так как время релаксации для бумажных масс составляет десятые и даже сотые доли секунды. Часть энергии затрачивается на повторную флокуляцию и изменение внутренней структуры потока. Необходимо отметить, что в полости сортировки происходит частичное разделение потока на основной и удаляющийся с отходами сортирования. При этом часть потока, удаляющаяся с отходами, обладает пульсационной

энергией. Однако не эти пульсационные возмущения вносят основной вклад в создание наибольших колебаний массы 1 м^2 бумаги, а так называемые прямые волны давления. Эти пульсации создаются при перекрывании гидравлической лопастью потока участка сита напротив выходного патрубка напорной сортировки. Такие акустические волны давления незначительно ослабляются в рабочей камере напорной сортировки и содержат основную часть пульсационной энергии. Амплитуда этих волн определяется, в основном, перепадом давления в зоне прерывания потока, а частота пульсаций соответствует частоте прерывающего воздействия. Необходимо отметить, что частота вращения ротора напорной сортировки значительно меньше частоты вращения рабочего колеса смесительного насоса, а значит различна и частота прерывания потока. Следовательно, распространяются такие волны пульсаций давления независимо друг от друга со своей частотой и амплитудой, т.е. в данном случае сохраняется принцип суперпозиции при распространении акустических пульсационных возмущений.

Диапазон частот, генерируемых сортировками пульсаций давления, относится к низкочастотной области спектра. Такие пульсационные возмущения оказывают наибольшее влияние на колебания массы 1 м^2 бумажного полотна. Высокочастотные (турбулентные), низкоамплитудные пульсации в меньшей степени оказывают влияние на колебания массы 1 м^2 бумаги. Поэтому одним из способов уменьшения отрицательного влияния низкочастотных пульсаций давления является перераспределение энергии в область высоких частот, для чего могут использоваться различные способы.

В ходе исследований, проведенных Р. Казановой, после установки демпфера в массоподводящей системе, в частотном спектре пульсаций давления был обнаружен пик на частоте 17,5 Гц и установлено, что этот пик обусловлен работой ротора, имеющего 5 вертикальных лопастей. Ротор был заменен цилиндрическим барабаном с 35 лопастями, расположенными по спирали. В результате амплитуда пульсаций давления на частоте 17,5 Гц была снижена почти в 6 раз. После проведения этого мероприятия улучшился

продольный профиль полотна. Пульсационные возмущения зависят от частоты вращения ротора сортировки. Так, с увеличением числа оборотов ротора с 250 до 400 пульсации увеличились более чем в 4 раза. Поэтому не рекомендуется увеличивать частоту вращения ротора более 300 об/мин. Сортировки с тангенциально расположенными патрубками для отвода сортированной бумажной массы исключают возможность прохождения прямых волн пульсаций давления. Импульсы давления на выходе из этих сортировок являются отраженными и несколько уменьшенными. Этим объясняется одно из преимуществ тангенциального отвода бумажной массы по сравнению с радиальным.

На величину импульсов давления оказывает влияние относительное расположение ротора и сит сортировок. Однако конструктивное решение расположения ротора относительно сита не решает проблемы пульсаций давления, поскольку волны пульсаций давления распространяются концентрично во всех направлениях, и речь может идти только о большем или меньшем уровне пульсаций давления в различных типах конструкций напорных сортировок.

Влияние величины зазора между ситом и лопастями также оказывает влияние на интенсивность пульсаций давления. Установлено, что увеличение зазора приводит к снижению уровня пульсационных возмущений. Поэтому при выборе величины зазора между ситом и лопастями необходимо учитывать влияние этого параметра на следующие факторы: необходимость генерирования минимальных амплитуд пульсаций давления, обеспечение очистки сита и создание условия более эффективного сортирования.

Изменение конструкции ротора гидродинамической сортировки может явиться одним из наиболее эффективных методов снижения пульсаций давления. Конструкция ротора, имеющая 35 лопастей, выполненных в виде пластин небольшой длины и расположенных по спирали, как отмечалось выше, позволяет снизить в несколько раз амплитуду импульсов давления (рис. 2.17). Ротор с лопастями, расположенными под углом к образующей

поверхности ротора, создает более низкий уровень пульсаций давления, чем ротор с пряморасположенными лопастями. Наиболее приемлемым вариантом является использование ротора, создающего низкоамплитудные пульсации давления высокой частоты. Такие роторы генерируют высокоинтенсивную турбулентность в зоне сортирования и имеют минимальный зазор между ситом и возмущающими элементами, что способствует эффективной очистке сита. Ротор выполнен в виде цилиндрического барабана с полушаровыми выступами (бобышками) рис. 2.18.

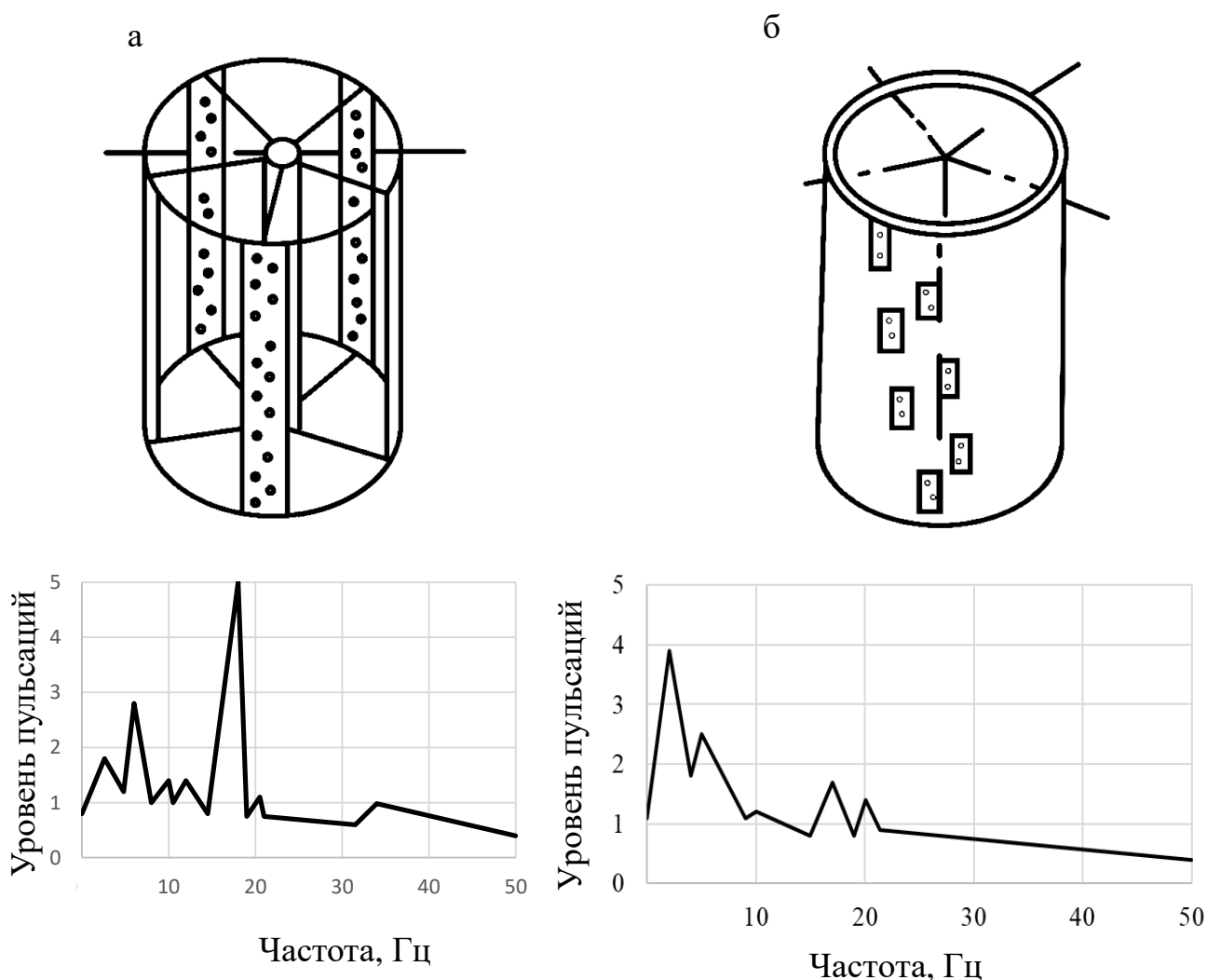


Рис. 2.17. Сопоставление уровня пульсаций давления: а – сортировка с 5 лопастями; б – сортировка с 35 лопастями

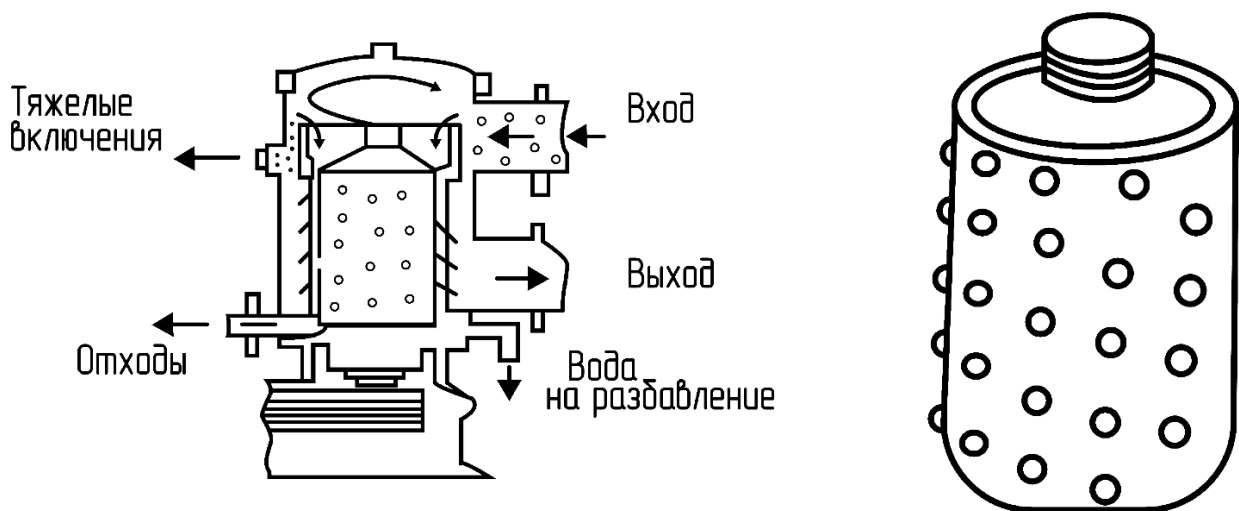


Рис. 2.18. Напорная сортировка с ротором с «бабышками»

Несбалансированный ротор обеспечивает более высокоамплитудные пульсации давления. Немаловажное значение имеет точность изготовления сита и ротора. Так, например, нецилиндричность поверхности сита может быть одной из причин пульсаций давления на выходе сортировки.

Как было указано выше, наличие воздуха в массоподводящей системе оказывает вредное влияние на гидромеханические процессы в массоподводящих системах бумагоделательных машин. Чтобы избежать накопления воздуха и обеспечить его отвод, напорные сортировки могут иметь выпускные патрубки в верхней части корпуса.

Большое значение должно придаваться совместимости работы напорных сортировок с системой массоподвода. При проектировании и эксплуатации сортировок должны учитываться частоты генерируемых импульсов давления и вибрации сортировок, причем эти частоты не должны совпадать (или быть близкими) с частотами пульсаций давления других источников, вынужденными собственными частотами гидравлического оборудования и трубопроводных коммуникаций. Чтобы избежать больших колебаний массы 1 м^2 полотна, частота и величина пульсаций давления напорных сортировок должны соответствовать системе массоподвода. Выбор правильного расположения напорных сортировок в системе предполагается осуществлять путем узлового анализа. Путем выбора частоты пульсаций

давления напорной сортировки достигается правильное фазирование пульсаций.

В системе массоподачи, если расстояние между источником пульсаций давления и передней стенкой напорного ящика кратно или равно половине длины волны, создаваемой импульсом давления, образуется стоячая волна нежелательно высокой величины.

Подтверждение значимости резонанса приведено в работах [1, 2] показано, каким образом можно уменьшить импульсы в линии сортировки за счет применения уравнительного резервуара, поглощающего импульсы. В результате пульсации давления сортировки снижается в 10-12 раз.

Массоподводящие системы современных высокоскоростных бумагоделательных машин содержат несколько напорных сортировок, работающих одновременно. При параллельном расположении сортировок пульсации давления определяются суммарным воздействием каждой сортировки в отдельности. В результате происходит явление интерференции, что может усилить или снизить уровень пульсационных возмущений в зависимости от гидродинамического состояния потоков.

Эффективным способом снижения уровня пульсаций давления непосредственно в напорных сортировках явилась разработка демпфирующего устройства, представляющего перфорированную перегородку со ступенчатыми диффузорами, устанавливаемую в кольцевое пространство между корпусом и ситом сортировки.

Такое устройство, рассчитанное по предложенным теоретическим зависимостям, было установлено в узлоловителе УЗ-14 БДМ-3 Архангельского ЦБК [6, 7]. При этом уровень пульсаций давления на характерных частотах 10,4 Гц и 30,8 Гц уменьшилось в 3,9 раза и в 2,2 раза соответственно. Наряду с анализом изменения спектров пульсаций давления для проверки эффективности работы предложенного устройства проводилось сопоставление колебаний массы 1 м² бумажного полотна. Для этого до и

после установки в узлоловитель демпфирующего устройства с наката были сняты образцы вырабатываемой бумаги.

Так как скорость сетки бумагоделательной машины составляла 240 м/мин, то для сопоставления колебаний массоемкости бумаги, соответствующих измеряемым частотам пульсаций давления, были взяты образцы полотна длиной 8 метров. Такая длина позволяет контролировать минимальную частоту измеряемых пульсаций давления 0,5 Гц. При этом для получения более точных результатов сопоставления колебаний по массе 1 м² из общей ширины были выбраны 3 продольные полосы шириной по 250 мм с каждого образца: по одной полосе с лицевой стороны, из середины и с приводной стороны бумажного полотна. Каждая полоса была разрезана на образцы размером 100 x 250 мм так, что их общее количество в каждой полосе составило 80 образцов.

Такое количество образцов при скорости бумажного полотна 240 м/мин позволяет проводить измерение колебаний массы 1 м² бумаги до максимально определяемой частоты пульсаций давления, равной 40 Гц. После взвешивания всех образцов были получены графики спектров колебаний массы 1 м² бумажного полотна, усредненные по всем полосам бумаги (рис. 2.19).

Из спектров колебаний массы 1 м² видно, что снижение амплитуды происходит во всем рассматриваемом частотном диапазоне. Причем, максимальное снижение происходит на характерных частотах 10,4 и 20,8 Гц и составляет 25 и 56 % соответственно. При этом значительно сужается диапазон отклонений массоемкости от заданного контролируемого параметра.

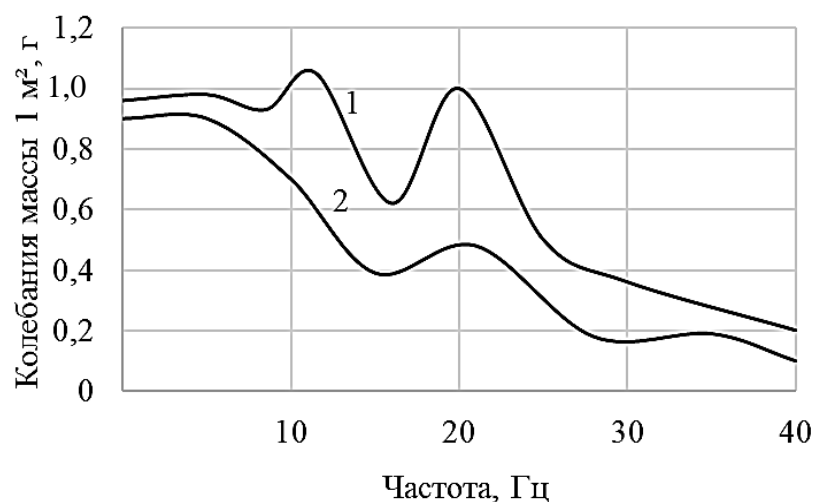


Рис. 2.19. Спектр колебания массы 1 м² бумаги на БДМ-3 Архангельского ЦБК: 1 – без демпфирующего устройства; 2 – с демпфирующим устройством

Снижение пульсаций давления должно осуществляться в следующей последовательности:

- снижение уровней гидравлических пульсаций давления в самых источниках (смесительных насосах, напорных сортировках) за счет конструктивных решений или изменения частоты вибрации;

- в случае неэффективности первого мероприятия целесообразно устанавливать демпферы пульсаций давления, настроенные на диапазоны частот, на которых наблюдаются небольшие уровни пульсационных возмущений в частотных спектрах.

В работе [3] предлагается ряд основных мероприятий по снижению пульсаций давления на выходе из гидродинамических сортировок:

- регулирование частоты пульсаций давления за счет изменения количества возмущающих элементов или увеличения числа оборотов, но не более 300 об/мин;

- устранение прохождения прямых волн пульсаций давления в отводящий патрубок (тангенциальный отвод бумажной массы, введение дополнительных элементов-отражателей и т.п.);

- качественная и своевременная балансировка ротора, высокая точность изготовления ротора и сита;

- правильный выбор величины напора;
- совместимость напорных сортировок с конкретной массоподводящей системой с учетом собственных и вынужденных частот;
- непрерывное удаление воздуха из волокнистой массы.

Таким образом, пульсации давления и гидродинамические процессы, образующиеся в напорных сортировках, а также вибрация напорных сортировок являются одними из основных причин неравномерного распределения массы 1 м^2 бумажного полотна. Колебания массы 1 м^2 бумаги могут быть уменьшены за счет создания в напорных сортировках минимальных пульсаций давления, достаточных для очистки сит сортировок.

2.3.5. Напускные устройства

Напорный ящик является последним звеном в структурной схеме массоподводящих систем. Фактически гидродинамическая картина потока суспензии в щели напорного ящика будет определять качественные показатели бумажного полотна. Напорный ящик – это агрегат, способный исправить структуру полотна волокнистой суспензии непосредственно перед формированием листа на сеточном столе.

Равномерность профиля массы 1 м^2 бумаги по ширине обеспечивается во всех конструкциях напорных ящиков системой потокораспределения. Наиболее совершенные конструкции напорных ящиков представлены в книге [2]. Например, гидравлический напорный ящик фирмы «Альстрем» представлен на рис. 2.20.

При проектировании напорных ящиков фирма «Альстрем» большое внимание уделяет и системе массоподвода. Практически участок массоподводящей системы «гидродинамическая сортировка – напорный ящик» проектируется совместно с целью обеспечения предельно допустимого уровня пульсаций давления, что дает возможность снизить колебания массы 1 м^2 вырабатываемой бумаги.

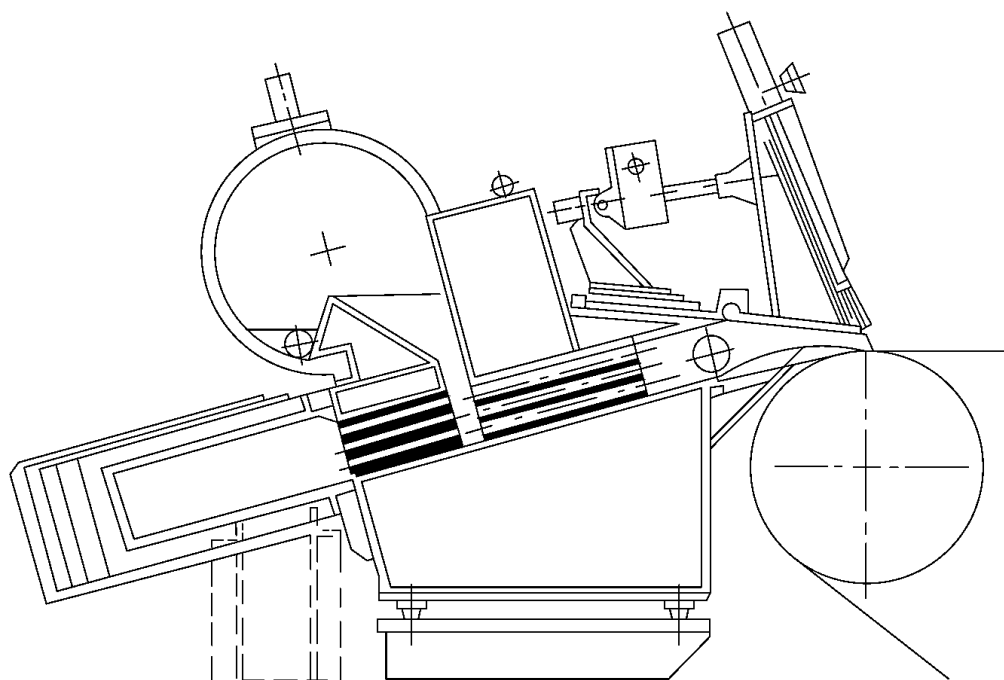


Рис. 2.20. Напорный ящик фирмы “Альстрем”

При установке напорного ящика на действующую бумагоделательную машину, например, при модернизации, необходимо проводить специальные дополнительные мероприятия по определению уровня пульсационных возмущений и их снижению. Главный коллектор представляет собой коническую трубу с круглым входным и квадратным выходным сечением (рис. 2.21).

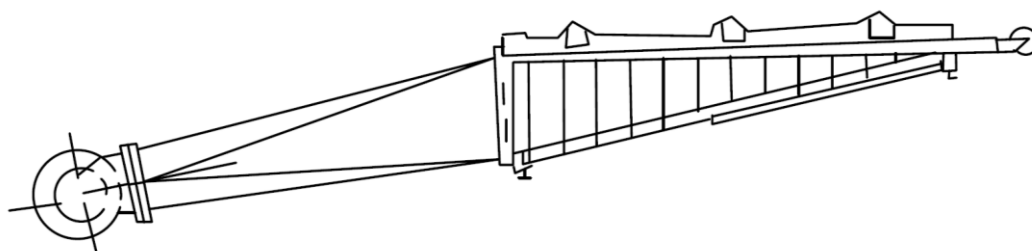


Рис. 2.21. Схема потокораспределителя напорного ящика

Патрубки потокораспределителя являются одноступенчатыми дефлокуляторами. Возникающая в них микротурбулентность потока бумажной массы передается и в генератор турбулентности. Конструкция ступенчатого дефлокулятора и генератора турбулентности показана на рис. 2.22.

Пространство на расстоянии l представляет собой устройство для демпфирования пульсаций давления. Из рис. 2.20 видно, что в данном случае

используется система перелива бумажной массы. Особенностью конструкции является точное соблюдение в конструкции расстояния l и уменьшение объема смесительной камеры.

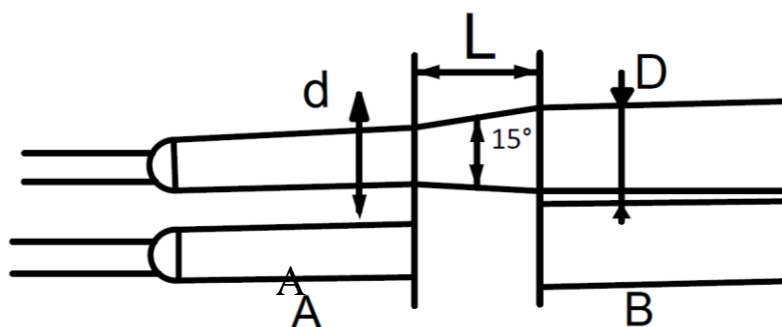


Рис. 2.22. Конструкция ступенчатого дефлокулятора напорного ящика

На рис 2.22 показано, что блоки труб в зонах А и В соосны, и поток суспензии из выходного отверстия в зоне А поступает в зону В, где диаметр трубы больше, чем диаметр трубы в зоне А. При этом данная конструкция работает подобно эжектору, и давление в зоне l , т.е. в смесительной камере, несколько снижается. Благодаря этой системе улучшается диспергирование бумажной массы, достаточно точно осуществляется регулирование давления и эффективно гасятся пульсационные возмущения в потоке. Низкочастотные пульсации давления на выходе напорного ящика в 35 раз меньше, чем на входе (рис. 2.23).

Последние результаты фирмы позволили рекомендовать изменение зоны В одноступенчатый дефлокулятор, причем входной диаметр трубы в зоне В больше выходного диаметра в зоне А, на выходе в зоне В имеет квадратное сотовое сечение.

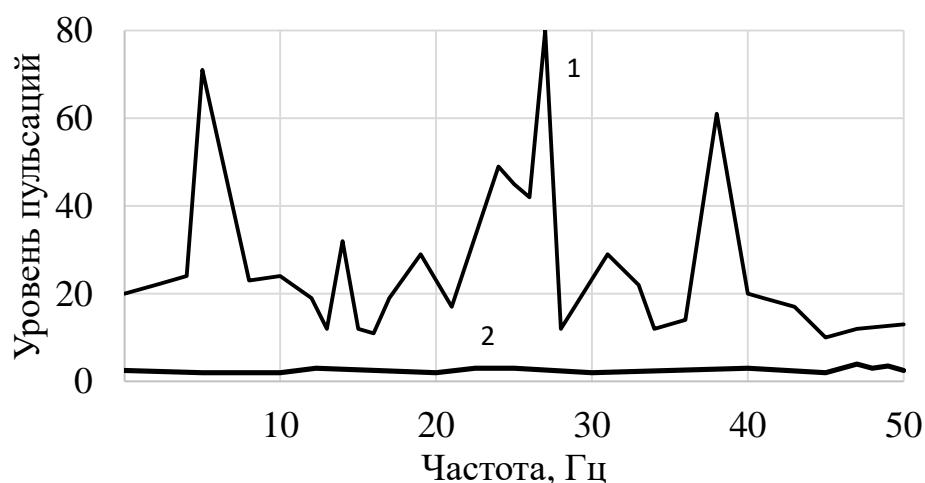


Рис. 2.23. Сопоставление уровня пульсаций давления на входе в потокораспределитель и в напускной щели напорного ящика: 1 – в потокораспределителе; 2 – в напускной щели

Для избежания теплового расширения корпуса напорного ящика, что в конечном итоге оказывает влияние на стабильность условий напуска бумажной массы, его изготавливают таким образом, что все наиболее важные его участки имеют одинаковую температуру с суспензией.

Таким образом, напорный ящик является универсальным гидравлическим аппаратом, определяющим внешнюю структуру потока бумажной массы при напуске и, как следствие, оказывающий значительное влияние на формирование качественных показателей готовой продукции. Однако, кроме рассмотренных пульсационных процессов в полости напорного ящика, организация потока бумажной массы в его проточных каналах включает равномерное распределение концентрации, соотношение скорости напуска и скорости сетки, а также ряд других факторов, которые в совокупности с пульсационными процессами и будут определять качество напуска бумажной массы на сеточный стол. Эффективность работы напорного ящика с позиции протекания в нем пульсационных процессов будет определяться возможностью перераспределения энергии пульсаций из низкочастотной в высокочастотную область спектра. Необходимо отметить, что отрицательное воздействие низкочастотных пульсаций будет сохраняться при любой конструкции напорного ящика, однако влияние этих возмущений на колебание массоемкости бумаги определяется доминирующим

соотношением пульсаций давления различной частоты в спектре при напуске. Анализ работы напорных ящиков показывает, что значение градиента скорости всегда превосходит их критические значения, что обеспечивает диспергированный режим течения суспензии при напуске, а увеличение уровня пульсаций давления обуславливается только их генератором в системе массоподвода. У напорных ящиков, имеющих обычную конструкцию, с увеличением градиента скорости уровни пульсаций возрастают значительно медленнее, чем в напорных ящиках гидродинамического типа, имеющих большее гидравлическое сопротивление, т.е. большой перепад давления, что еще раз подтверждает влияние величины перепада давления на уровень пульсационных возмущений.

Большое гидравлическое сопротивление напорного ящика определяет высокую способность отражения акустических пульсаций давления, причем в наибольшей степени от напускной щели, где происходит падение давления до атмосферного. В связи с этим в напорных ящиках, имеющих протяженную конструкцию и высокую скорость напуска, создаются предпосылки для возникновения суммарных пульсаций давления большой амплитуды.

2.3.6. Трубопроводные коммуникации

Все гидравлические аппараты массоподводящей системы соединяются в единое целое с помощью системы трубопроводов, образуя тем самым динамическую систему. Компоновка массоподводящих систем осуществляется, как правило, непосредственно на предприятиях “по месту”. Трубопроводные системы являются, в основном, проводниками пульсаций давления и механических вибраций, но при неправильной трассировке сами могут являться источниками значительных возмущений.

При проектировании трубопроводов следует учитывать следующие правила:

- избегать частых изменений скорости потока;

- избегать Т-образных соединений, заменять их на У-образные;
- избегать коротких колен;
- тщательно собирать фланцевые соединения;
- устанавливать задвижку после насоса на прямом участке трубопровода.

2.3.7. Анализ методов демпфирования пульсаций давления

Внутреннее состояние структуры потока может оказывать влияние на внешние гидродинамические процессы, воздействующие на суспензию при ее движении. Так, в диспергированном потоке ориентированные волокна частично гасят поперечные пульсации воды, тем самым подавляя турбулентные явления, характерные для чистой воды. При этом можно предположить, что состояние структуры будет оказывать влияние и на внешние турбулентности и пульсации давления, в частности, на продольные пульсации.

С помощью правильно разработанного гасителя можно значительно уменьшить пульсации давления путем воздействия на их низкочастотную область. Предлагается следующий путь демпфирования пульсаций давления в массопроводящих системах.

- ослабление пульсационных возмущений непосредственно в источнике их возникновения;
- подбор демпфера пульсаций давления, настроенный на диапазон частот, на котором преобладают максимальные амплитуды.

В качестве одного из наиболее эффективных методов снижения пульсаций давления в источниках рекомендуется усовершенствование конструкций оборудования.

Использование демпферов пульсаций связано с потерями давления, однако выигрыш в давлении и мощности от снижения пульсационных возмущений значительно выше, чем при потере от дополнительного гидравлического сопротивления. Основными принципами конструирования

гасителей являются высокая степень гашения, малые габариты, простота изготовления и эксплуатации, долговечность.

Работа гасителей пульсаций давления основана на следующих принципах:

- рассеивание энергии пульсаций – введение гидравлических сопротивлений (лабиринт, решетка, перфорированная плита, отражатель);
- демпфирование – преобразование энергии пульсаций давления в другой вид энергии (например, тепло);
- интерференция – наложение двух колебаний одной частоты в противофазе.

Основные конструкции и характеристики наиболее часто применяемых гасителей приведены в работе [2]. Ниже представлены дополнительные сведения для конструирования и выбора гасителей.

В абсорбционном гасителе пульсаций давления переходят в тепло, основную роль при этом играют материалы пористого типа. Эффективное поглощение происходит в высокочастотной области, поэтому он непригоден для массоподводящих систем.

Действие гасителя отражения основано на отражении волн давления в результате образования так называемой волновой пробки, затрудняющей прохождение возмущений на некоторых частотах вследствие влияния упругости массы. Таким образом, энергия пульсаций давления изолируется в емкости и не пропускается в отводящий трубопровод. Этот гаситель обеспечивает высокое уменьшение амплитуды пульсаций в широкой полосе частот. Принцип работы гидропневматических гасителей основан на переходе энергии пульсаций в работу сжатия, кроме того, имеет место отражение. Эти гасители эффективно работают в области низких частот.

Перечисленные выше основные типы гасителей постоянно совершенствуются, создаются новые типы.

В табл. 2.2 обобщены характеристики основных типов гасителей, указаны частотные диапазоны гашения и коэффициенты ослабления K . Ниже

указаны особенности работы различных гасителей, их преимущества (+) и недостатки (-):

- адсорбционные: (+) – широкая полоса частот гашения; (-) – небольшой коэффициент ослабления, трудности в технологии волокна;
- отражатель: (+) – широкая полоса гашения, высокий коэффициент ослабления;
- интерференционный: (-) – затруднена регулировка частоты, зависит от содержания воздуха, температуры и давления; (+) – высокий коэффициент гашения;
- гидропневматический: (+) – широкая полоса гашения, высокий коэффициент ослабления, нет регенераций возмущений, нет осадков, рассеивания энергии струи в перфоплите облегчают поворот потока;
- в гасителях с воздушной подушкой возможно попадание воздуха в массу;
- при установке резной муфты перед напорным ящиком возможно отложение массы на ее стенках.

Меры по снижению пульсаций давления необходимо принимать только после исследований, так как возможно совпадение собственной частоты с частотой другого источника или резонансной частотой системы. В случае неустойчивости напорного ящика к воздействию определенных частот их гашения малоэффективны, поскольку усиление при резонансе значительно. В этом случае необходимо изменить собственную частоту системы.

Таблица 2.2. Характеристика гасителей пульсаций давления

Частота, Гц	1	10	100
Адсорбционный	К до 10		
Отражатель	К до 20		
Интерференционный			К до 20
Комбинированный интерференционный с воздушной подушкой	К до 20		
Гидропневматический с перфоплитой	К до 50		
Радиклон – 40 с кольцевой диафрагмой	К до 12		

Существует возможность уменьшения вибрации напорного ящика изолированием его от перекрытия и трубопроводной системы с помощью виброгасителя. После этих мероприятий пульсации снизились почти полностью, а вибрации – на 70 %. Для гашения вибраций напорного ящика используется система из трех динамических гасителей:

- у коллектора, в задней части напорного ящика, для устранения колебаний в машинном направлении;
- сверху потокораспределителя – от вертикальных колебаний;
- у напускной щели – от колебаний в продольном направлении.

При возникновении колебаний массы 1 м^2 гасители настраиваются на любую частоту.

Развитие и совершенствование средств гашения приводит к созданию комбинированных гасителей, сочетающих в себе разные принципы гашения. Некоторое сглаживание колебаний массы 1 м^2 получено при двухсеточном и круглосеточном формовании.

Для каждой массоподводящей системы необходимо создание индивидуальной комплексной системы организационно-технических мероприятий для контроля и гашения различных возмущений, возникающих в данной системе, включая автоматизированный контроль и обратную связь для управления колебаниями массы 1 м^2 бумажного полотна.

Считается, что предсказать характеристику пульсаций можно только для простых систем, состоящих из одного источника пульсаций и одного гидравлического сопротивления.

Необходимо отметить, что снижение пульсаций давления непосредственно в источнике их возникновения является более экономичным и эффективным, так как в массоподводящих системах, как правило, существует несколько генераторов, а гаситель пульсаций может быть настроен на достаточно узкий диапазон частот. Кроме того, минимальный уровень пульсаций давления позволяет снизить затраты мощности в процессе нагнетания и повысить производительность.

Дальнейшее развитие массопроводящих систем включает совершенствование как отдельных элементов, так и всей системы в целом, в том числе создание принципиально новых систем массопередачи.

Современные методы исследований неравномерности бумажного полотна позволяют оценить качество формования на микроуровне благодаря инновационным технологиям получения поперечных срезов высокого качества и анализе распределения волокон. Пульсации давления и особенности реологических характеристик волокнистой суспензии влияют на микроструктуру волокнистого каркаса конечного продукта (бумаги и картона).

3. ОЦЕНКА НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЛОКОН В БУМАГЕ ИЛИ КАРТОНЕ, ВЫЗВАННОЙ ПУЛЬСАЦИЯМИ ДАВЛЕНИЙ И ОСОБЕННОСТЬЮ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ БУМАЖНОЙ МАССЫ

3.1. Способ подготовки поперечного среза методом ионной резки

Для оценки воздействия пульсаций давлений и реологической особенности бумажной массы на исходный продукт необходимо исследовать микроструктуру, которая должна позволить установить равномерность распределения волокон в бумаге и картоне. Если массоподготовительный отдел и бумагоделательная машина генерируют пульсации давлений на низких частотах или существуют проблемы в оборудовании, то это отразится на микроструктуре бумаги.

Существующие методы микроскопического анализа позволяют увидеть структуру волокна только на поверхности картона. Сложнее исследовать поперечный срез картона, так как волокна при воздействии ножевого инструмента деформируются и меняют форму [4].

Использование метода ионной резки бумаги картона для получения поперечного среза позволило сохранить расположение волокон, фибрилл, наполнителя. И этот метод исключил негативное влияние ножевого

режущего инструмента, что позволило сохранить реальную картину взаимного расположения волокон, наполнителя и фибрилл в поперечном срезе. С помощью современного электронного микроскопа получены в электронном формате панорамные снимки и карта распределения химических элементов.

Предлагаемый метод поясняется схемой, на которой (рис. 3.1) показана последовательность выполнения стадий подготовки поперечного среза для контроля параметров двухслойного тест-лайнера с белым покровным слоем. Согласно предлагаемому методу образцы тест-лайнера подготавливают в лаборатории или берут с производственной линии. Стадию подготовки образцов 1 с заданными свойствами реализуют согласно существующим стандартам получения отливок в лаборатории или техническим условиям, разработанным на предприятии. Затем образец устанавливают в устройство для ионной резки на стадии подготовки поперечного среза 2. Ионную резку картона производят ионной пушкой с подачей напряжения в 8-10 кВ, что соответствует энергии резки ионами в 8-10 кэВ, при продолжительности резки от 1 до 2 ч в зависимости от толщины картона от 50 до 250 мкм.

Подготовленный поперечный срез картона визуализируется с помощью сканирующего электронного микроскопа на стадиях 3, 4. На стадии 3 получают изображение поперечного среза, включая карту элементного состава, которую получают с помощью детектора отражённых электронов.

На стадии 4 с помощью программного продукта, позволяющего соединять несколько изображений протяженностью от 100 до 150 мкм, подготавливают панорамные снимки поперечного среза от 1 до 10 мм. Стадии 3, 4 имеют важное значение для дальнейшего преобразования микроскопических снимков на следующей стадии.

Графическое преобразование изображений на стадии 5 осуществляют с помощью программ, которые благодаря настройкам оттенков черного, белого и серого цветов повышают контрастность изображений. На стадии 6

графически преобразованное изображение поперечного среза оценивается с помощью расчётных программных продуктов. Например, с помощью графических программ на стадии 6 наносят профили нижней и верхней поверхностей в поперечном срезе и по ним оценивают шероховатость 7.

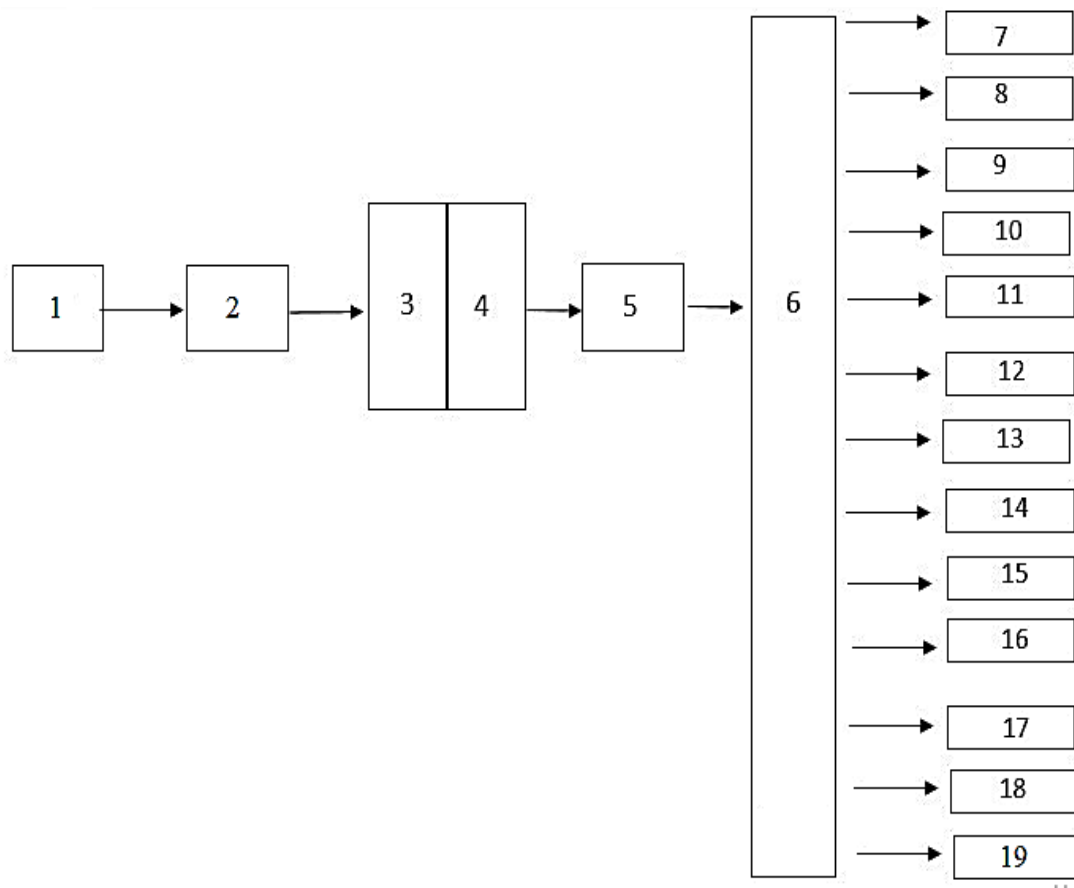


Рис.3.1. Последовательность выполнения стадий подготовки поперечного среза для оценки параметров двухслойного тест-лайнера с белым покровным слоем

Границу между слоями наносят, ориентируясь на различие в природе волокна или наличию примесей, которые были зафиксированы на карте распределения элементного состава на стадии 3. Затем находят распределение толщины слоёв по размерам на стадии 8 и по ним устанавливают равномерность распределения толщины слоёв. На стадии 9 рассчитывают протяжённость линий контакта и степень их однородности 10. Подобное преобразование выполняют при определении протяжённости контакта внутренних стенок волокон 11 и определяют их равномерность

распределения по поперечному срезу 12. С помощью графических преобразований получают изображение области поперечных срезов волокон, по их площади оценивают плотность волокнистого материала 13, а по их распределению оценивают равномерность формования слоёв 14.

По площади, занимаемой пустотами, оценивают пористость целлюлозосодержащего материала 15 и её равномерность распределения по размерам 16. Срезы волокон фибрилл и пор, которые отличаются по цвету на карте распределения по содержанию углерода и кислорода от наполнителя (мела). По площади области, которую занимают фибриллы, оценивают фибрилляцию 17, а по площади, которую занимает кальций, соответствующий определённому цвету на карте распределения элементного состава, оценивают содержание мела 18 и его однородность распределения в поперечном сечении 19. Панорамные снимки поперечного среза картона, полученные методом ионной резки и соединением в графических программах, дают возможность использовать современные аналитические программы для количественного определения факторов, определяющих физико-механические характеристики картона. Этот метод на сегодня является принципиально новым и не имеющим аналогов в исследовании микроструктуры многослойного картона. В качестве примера оценки метода приводится поперечный срез двухслойного картона тест-лайнера, полученного с помощью различных способов подготовки макулатуры (сухого, мокрого и комбинированного).

Достоинством метода ионной резки образцов является высокое качество изображения поперечного среза картона (рис.3.2). В отличие от поперечного среза многослойного картона, полученного ножевым инструментом (см. рис.3.2 А), срез, полученный ионной резкой, позволяет определить области среза волокон, границу слоёв (см. рис.3.2 Б).

Волокнистый материал является основным сырьём для целлюлозно-бумажной промышленности. Особенности микроструктуры волокон объясняют многие физические явления, характерные для волокнистого

материала. Например, плотность заполнения волокон в материале и равномерность их распределения оказывают основное влияние на механические показатели наряду с прочностью, которая зависит от природы материала.

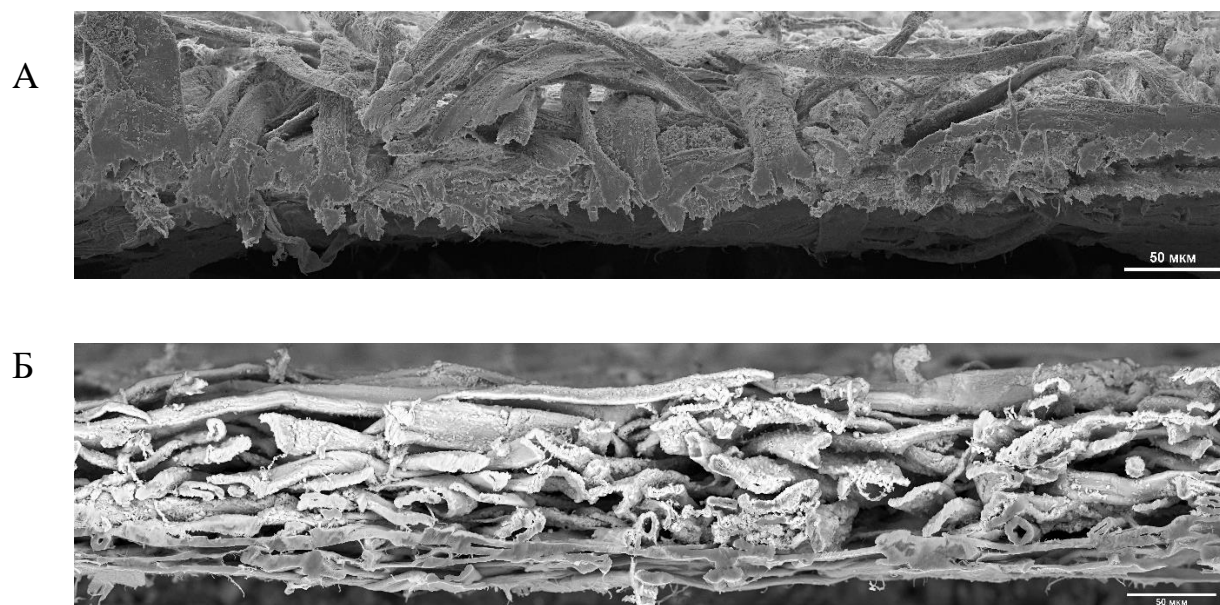


Рис.3.2. Изображения поперечных срезов образцов картона, полученные с помощью электронного микроскопа: А – сечение, полученное с помощью ножа; Б – срез, полученный ионной резкой

С развитием цифровых технологий появились новые инновационные методы, которые успешно апробированы в военной, металлургической промышленности при исследовании свойств материалов специального назначения [5]. Адаптация этих методов, например технологии ионной резки, для исследования микроструктуры волокон позволяет получить новые научные знания в изучении физико-механических свойств волокнистых материалов. Метод ионной резки требует существенных корректировок при переходе от исследования твёрдых материалов (металлов, минералов) к волокнистым материалам, полученным из растительного сырья. Поэтому определение оптимальных режимов ионной резки волокнистого материала стало одной из задач исследования авторов.

Технология ионной резки в совокупности с электронной микроскопией, включающей блок отражённых электронов BSE и программу обработки цифрового снимка, позволяет получить качественное изображение поперечного среза, которое можно оценивать и обрабатывать графическими и расчётными программами, что позволяет по-новому оценить физические явления, определяющие механические показатели материала. Обработка изображения поперечного среза может осуществляться с помощью графических программ. В связи с этим ещё одной важной задачей исследования является обработка поперечного среза современными программами, позволяющими оценить поперечный срез, установив количественные показатели, определяющие механические свойства волокнистого материала. В качестве инструмента для обработки поперечного среза были выбраны программы AutoCAD и IpSquare v5.0 for Windows. Решение двух вышеупомянутых задач позволило получить новые знания в области оценки механических свойств волокнистых материалов.

3.2. Оптимизация режимов ионной резки бумаги и картона

Метод ионной резки, который был адаптирован для получения поперечного среза двухслойного волокнистого материала к электронной микроскопии, является ключевым инструментом научных исследований. Ионная резка образцов производилась с помощью установки Technoorg Linda SEMPrep2 (модель SC-2100, Венгрия).

Двухслойный волокнистый материал для исследований был получен по методике, представленной в работах [6,7]. Волокнистая суспензия и параметры изготовления отливок с дальнейшим определением механических показателей готовились по стандартным методам. В качестве образцов были взяты срезы двухслойного волокнистого материала общей массой квадратного метра 60 г. Толщина находилась в диапазоне от 125 до 140 мкм. Соотношение массы квадратного метра покровного и нижнего слоя составляло 50 на 50 %. Содержание минерального наполнителя (мела) в покровном слое, согласно методу определения зольности [8], составило 19 %

от массы абсолютно сухого волокнистого материала, а в нижнем слое не превышало 1 %.

Выбор режимов резки осуществлялся в соответствии с требуемым качеством получаемого поперечного среза. При этом рассматривались разные варианты режимов резки. На рис. 3.3 изображён поперечный срез образца, выполненного скальпелем (режимы травления: время резки 5 мин, энергия резки 0 кэВ, толщина слоя 250 мкм). Плохое качество изображения поперечного среза (см. рис.3.4) не позволяет произвести оценку поверхностных и механических показателей волокнистого материала.

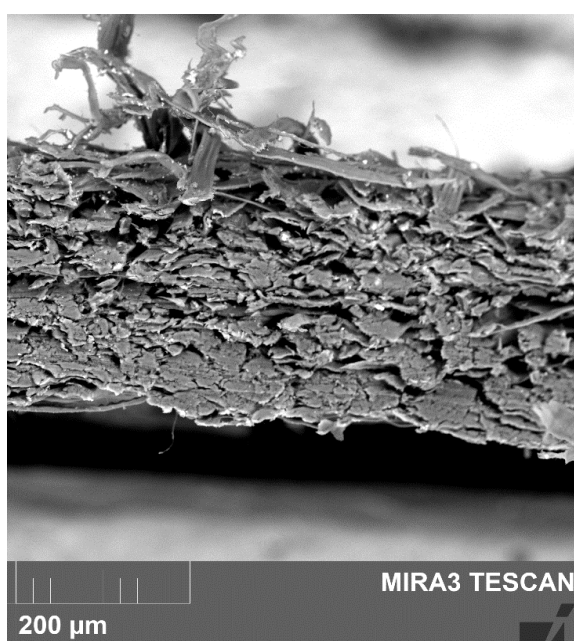


Рис.3.3. Поперечный срез двухслойного волокнистого материала: толщина среза -250 мкм; продолжительность резки – 5 мин; энергия ионного пучка – 0 кэВ

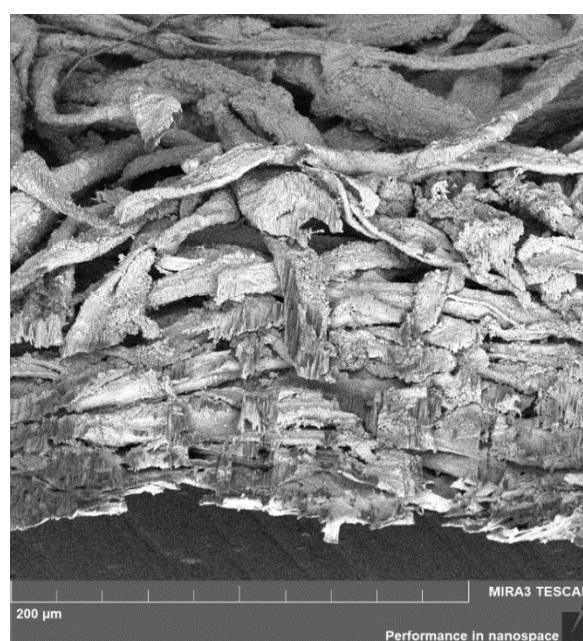


Рис.3.4. Поперечный срез двухслойного волокнистого материала: толщина среза -200 мкм; продолжительность резки – 40 мин; энергия ионного пучка – 15 кэВ

По режиму ионной резки, протестированному на картоне толщиной в 200 мкм в течение 40 мин и с мощностью пучка ионов в 15 кэВ, продемонстрированы основные преимущества этого метода, но тестирование показало, что требуется адаптация режимов резки. Снижение мощности ионного пучка приводит к повышению качества поперечного среза, но при этом необходимо снижать толщину целлюлозосодержащего материала.

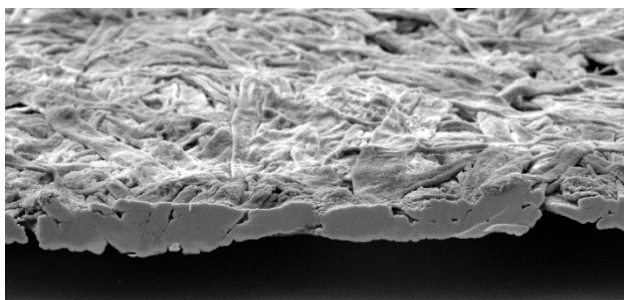


Рис.3.5. Поперечный срез двухслойного картона тест-лайнера: толщина среза -50 мкм; продолжительность резки – 40 мин; энергия ионного пучка – 12 кэВ

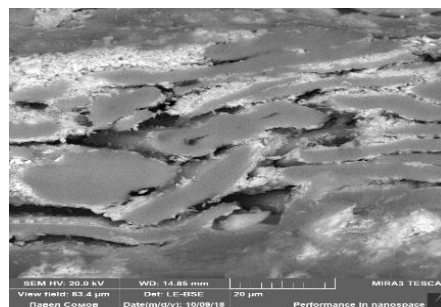


Рис.3.6. Поперечный срез двухслойного картона тест-лайнера: толщина среза -150 мкм; продолжительность резки – 40 мин; энергия ионного пучка – 8 кэВ

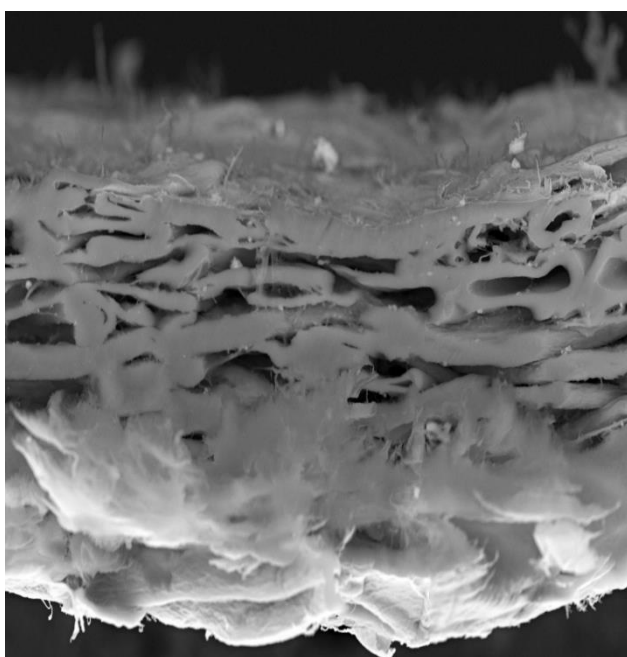


Рис.3.7. Поперечный срез двухслойного волокнистого материала: толщина среза -150 мкм; продолжительность резки – 1 ч; энергия ионного пучка – 8 кэВ

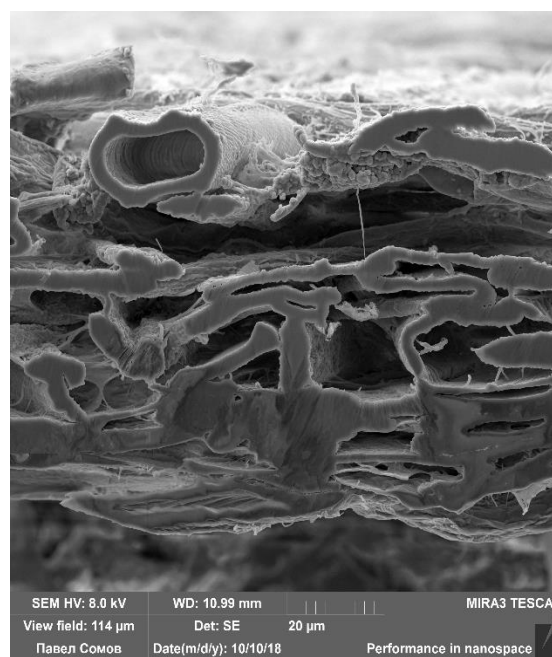


Рис.3.8. Поперечный срез двухслойного волокнистого материала: толщина среза -150 мкм; продолжительность резки – 2 ч; энергия ионного пучка – 8 кэВ

На рис.3.5 представлен вариант снижения мощности ионного пучка до 12 кэВ для резки целлюлозного волокнистого материала толщиной в 50 мкм.

Продолжительность резки при этом не менялась и составляла 40 мин. Дальнейшее увеличение толщины целлюлозного волокнистого материала и снижение мощности ионного пучка привело к тому, что целлюлозный

материал не прорезался до основания (рис.3.6). Однако качество срезанной области было достаточным для графического анализа.

Более продолжительная резка в течение 1 ч тоже не дала положительного результата, оставив области несрезанных волокон (рис.3.7). Требуемое качество поперечного среза было получено при увеличении продолжительности резки до 2 ч (рис.3.8).

3.3. Схематическое изображение процесса ионной резки образца

Подготовленные методом ионной резки образцы напылялись хромом в вакуумной камере. Толщина слоя напыления составляла 30 нм. Этот слой позволил обеспечить отток заряда при дальнейшем изучении образца в электронном микроскопе. Подготовленный образец фиксировался на латунной подложке с помощью двухстороннего углеродного скотча и устанавливался в специальный держатель, разработанный под ионную резку волокнистого материала.

Принципиальная схема процесса ионной резки многослойного картона представлена на рис.3.9. С помощью двухступенчатого диафрагменного и турбомолекулярного насосов в камере достигается необходимый уровень вакуума для ионной резки.

В камере расположены две ионные пушки: одна из которых используется в режиме травления (пушка «высокой» энергии), другая – в режиме полировки (пушка «низкой» энергии). После подачи рабочего газа (аргона), при приложении напряжения между анодом и катодом, происходит ионизация атомов аргона и под воздействием ускоряющего напряжения ионы вылетают из пушки, с соответствующей ускоряющему напряжению энергией и попадают на поверхность образца. Обладая высокой энергией, ионы аргона распыляют материал поверхности. Параметры процесса: время - 1 ч 30 мин, ускоряющее напряжение - 8 кВ (энергия резки ионами 8 кэВ). Светоизлучающий диод используется для имитации потока ионов аргона.

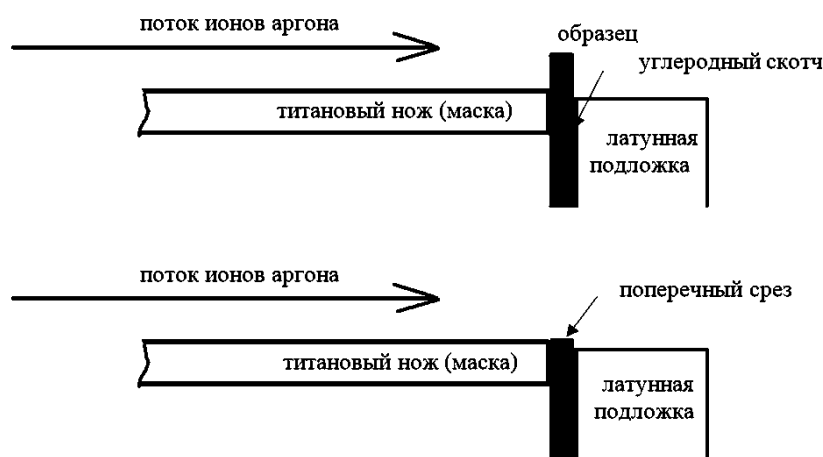


Рис.3.9. Схематическое изображение процесса ионной резки образца

Визуализация поперечных срезов подготовленных образцов производилась с помощью электронного микроскопа TESCAN MIRA3 LMH, производитель – TESCAN (Чешская Республика). Характеристики сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA3 LMH следующие: электронная колонна (FEG SEM) с источником электронов на основе катода Шоттки; ускоряющее напряжение 200 В – 30 кэВ; ток зонда 2 нА – 200 нА; разрешение 1,0 нм (при 30 кэВ), увеличение до 1 000 000; детекторы вторичных электронов (SE, In-Beam SE); детектор отраженных электронов (BSE) [9].

При взаимодействии электронного пучка с поверхностью образца происходит генерация различных ответных сигналов, например, возникновение вторичных электронов, отраженных электронов, тормозного и характеристического рентгеновского излучения, сигнала поглощенного тока и т.д. Для регистрации каждого вида сигнала используются разнообразные детекторы и таким образом исследуются те или иные характеристики образца. Изображение объекта формируется в результате сканирования поверхности образца электронным пучком. Для изучения поперечных срезов картона использовался детектор отраженных электронов (BSE - Back-Scattered Electron), так как в этом случае визуализируется контраст по составу образца.

С помощью электронного микроскопа создаётся изображение поперечного среза образца волокнистого материала. Чтобы определить площади областей среза волокон в верхнем и в нижнем слое, подбиралась необходимая цветовая гамма в графической программе (по оттенку серого, чёрного и белого (от 0 до 100 единиц)). По заданным оттенкам определялась область срезанных волокон для каждого слоя.

3.4. Графическая обработка изображения поперечного среза

Преобразованное изображение поперечного среза волокнистого материала (рис.3.10) в формате «.jpg» загружается в программу IProsoft. Вместе с преобразованным изображением поперечного среза в программу загружается фигура с известными размерами (в данном случае квадрат размерами 50x50 мкм).

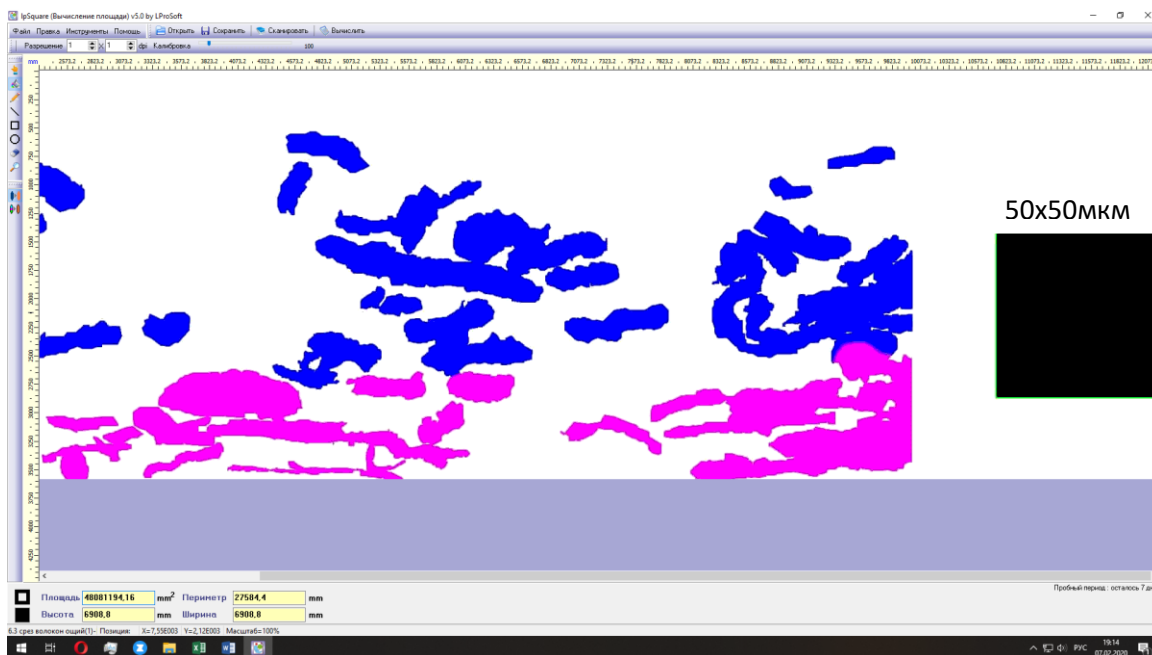


Рис.3.10. Области среза волокон двухслойного материала в программе IProsoft

По черному цвету, соответствующему цвету квадрата, определяется его площадь. Затем выделяются области срезанных волокон и находится их площадь (рис.3.11) с помощью команды «вычислить» (рис.3.12).

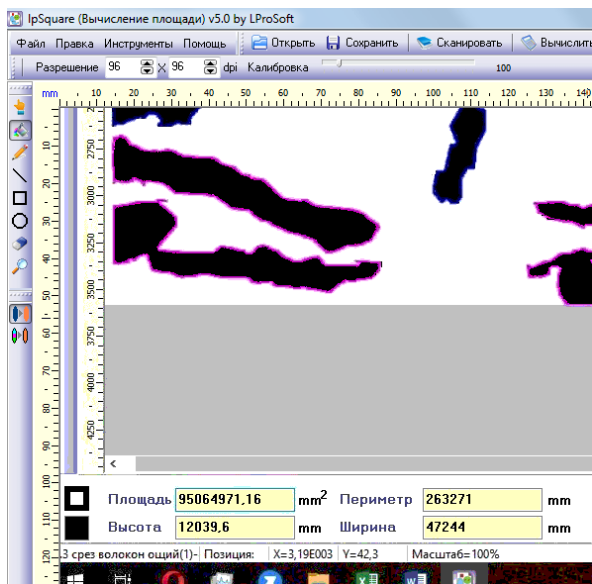


Рис.3.11. Определение площади

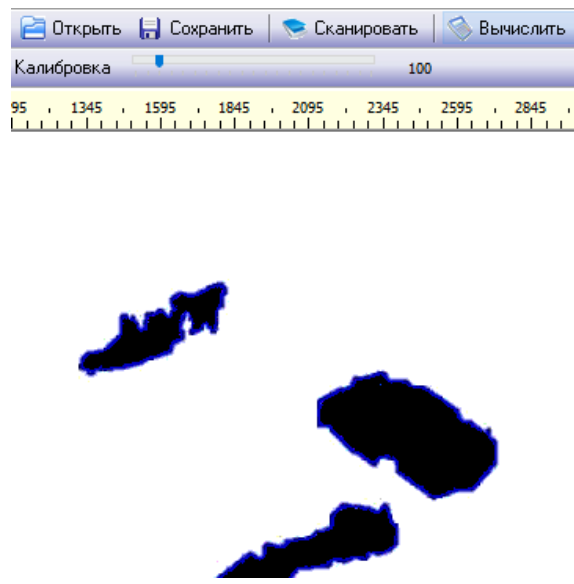


Рис.3.12. Расчет площади, команда «Вычислить»

Данные по площади областей представленные на рис. 3.11 пересчитываются в соответствии с площадью фигуры с известными размерами (составляется пропорция). Преимуществом этой программы в определении площади срезанных волокон является простота.

Недостатком является погрешность в определении площади, связанная с использованием растрового изображения, так как программа определяет только площадь, не оценивая равномерность распределения волокон. Более точные расчеты получаются при обработке векторного изображения. Широкими возможностями по обработке и расчету векторных изображений обладает программа AutoCAD.

В программе AutoCAD создаются контуры среза волокон с помощью команды «полилиния» (рис.3.13), которые впоследствии объединяются в области с помощью команды «область».

В отличие от программы IProsoft AutoCAD даёт возможность оценить равномерность распределения волокон в поперечном срезе. С этой целью определяются центры областей срезов, с помощью команды «МАСС-ХАР». Эта команда определяет координаты точки центра области среза волокна (рис.3.14).

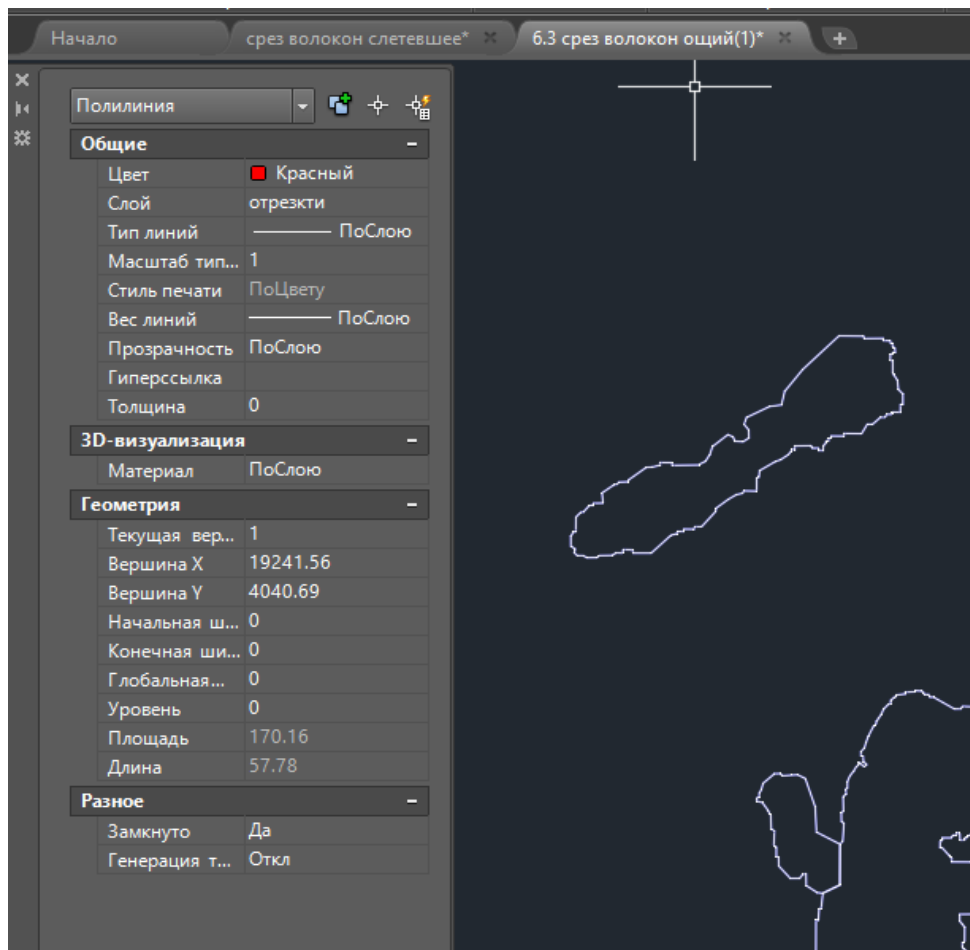


Рис.3.13. Создание контура областей среза волокон

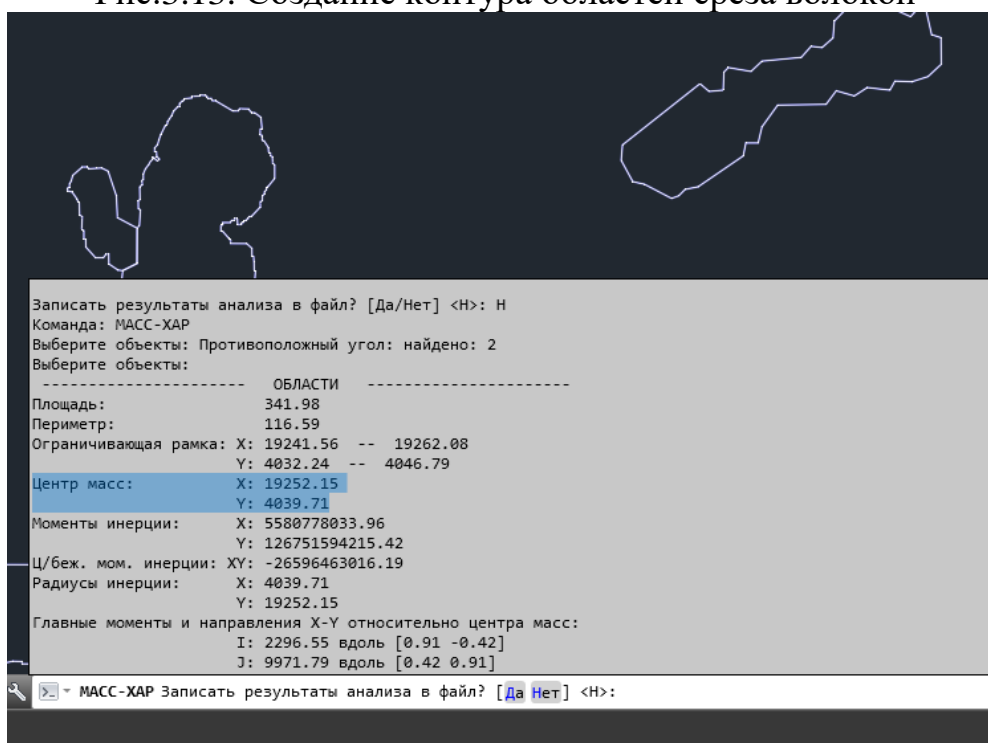


Рис.3.14. Определение центров областей срезов волокна: (X = 19252,15 Y= 4039,71) – координаты точки центра области среза волокна

Координаты точек центров областей среза волокон соединяются отрезками, при этом отрезки не должны пересекаться друг с другом (рис.3.15).

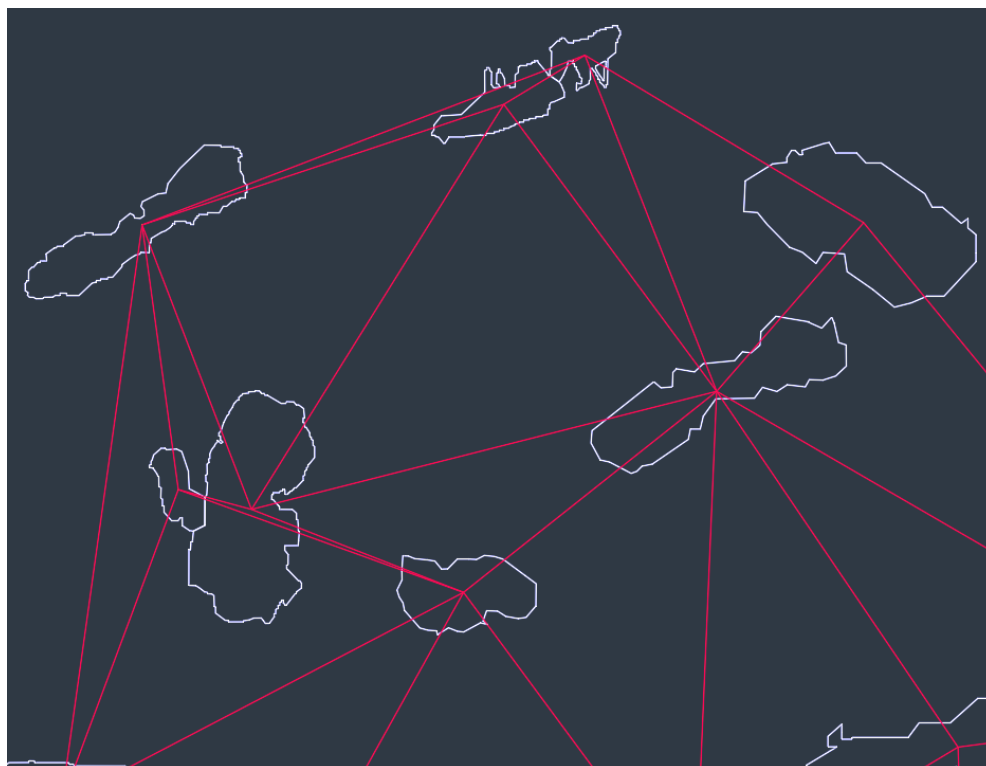


Рис.3.15. Оценка равномерности распределения волокон в поперечном срезе

3.5. Анализ неоднородности распределения волокон в бумаге или картоне

Результатами графической обработки изображений поперечного среза волокнистого материала, являются диаграммы распределения площади среза волокон по размерам (рис.3.16, а) и равномерность распределения волокон по площади поперечного среза картона (рис.3.16, б).

Диаграмма распределения площади среза волокон по размерам показывает количество областей среза волокон и их размеры. По ним косвенно можно судить об ориентации волокон (машинное или поперечное направление), о качестве волокнистого материала, в том числе количестве мелких и крупных волокон.

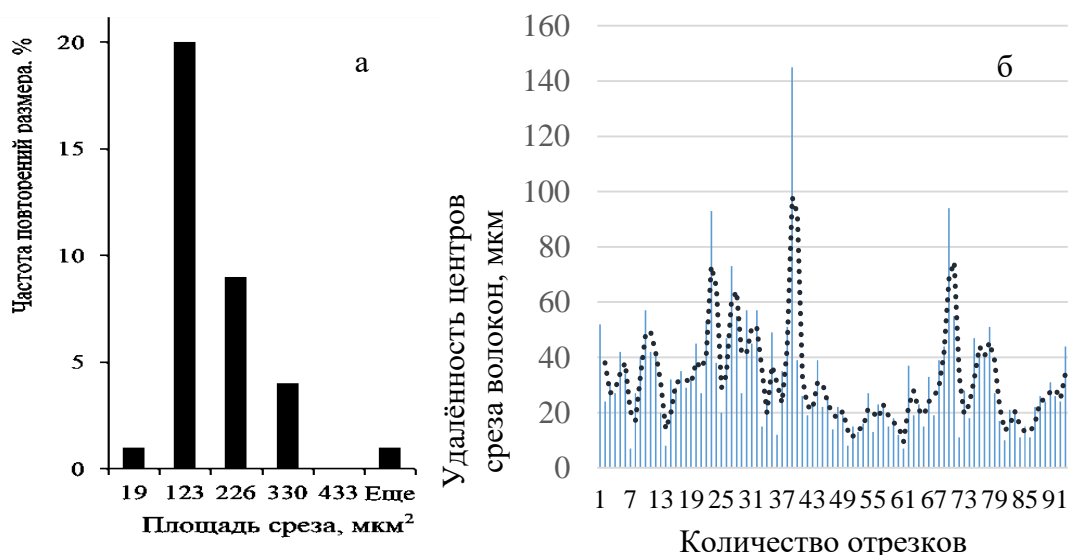


Рис.3.16. Распределение площади среза волокон по размерам (а) и равномерность распределения волокон по площади поперечного среза картона (б)

Чтобы оценить равномерность распределения волокон в поперечном срезе необходимо показать размеры отрезков, определяющих удаленность центров областей среза друг от друга. На рис.3.16, б представлена диаграмма, на которую нанесены отрезки, соединяющие центры областей в поперечном срезе картона. Оценка равномерности распределения по диаграмме рис.3.16, б определяется по трем показателям: максимальное отклонение центров друг от друга (145 микрон); количество отрезков (91 шт. на 350 мкм при приблизительной толщине поперечного среза от 80 до 150 мкм); по средней длине отрезков с максимальным значением.

Установлен режим ионной резки (толщина среза 150 мкм продолжительность резки 2 ч, подаваемое напряжение для распыления ионов 8 кВ), позволяющий получить качественное изображение поперечного среза волокнистого материала.

С помощью программы IProsoft определена площадь среза волокон по растровому изображению, а с помощью программы AutoCAD была достигнута точность определения площади среза волокон и оценена равномерность распределения областей среза.

Получены диаграммы распределения площадей срезов волокон и равномерность их распределения.

Библиографический список

1. Терентьев, О.А. Гидродинамика волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве / О.А. Терентьев. - М. : Лесная промышленность, 1980. 248 с.
2. Машины для производства бумаги и картона / под ред. В.С. Курова, Н.Н. Кокушина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 646 с.
3. Куров, В.С. Гидродинамика процессов массоподачи на бумагоделательную машину / В.С. Куров, Ю.А. Тихонов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 264 с.
4. Мидуков, Н.П. Технология ионной резки при исследовании многослойного картона / Н.П. Мидуков, В.С. Куров, А.С. Смолин, П.А. Сомов // Гофроиндустрия на современном этапе развития: сб. тр. XVII Междунар. науч.-практ. конф. – 2018. – С. 10-13.
5. URL:<http://www.technoorg.hu/static/downloads/semprep2cataloguepdf.pdf>
6. Мидуков, Н.П. Производство многослойного картона тест-лайнера с белым слоем / Н.П. Мидуков, В.С. Куров, А.С. Смолин. – СПб.: Изд-во – Полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2018. – 208 с.
7. Midukov, N.P. Effect of virgin fiber content on strength and stiffness characteristics of a three-layer testliner / N.P. Midukov, T. Schrinner, H. Grossmann, A.S. Smolin and V.S. Kurov // BioRes. – 2015. – Vol. 10(1). – P.1747-1756.
8. ГОСТ 7629-93 Бумага и картон. Метод определения золы. – М.: Изд-во стандартов. – 2015. – 14 с.
9. TESCAN детектор BSE. URL: www.tescan.ru/products/sem-detectors.

Содержание

Введение.....	3
1. Реологические и гидродинамические особенности бумажной массы при подаче на бумагоделательную машину.....	5
1.1. Реологические основы процесса массоподачи.....	5
1.2. Использование реологической характеристики и уравнения движения бумажной массы в прикладных целях.....	16
1.3. Линейная математическая модель движения бумажной массы при подаче на бумагоделательную машину.....	20
2. Влияние пульсаций давления в массоподводящих системах БДМ на колебания массоемкости бумаги.....	25
2.1. Колебания массы 1 м ² бумажного полотна на бумагоделательной машине.....	25
2.2. Зависимость продольных колебаний бумаги от частотного распределения пульсаций давления в напорном ящике.....	33
2.3. Массоподводящие системы бумагоделательных машин.....	35
2.3.1. Массные и смесительные насосы.....	37
2.3.2. Очистка бумажной массы в поле центробежных сил.....	45
2.3.3. Деаэрация бумажной массы.....	50
2.3.4. Гидродинамические сортировки.....	53
2.3.5. Напускные устройства.....	64
2.3.6. Трубопроводные коммуникации.....	68
2.3.7. Анализ методов демпфирования пульсаций давления.....	69
3. Оценка неравномерности распределения волокон в бумаге или картоне, вызванной пульсациями давлений и особенностью реологической характеристики бумажной массы.....	73
3.1. Способ подготовки поперечного среза методом ионной резки ...	73
3.2. Оптимизация режимов ионной резки бумаги и картона.....	78
3.3. Схематическое изображение процесса ионной резки образца.....	81
3.4. Графическая обработка изображения поперечного среза.....	83
3.5. Анализ неоднородности распределения волокон в бумаге или картоне.....	86
Библиографический список.....	88

Учебное издание

Мидуков Николай Петрович

Виктор Сергеевич Куров

ГИДРОДИНАМИКА ВОЛОКНИСТЫХ СУСПЕНЗИЙ

Учебное пособие

Редактор и техн. редактор Л.Я Титова

Темплан 2020 г., поз. 81

Подп. к печати 27.08.2020 г. Формат бумаги 60x84/16. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 5,75. Печ. л. 5,75. Тираж 100 экз. Изд. №81. Цена «С». Заказ

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, 198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.