

А.В. Александров, Т.Н. Александрова

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

**Часть II. Гидродинамика процессов
формования бумаги**

Учебное пособие

**Санкт-Петербург
2015**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

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

А.В. Александров, Т.Н. Александрова

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

**Часть II. Гидродинамика процессов
формования бумаги**

Учебное пособие

**Санкт-Петербург
2015**

УДК 676.1.026 (07)

ББК Л 779

А 465

Александров А.В., Александрова Т.Н. Реология и гидродинамика процессов отлива и формования бумаги. Часть II. Гидродинамика процессов формования бумаги / СПбГТУРП. – СПб., 2015. – 133 с.: ил. 49. ISBN 978-5-91646-087-2

В учебном пособии рассмотрены теоретические и экспериментальные основы процессов, происходящих в зоне отлива и формования бумагоделательной машины. Показано влияние условий отлива и формования на структуру потока волокнистой суспензии и качество вырабатываемой бумаги. Рассмотрены механизмы, обеспечивающие диспергирование бумажной массы в формующих устройствах БДМ. Проведено сопоставление эффективности диспергирующего воздействия на бумажную массу в зоне отлива и формования БДМ традиционных обезвоживающих элементов и инновационных конструкций виброактиваторов.

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

Рецензенты:

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

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

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

ISBN 978-5-91646-087-2

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

©Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, 2015

ВВЕДЕНИЕ

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

В учебном пособии изложены теоретические и экспериментальные основы процессов, происходящих в зоне отлива и формования БДМ. Показано влияние условий отлива и формования на структуру потока бумажной массы и качество вырабатываемой бумаги. Проведено сопоставление эффективности диспергирующего воздействия на бумажную массу в зоне отлива и формования БДМ традиционных обезвоживающих элементов и инновационных конструкций виброактиваторов.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ДИСПЕРГИРОВАНИЯ БУМАЖНЫХ МАСС НА СЕТОЧНОМ СТОЛЕ ПЛОСКОСЕТОЧНОЙ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

Бумажная масса в зоне формования подвергается знакопеременным нагрузкам, обусловленным силовым взаимодействием обезвоживающих элементов с сеткой, транспортирующей бумажную массу. В работах И.Д. Кугушева при расчетах обезвоживания бумажной массы выделяются две зоны воздействия обезвоживающих элементов на бумажную массу: зону размыва слоя сформированного полотна потоком, отраженным от передней грани обезвоживающего элемента и зону обезвоживания бумажной массы под действием вакуума, создаваемого обезвоживающими элементами [1]. Расчетом обезвоживания на определенном участке сеточного стола определяется количество удаляемой из бумажной массы воды, однако, не раскрывается процесс структурообразования в потоке бумажной массы при ее обезвоживании. Рассмотрим силовое взаимодействие в этих зонах обезвоживающих элементов с формирующей сеткой и размещенной на ней бумажной массой.

1.1. Взаимодействие обезвоживающих элементов с потоком подсеточной воды

Силовое взаимодействие потока воды, повисшего под сеткой с обезвоживающим элементом, рассмотрим на примере основных обезвоживающих элементов [1]: регистравого вала и гидропланки (рис.1).

Плоский поток сечением S_1 , переносимый под сеткой со скоростью V_1 при взаимодействии с поверхностью регистравого вала в набегающем клине делится на две неравные части и сходит с нее со скоростью V_2 и V_3 , направления которых совпадают с направлениями соответствующих касательных к валу.

Для определения величины этих скоростей выделим вдоль

поверхности потока элементарную струйку и запишем уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2. Пренебрегая силами тяжести и сопротивления, имеем

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (1.1)$$

Поскольку давление на поверхности слоя подсеточной воды равно атмосферному давлению: $P_1 = P_2 = P_a$, из уравнения (1.1) следует, что

$$V_1 = V_2.$$

Таким образом, величина поверхностной скорости не изменяется при растекании потока по поверхности регистрирующего вала, т.е. $V_1 = V_2 = V_3$.

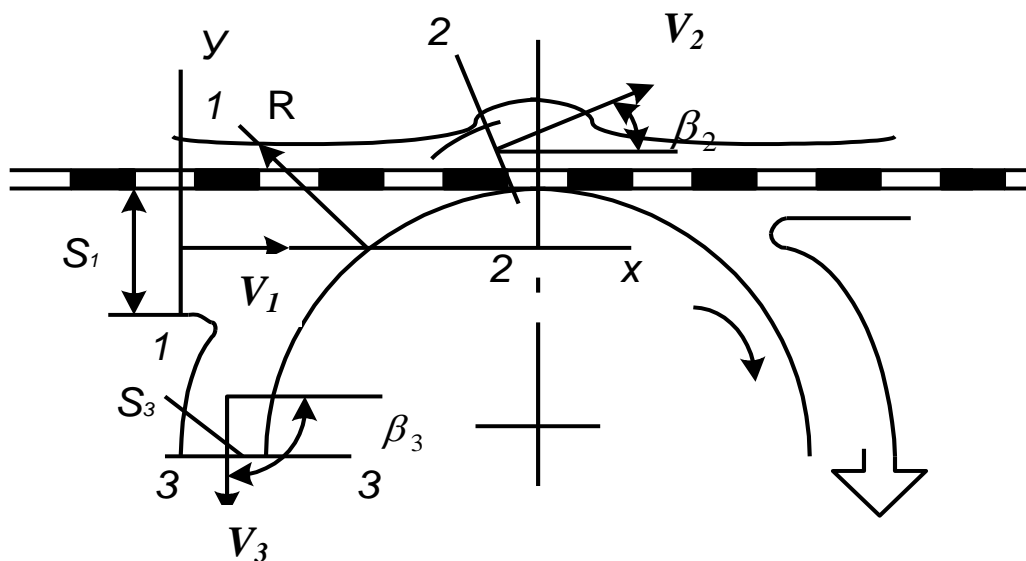


Рис. 1. Взаимодействие регистрирующего вала с потоком подсеточной воды

Составим уравнение количества движения для объема потока, ограниченного контрольной поверхностью, состоящей из сечения S_1 , свободной поверхности потока, сечений S_2 и S_3 и смоченных поверхностей сетки и регистрирующего валика, т.е. $S = S_1 + S_2 + S_3 + S_6$ пренебрегая, как и ранее, силами трения и тяжести.

Уравнение количества движения для указанного объема в векторном виде записывается следующим образом

$$\int_{S_1} \bar{p}_n dS + \int_{S_2} \bar{p} dS + \int_{S_3} \bar{p} dS + \int_{S_6} \bar{p} dS + G = \int_{S_1} \rho V_n \bar{V} dS + \int_{S_2} \rho V_n \bar{V} dS + \int_{S_3} \rho V_n \bar{V} dS, \quad (1.2)$$

где G – вес выделенного объема.

На поверхности S_1 : $V_n = -V$, на поверхностях S_2 и S_3 : $V_n = V$, $\bar{p}_n = -p\bar{n}$ где p – гидродинамическое давление в точках соответствующих сечений, n – орт внешней нормали.

Обозначим

$$\begin{aligned} \bar{P}_1 &= \int_{S_1} \bar{p} dS = - \int_{S_1} p \bar{n} dS \\ \bar{P}_2 &= - \int_{S_2} p \bar{n} dS; \\ \bar{P}_3 &= - \int_{S_3} p \bar{n} dS; \\ \bar{R} &= - \int_{S_6} p \bar{n} dS, \end{aligned}$$

где $\bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{P}_3$ – силы давления в соответствующих сечениях; \bar{R} – сила воздействия поверхности регистрируемого вала на рассматриваемый объем потока. Направления сил $\bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{P}_3$ противоположны внешним нормальям к соответствующим сечениям.

Полагаем, что скорости в сечениях S_1, S_2 , и S_3 распределены равномерно и равны соответствующим средним скоростям V_i . Учитывая, что избыточное давление в рассматриваемых сечениях равно нулю, из уравнения (1.2) получим выражение для определения силы воздействия поверхности регистрируемого вала на рассматриваемый объем потока

$$\bar{R} = \rho V_3 \bar{V}_3 S_3 + \rho V_2 \bar{V}_2 S_2 - \rho V_1 \bar{V}_1 S_1$$

или

$$\bar{R} = \rho Q_3 \bar{V}_3 + \rho Q_2 \bar{V}_2 - \rho Q_1 \bar{V}_1, \quad (1.3)$$

Проектируя уравнение (1.3) на оси координат x и y , получим выражения для проекции силы \bar{R}

$$R_x = \rho Q_3 V_1 \cos \beta_3 + \rho Q_2 V_1 \cos \beta_2 - \rho Q_1 V_1,$$

$$R_y = \rho Q_3 V_1 \sin \beta_3 + \rho Q_2 V_2 \sin \beta_2,$$

где $\beta_2 > 0$ и $\beta_3 < 0$ – углы схода потока с регистравого валика.

Таким образом, сила воздействия потока, отраженного от поверхности регистравого валика на слой бумажной массы, расположенный на сетке, определяется из выражения

$$R_y = \rho V_1 (Q_3 \sin \beta_3 + Q_2 \sin \beta_2).$$

Условия отсутствия размыва бумажной массы над набегающим клином регистравого вала имеет вид

$$k_c R_y < H,$$

где H – фильтрационный напор; k_c – коэффициент сопротивления сетки с осевшим слоем волокон.

При изучении силового взаимодействия потока воды, повисшего под сеткой с гидропланкой, используем расчетную схему (рис. 2).

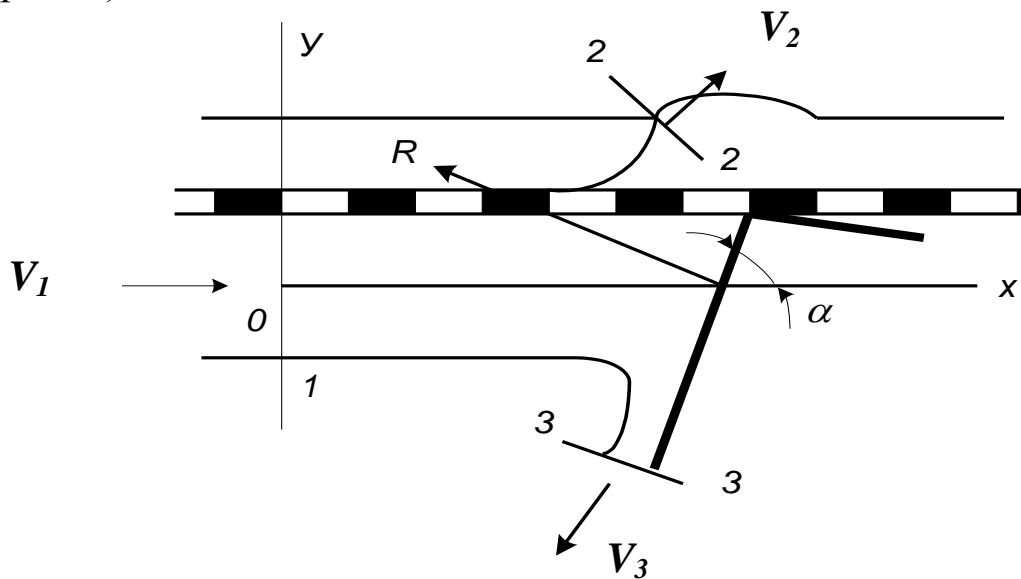


Рис. 2. Взаимодействие гидропланки с потоком подсеточной воды

В этом случае заранее известно, что искомая сила направлена по нормали к передней грани, так как по предположению силы трения пренебрежимо малы. Тогда, проектируя (1.3) на направление нормали к передней грани гидропланки, получим

$$R = -\rho Q_1 V_1 \sin \alpha. \quad (1.4)$$

Проектируя (1.3) на оси координат x и y , получим выражения для проекций силы R

$$R = -\rho Q_1 V_1 \sin^2 \alpha.$$

Проекция уравнения (1.3) на направление скоростей V_2 и V_3 позволяет определить величины расходов в сечениях 2-2 и 3-3

$$\rho Q_2 V_2 - \rho Q_3 V_3 - \rho Q_1 V_1 \cos \alpha = 0$$

или

$$Q_1 \cos \alpha = Q_2 - Q_3.$$

Кроме того,

$$Q_1 = Q_2 + Q_3.$$

Совместное решение данных уравнений дает распределение расхода потоков на передней грани гидропланки

$$Q_2 = Q_1 \frac{1 + \cos \alpha}{2}, \quad (1.5)$$

$$Q_3 = Q_1 \frac{1 - \cos \alpha}{2}.$$

1.2. Исследование процесса возникновения вертикальных смещений формирующей сетки под воздействием конструктивных элементов сеточного стола

Структура вырабатываемой на бумагоделательной машине бумаги в значительной мере определяется условиями диспергации бумажной массы под действием конструктивных элементов сеточного стола в начальной зоне формирования. В этой связи представляет значительный интерес рассмотрение вопроса возникновения колебаний формирующей сетки под действием конструктивных элементов сеточного ствола.

Процесс возникновения колебаний сетки рассмотрим на примере взаимодействия сетки с регистровым валом, расположенным в начальной зоне формирования.

Для аналитического исследования процесса возникновения вертикальных смещений примем расчетную схему, представленную на рис.3.

Уравнение баланса сил, действующих на формирующую сетку, запишем в следующем виде [2]

$$\rho \frac{d^2 y(x,t)}{dt^2} = T \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} - EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + f(x), \quad (1.6)$$

где $f(x)$ – вынуждающая сила, определяемая из распределения импульса давления и вакуум – импульса; T – удельное натяжение сетки; V – скорость движения сетки; t – время; x - горизонтальная координата сетки; y – вертикальное смещение сетки; ρ – масса сетки и бумажной массы; E - модуль упругости сетки; I – приведенный момент инерции сетки.

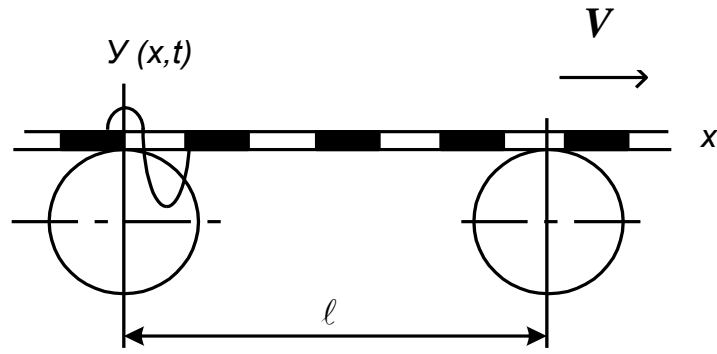


Рис 3. Расчетная схема

Полагая скорость движения сетки постоянной, имеем

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + 2V \frac{\partial^2 y}{\partial x \cdot \partial t} + \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{T}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x} + \frac{EI}{\rho} \cdot \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = \frac{f(x)}{\rho} \quad (1.7)$$

Проведем обезразмеривание:

$$U = x/l, \quad (1.8)$$

$$z = y/l, \quad (1.9)$$

$$\tau = \frac{\sqrt{T/\rho}}{l} \cdot t, \quad (1.10)$$

$$\beta = \frac{V}{\sqrt{T/\rho}}, \quad (1.11)$$

$$\alpha = \frac{EI}{Tl^2}, \quad (1.12)$$

$$F(u) = \frac{l}{T} \cdot f(x). \quad (1.13)$$

С учетом (1.8-1.13) уравнение (1.8) принимает вид

$$\frac{\partial^2 z(u, \tau)}{\partial \tau^2} + 2\beta \frac{\partial^2 z(u, \tau)}{\partial u \partial \tau} - (1 - \beta^2) \frac{\partial^2 z(u, \tau)}{\partial u^2} + \alpha \frac{\partial^4 z(u, \tau)}{\partial u^4} = F(u) \quad (1.14)$$

В условиях реальной бумагоделательной машины параметры α и β имеют порядок $\alpha \sim 10^{-3}$, $\beta \sim 10^{-1}$, поэтому представляется возможным искать $Z(u, \tau)$ в виде ряда по степеням α

$$Z(u, \tau) = Z_0(u, \tau) + \alpha Z_1(u, \tau) + \dots \quad (1.15)$$

Представляя (1.15) в (1.14), найдем уравнения для нулевого и первого приближений

$$\frac{\partial^2 Z_0}{\partial \tau^2} + 2\beta \frac{\partial^2 Z_0}{\partial u \partial \tau} - (1 - \beta^2) \frac{\partial^2 Z_0}{\partial u^2} = F(u), \quad (1.16)$$

$$\frac{\partial^2 Z_1}{\partial \tau^2} + 2\beta \frac{\partial^2 Z_1}{\partial u \partial \tau} - (1 - \beta^2) \frac{\partial^2 Z_1}{\partial u^2} = -\frac{\partial^4 Z_0}{\partial u^4} \quad (1.17)$$

Учитывая, что имеет место операторное равенство

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} + 2\beta \frac{\partial^2}{\partial u \partial \tau} - (1 - \beta^2) \frac{\partial^2}{\partial u^2} = \\ & = \left[\frac{\partial}{\partial \tau} - (1 - \beta) \frac{\partial}{\partial u} \right] \left[\frac{\partial}{\partial \tau} + (1 + \beta) \frac{\partial}{\partial u} \right] \end{aligned}$$

можем заменить каждое из уравнений (1.16), (1.17) системой из двух уравнений первого порядка

$$\frac{\partial \omega_0}{\partial \tau} - (1 - \beta) \frac{\partial \omega_0}{\partial u} = F(u), \quad (1.18)$$

$$\frac{\partial z_0}{\partial \tau} + (1 + \beta) \frac{\partial z_0}{\partial u} = \omega_0, \quad (1.19)$$

$$\frac{\partial \omega_1}{\partial \tau} - (1 - \beta) \frac{\partial \omega_1}{\partial u} = -\frac{\partial^4 z_0}{\partial u^4}, \quad (1.20)$$

$$\frac{\partial z_1}{\partial \tau} + (1 + \beta) \frac{\partial z_1}{\partial u} = \omega_1, \quad (1.21)$$

Для линейных уравнений первого порядка в частных производных используем универсальный метод нахождения общего решения – метод характеристик. Для удобства вычислений перепишем уравнения (1.18) – (1.21) в следующем виде

$$\frac{\partial w}{\partial u} - \frac{1}{1 - \beta} \frac{\partial w_0}{\partial \tau} = -\frac{1}{1 - \beta} F(u), \quad (1.22)$$

$$\frac{\partial z_0}{\partial u} + \frac{1}{1 + \beta} \frac{\partial z_0}{\partial \tau} = \frac{1}{1 + \beta} w_0, \quad (1.23)$$

$$\frac{\partial w_1}{\partial u} - \frac{1}{1 - \beta} \frac{\partial w_1}{\partial \tau} = -\frac{1}{1 - \beta} \frac{\partial^4 z_0}{\partial u^4}, \quad (1.24)$$

$$\frac{\partial z_1}{\partial u} + \frac{1}{1 + \beta} \frac{\partial z_1}{\partial \tau} = -\frac{1}{1 + \beta} w_1. \quad (1.25)$$

Общее решение системы уравнений зависит от начальных и краевых условий и вида вынуждающей силы $F(u)$.

При взаимодействии валика с сеткой образуется зона давления и зона вакуума, заданы границы этих зон u_1 , u_2 и u_5 , точка максимума давления u_2 и максимальное значение давления $F(u_2) = F_2$, а также точка максимума вакуума u_4 и максимальное значение вакуума $F(u_4) = F_4$, как показано на рис.4.

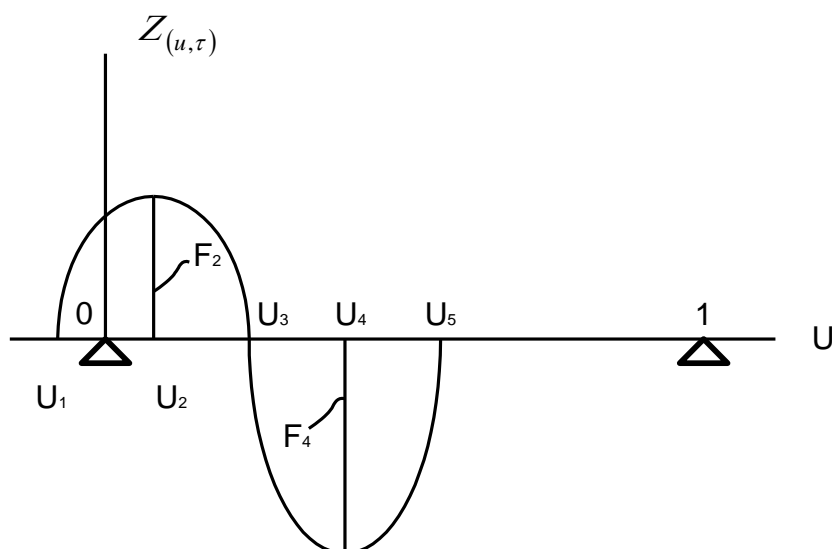


Рис.4. Общий вид вынуждающей силы

Интерполяционный многочлен Лагранжа, восстанавливающий значение $F(u)$ для $0 < u < u_5$, имеет следующий вид

$$F(u) = F_2 \frac{(u - u_1)(u - u_3)(u - u_4)(u - u_5)}{(u_2 - u_1)(u_2 - u_3)(u_2 - u_4)(u_2 - u_5)} + F_4 \frac{(u - u_1)(u - u_3)(u - u_4)(u - u_5)}{(u_4 - u_1)(u_4 - u_2)(u_4 - u_3)(u_4 - u_5)}. \quad (1.26)$$

Разлагая правую часть (1.26) по степеням, имеем

$$F(u) = \begin{cases} A_0 + A_1 u + A_2 u^2 + A_3 u^3 + A_4 u^4, & \text{при } 0 < u < u_5 \\ 0, & \text{при } u_5 < u < 1 \end{cases}, \quad (1.27)$$

где

$$A_0 = \frac{F_2 u_1 u_3 u_4 u_5}{(u_2 - u_1)(u_2 - u_3)(u_2 - u_4)(u_2 - u_5)} + \frac{F_4 u_1 u_2 u_3 u_5}{(u_4 - u_1)(u_4 - u_2)(u_4 - u_3)(u_4 - u_5)},$$

$$A_1 = \frac{-F_2(u_1 u_3 u_4 + u_1 u_3 u_5 + u_3 u_4 u_5)}{(u_2 - u_1)(u_2 - u_3)(u_2 - u_4)(u_2 - u_5)} - \frac{F_4(u_1 u_2 u_3 + u_1 u_2 u_5 + u_1 u_3 u_5 + u_2 u_3 u_5)}{(u_4 - u_1)(u_4 - u_2)(u_4 - u_3)(u_4 - u_5)},$$

$$A_2 = \frac{F_2(u_1 u_3 + u_1 u_4 + u_1 u_5 + u_3 u_4 + u_3 u_5 + u_4 u_5)}{(u_2 - u_1)(u_2 - u_3)(u_2 - u_4)(u_2 - u_5)} + \frac{F_4(u_1 u_2 + u_1 u_3 + u_1 u_5 + u_2 u_3 + u_2 u_5 + u_3 u_5)}{(u_4 - u_1)(u_4 - u_2)(u_4 - u_3)(u_4 - u_5)},$$

$$A_3 = \frac{-F_2(u_1 + u_2 + u_3 + u_5)}{(u_2 - u_1)(u_2 - u_3)(u_2 - u_4)(u_2 - u_5)} + \frac{F_4(u_1 + u_2 + u_3 + u_5)}{(u_4 - u_1)(u_4 - u_2)(u_4 - u_3)(u_4 - u_5)},$$

$$A_4 = \frac{F_2}{(u_2 - u_1)(u_2 - u_3)(u_2 - u_4)(u_2 - u_5)} + \frac{F_4}{(u_4 - u_1)(u_4 - u_2)(u_4 - u_3)(u_4 - u_5)}.$$

Найдем общее решение уравнения (1.22) методом характеристик. Если рассматривать значения $w_0(u, \tau)$ только вдоль некоторой линии $\tau = \tau(u)$, то

$$\frac{dw_0}{du} = \frac{\partial w_0}{\partial u} + \frac{\partial w_0}{\partial \tau} \frac{d\tau}{du}. \quad (1.28)$$

Сравнивая (1.22) и (1.27) замечаем, что если рассматривать значения $w_0(u, \tau)$ вдоль решений уравнения

$$\frac{d\tau}{du} = \frac{1}{1 - \beta},$$

то эти значения $w_0(u, \tau)$ удовлетворяют уравнению

$$\frac{dw_0}{du} = \frac{1}{1-\beta} F(u).$$

Таким образом, уравнение (1.22) равносильно системе

$$\begin{aligned} \frac{dw_0}{du} &= \frac{1}{1-\beta} F(u), \\ \frac{d\tau}{du} &= \frac{1}{1-\beta}. \end{aligned} \quad (1.29)$$

Общее решение второго из уравнений (1.29) имеет вид

$$\tau = a_0 - \frac{u}{1-\beta}. \quad (1.30)$$

Учитывая, что $F(u')=0$ при $u_5 < u < 1$ и задается формулой (1.27) при $0 < u < u_5$, решаем первое из уравнений (1.29) отдельно для промежутков

$$0 < u < u_5 \text{ и } u_5 < u < 1.$$

При $0 < u < u_5$ имеем

$$\begin{aligned} w_0(u, \tau) &= w_0(0, a_0) - \frac{1}{1-\beta} \int_0^u F(u) du = \\ &= w_0(0, a_0) - \frac{1}{1-\beta} \left(A_0 u + A_1 \frac{u^2}{2} + A_2 \frac{u^3}{3} + A_3 \frac{u^4}{4} + A_5 \frac{u^5}{5} \right). \end{aligned}$$

Исключаем параметр a_0 при помощи (1.30) получаем

$$w_0(u, \tau) = w_0(0, a_0) - \frac{1}{1-\beta} \left(A_0 u + A_1 \frac{u^2}{2} + A_2 \frac{u^3}{3} + A_3 \frac{u^4}{4} + A_5 \frac{u^5}{5} \right). \quad (1.31)$$

При $u_5 < u < 1$ имеем

$$\begin{aligned}
w_0(u, \tau) &= w_0(0, a_0) - \frac{1}{1-\beta} \int_0^{u_5} F(u) du - \frac{1}{1-\beta} \int_{u_5}^u F(u) du = \\
&= w_0(0, a_0) - \frac{1}{1-\beta} \left(A_0 u_5 + A_1 \frac{u_5^2}{2} + A_2 \frac{u_5^3}{3} + A_3 \frac{u_5^4}{4} + A_5 \frac{u_5^5}{5} \right).
\end{aligned}$$

Исключая параметр a_0 при помощи (1.30), получаем

$$\begin{aligned}
w_0(u, \tau) &= w_0 \left(0, \tau + \frac{u}{1+\beta} \right) - \\
&- \frac{1}{1-\beta} \left(A_0 u_5 + A_1 \frac{u_5^2}{2} + A_2 \frac{u_5^3}{3} + A_3 \frac{u_5^4}{4} + A_5 \frac{u_5^5}{5} \right).
\end{aligned} \tag{1.32}$$

Решая уравнение (1.23) аналогично уравнению (1.22), получаем

$$Z_0(u, \tau) = \Phi_0 \left(\tau - \frac{u}{1+\beta} \right) + \Psi_0 \left(\tau + \frac{u}{1-\beta} \right) - \frac{1}{1-\beta^2} P_0(u), \tag{1.33}$$

где Φ, Ψ - функции, зависящие от начальных и краевых условий

$$P_0(u) = \begin{cases} A_0 \frac{u^2}{2} + A_1 \frac{u^3}{6} + A_2 \frac{u^4}{12} + A_3 \frac{u^5}{20} + A_4 \frac{u^6}{30}, & \text{при } 0 < u < u_5 \\ -B_1 + B_2 u, & \text{при } u_5 < u < 1, \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
B_1 &= A_0 \frac{u_5^2}{2} + A_1 \frac{u_5^3}{3} + A_2 \frac{u_5^4}{4} + A_3 \frac{u_5^5}{5} + A_4 \frac{u_5^6}{6} \\
B_2 &= A_0 u_5 + A_1 \frac{u_5^2}{2} + A_2 \frac{u_5^3}{3} + A_3 \frac{u_5^4}{4} + A_4 \frac{u_5^5}{5}.
\end{aligned}$$

Определим вертикальные смещения сетки в нулевом приближении по α при нулевых краевых и начальных условиях. Из всех решений (1.33) уравнения (1.16) ограничимся исследованием

решения, удовлетворяющего нулевым краевым и начальным условиям

$$Z_0(0, \tau) = 0, \quad (1.34)$$

$$Z_0(1, \tau) = 0, \quad (1.35)$$

$$Z_0(u, 0) = 0, \quad (1.36)$$

$$\frac{\partial Z_0}{\partial \tau}(u, 0) = 0. \quad (1.37)$$

Условие (1.34) означает

$$\Phi_0(\tau) + \Psi(\tau) = 0, \quad \nabla \tau > 0,$$

т.е.

$$Z_0(u, \tau) = \Phi_0\left(\tau - \frac{u}{1+\beta}\right) - \Phi_0\left(\tau + \frac{u}{1-\beta}\right) - \frac{1}{1-\beta^2} P_0(u), \quad (1.38)$$

Для однозначного задания $Z_0(u, \tau)$ $\nabla \tau > 0$ и $0 < u < 1$ значение функции $\Phi_0(\lambda)$ необходимо знать $\lambda > \frac{-1}{1+\beta}$. Условия (1.35) – (1.37) позволяют найти $\Phi_0(\lambda)$ с точностью до постоянной, которую для простоты считаем равной нулю.

$$\Phi_0(\lambda) = \begin{cases} \frac{1}{2(1+\beta)} P_0[-(1+\beta)\lambda], & \text{при } \frac{-1}{1+\beta} < \lambda < 0, \\ \frac{-1}{2(1-\beta)} P_0[(1+\beta)\lambda], & \text{при } 0 < \lambda < \frac{-1}{1+\beta}, \\ \Phi_0\left(\lambda - \frac{2}{1-\beta}\right) - \frac{1}{1-\beta^2} P_0(1), & \text{при } \lambda > \frac{1}{1-\beta}. \end{cases} \quad (1.39)$$

Определяем вид вертикальных смещений сетки в первом приближении по α . Решая уравнения, входящие в систему (1.24,

1.25), находим $Z_1(u, \tau)$

$$\begin{aligned}
 Z_1(u, \tau) = & \Phi_1\left(\tau - \frac{u}{1+\beta}\right) + \Psi_1\left(\tau + \frac{u}{1-\beta}\right) - \frac{u}{2(1+\beta)^4} \Phi_0'''\left(\tau - \frac{u}{1+\beta}\right) + \\
 & + \frac{u}{2(1-\beta)^4} \Psi_0'''\left(\tau + \frac{u}{1-\beta}\right) - \frac{1}{(1-\beta)^2} P_1(u),
 \end{aligned} \tag{1.40}$$

где Φ_1, Ψ_1 - функции, зависящие от начальных и краевых условий

$$P_1(u) \begin{cases} A_2 u^2 + A_3 u^3 + A_4 u^4, & \text{при } 0 < u < u_5, \\ -B_3 + B_4 u & \text{при } u_5 < u < 1, \end{cases}$$

$$B_3 = A_2 u_5^2 + 2A_3 u_5^3 + 3A_4 u_5^4$$

$$B_4 = 2A_2 u_5 + 3A_3 u_5^2 + 4A_4 u_5^3.$$

Определив вертикальные смещения сетки в первом приближении по α при нулевых краевых и начальных условиях $Z(u, \tau)$, задают для $Z_1(u, \tau)$ соотношения

$$Z_1(0, \tau) = 0, \tag{1.41}$$

$$Z_1(1, \tau) = 0, \tag{1.42}$$

$$Z_1(u, 0) = 0, \tag{1.43}$$

$$\frac{\partial Z_1}{\partial \tau}(u, 0) = 0. \tag{1.44}$$

С учетом (1.41) и (1.34) запишем (1.40) в виде

$$\begin{aligned}
Z_1(u, \tau) = & \Phi_1\left(\tau - \frac{u}{1+\beta}\right) + \Phi_1\left(\tau + \frac{u}{1-\beta}\right) - \\
& - \frac{u}{2(1+\beta)^4} \Phi_0'''\left(\tau - \frac{u}{1+\beta}\right) - \frac{u}{2(1-\beta)^4} \Phi_0'''\left(\tau + \frac{u}{1-\beta}\right) - \frac{1}{(1-\beta^2)^2} P_1(u),
\end{aligned} \tag{1.4}$$

5)

Условия (1.42) - (1.44) позволяют найти $\Phi_1(\lambda)$ для $\lambda > \frac{-1}{1+\beta}$

$$\begin{aligned}
\Phi_1(\lambda) = & \left\{ \frac{-\lambda}{2(1+\beta)^3} \Phi_0''(\lambda) + \frac{1}{4(1+\beta)^2} \Phi_0''(\lambda) + \frac{1}{4(1-\beta)} \Phi_0''\left[\frac{-(1+\beta)}{(1-\beta)}\lambda\right] \right\} + \\
& + \frac{1}{2(1-\beta)(1+\beta)^2} P_1[-(1+\beta)] \quad \text{при } \frac{-1}{1+\beta} < \lambda < 0.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Phi_1(\lambda) = & \left\{ \frac{-\lambda}{2(1+\beta)^3} \Phi_0''(\lambda) + \frac{1}{4(1+\beta)^2} \Phi_0''\left[\frac{-(1-\beta)}{(1+\beta)}\lambda\right] + \frac{1}{4(1-\beta)^2} \Phi_0''(\lambda) \right\} - \\
& - \frac{1}{2(1-\beta)^2(1+\beta)} P_1[(1-\beta)\lambda] \quad \text{при } 0 < \lambda < \frac{1}{1-\beta},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Phi_1(\lambda) = & \left\{ \Phi_1\left(\lambda - \frac{2}{1-\beta^2}\right) - \left(\frac{1}{2(1+\beta)^4}\right) \Phi_0''\left(\lambda - \frac{2}{1-\beta^2}\right) \right\} - \\
& - \frac{1}{2(1-\beta)^4} \Phi_0''(\lambda) - \frac{1}{(1-\beta^2)^2} P_1(1) \quad \text{при } \lambda > \frac{1}{1-\beta}.
\end{aligned}$$

Таким образом, анализ уравнения баланса сил, действующих на сетку, показывает, что смещение сетки представляют собой суперпозицию трех волн: стоячей волны, форма которой определяется профилем вынуждающей силы и двух бегущих волн, скорости движения которых в направлении движения сетки составляют $\left(V + \sqrt{T/\rho}\right)$ и $\left(V - \sqrt{T/\rho}\right)$ в обратном направлении.

1.3. Анализ условий диспергирования бумажной массы на сеточном столе под действием обезвоживающих элементов

Волокнистая суспензия очень низкой концентрации обезвоживается на сеточной части бумагоделательной машины, превращаясь во влажное бумажное полотно сухостью 17-21%.

Процесс фильтрации воды из волокнистой суспензии и формирование полотна происходит на относительно коротком участке сеточного стола и является определяющим в получении бумажного полотна с требуемыми физико-механическими показателями. Дефекты формования не могут быть исправлены на последующих этапах технологического процесса и остаются в бумаге как дефекты ее производства.

Конструктивные элементы формирующих устройств, расположенные в зоне отлива и формования, наряду с эффективным обезвоживанием должны поддерживать в потоке микротурбулентный режим течения для предотвращения флокуляции и обеспечения равномерного распределения волокон в структуре бумажного листа.

Знание динамики структурообразования потока бумажной массы в зоне отлива и формования под воздействием конструктивных элементов формирующих устройств позволяет эффективно воздействовать на процесс формования бумаги путем обоснованного выбора конструктивных элементов и рациональной компоновки формирующих устройств.

1.3.1. Аналитическое исследование установившихся вертикальных смещений сетки с размещенным на ней слоем переменной массы

Для большинства современных БДМ параметр α , учитывающий жесткость сетки, имеет порядок малости такой

величины, что им можно пренебречь. В связи с изложенным представляется возможным решить задачу исследования установившихся вертикальных смещений сетки с размещенным на ней слоем переменной массы, что особенно важно в зоне интенсивного обезвоживания.

Для аналитического исследования установившихся вертикальных смещений сетки в условиях переменной высоты слоя бумажной массы рассмотрим расчетную схему, представленную на рис.5.

Для описания вертикальных смещений на участке между обезвоживающими элементами принимаем уравнение баланса сил

$$\frac{d}{dt} \left[\rho(x) \frac{dy(x,t)}{dt} \right] = T \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} + f(x), \quad (1.46)$$

где

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial x},$$

$\rho(x)$ - функция, описывающая изменение плотности сетки и бумажной массы.

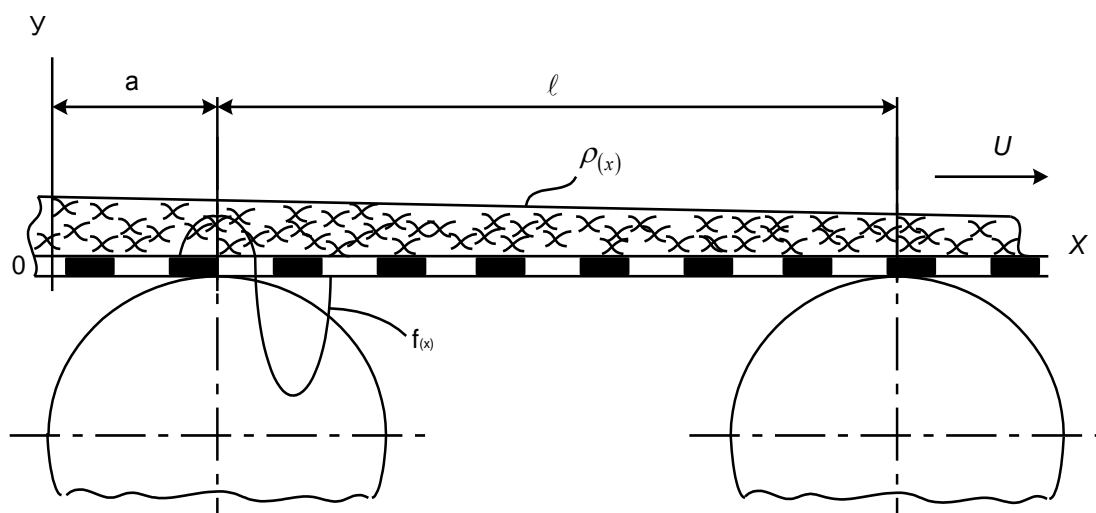


Рис.5. Расчетная схема для регистрающего валика при переменной высоте слоя обезвоживаемой бумажной массы

Полагая горизонтальную скорость сетки постоянной $V = const$ и ограничиваясь изучением установившихся вертикальных смещений сетки, получим

$$-\frac{\partial}{\partial u} \left[(1 - \beta^2(u)) \frac{\partial Z}{\partial u} \right] = F(u), \quad (1.47)$$

где введено обезразмеривание

$$\begin{cases} u = \frac{x - a}{l}, \\ z = \frac{y}{l}, \\ B(u) = \beta^2(u) = \frac{\rho(x)V^2}{T}, \\ F(u) = \frac{l}{T} f(x) \end{cases} \quad (1.48)$$

где l – расстояние между обезвоживающими элементами; a – расстояние от начала координат до исследуемого участка сеточного стола.

Для большинства бумагоделательных машин в диапазоне скоростей протяжки сетки от самых малых до 20 м/с коэффициент находится в пределах $\beta \sim 10^{-2} - 10^{-1}$, т.е.

$$\beta < 1. \quad (1.49)$$

Для нахождения общего решения обыкновенного дифференциального уравнения (1.47) проигнорируем его по безразмерной горизонтальной координате u с использованием формулы Ньютона-Лейбница.

$$-\left\{ [1 - \beta(u)] \frac{\partial Z}{\partial u} \left(u - [1 - \beta(0)] \frac{\partial Z}{\partial u} \right) \right\} = \int_0^u F(s) ds.$$

Введем постоянную интегрирования

$$C_1 = [1 - B(0)] \frac{\partial Z(0)}{\partial u}.$$

Интеграл вынуждающей силы обозначим следующим образом

$$G_1(u) = \int_0^u F(s) ds.$$

С учетом вышеизложенного

$$C_1 - [1 - B(u)] \frac{\partial Z}{\partial u} = C_1(u). \quad (1.50)$$

Разделив обе части уравнения (3.50) на $[1 - B(u)]$, представим его в следующем виде

$$\frac{\partial Z}{\partial u} = \frac{C_1}{1 - B(u)} - \frac{C_1(u)}{1 - B(u)}. \quad (1.51)$$

Введем постоянную интегрирования

$$C_2 = Z(0)$$

и обозначения

$$G_2(u) = \int_0^u \frac{ds}{1 - B(s)}; \quad G_3(u) = \int_0^u \frac{G_1(s) ds}{1 - B(s)}.$$

Тогда общее решение уравнения (3.47) примет вид

$$Z(u) = C_2 + C_1 G_2(u) - G_3(u), \quad (1.52)$$

где

$$G_1(u) = \int_0^u F(s) ds; \quad G_2(u) = \int_0^u \frac{ds}{1 - B(s)}; \quad G_3(u) = \int_0^u \frac{G_1(s) ds}{1 - B(s)}. \quad (1.53)$$

Если решение уравнения (1.47) удовлетворяет условиям «неотрыва от обезвоживающих элементов»

$$\begin{cases} Z(0) = 0, \\ Z(1) = 0, \end{cases} \quad (1.54)$$

то после подстановки этих граничных условий (1.54) в уравнение (1.52) получим

$$\begin{cases} 0 = C_2, \\ 0 = 0 + C_1 G_2(1) - G_3(1). \end{cases}$$

Таким образом, постоянные интегрирования при данных граничных условиях имеют вид

$$\begin{cases} C_2 = 0, \\ C_1 = \frac{G_3(1)}{G_2(1)}. \end{cases} \quad (1.55)$$

Переход от безразмерных величин к размерным осуществляется на основе выражений (1.48). Вертикальные смещения сетки бумагоделательной машины в условиях принятого баланса сил записываются в виде

$$Y_{(x)} = l[C_2 + C_1 G_2(u) - G_3(u)], \quad (1.56)$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования, определяемые из (1.55);

$G_2(u)$ и $G_3(u)$ – интегралы, рассчитываемые по (1.53).

Результатом исследований явились формулы для расчета установившихся вертикальных смещений формующей сетки в условиях переменного слоя обезвоживаемой массы. Рассматривая формующую сетку как граничные условия, на основе выражений (1.49), (1.53) и (1.56) определяем градиенты сдвига в потоке бумажной массы, которые однозначно определяют напряженное состояние волокнистой суспензии, определяем степень

диспергированности волокон, т.е. равномерность поверхностной плотности бумаги.

1.3.2. Численное исследование скоростей сдвига в слое бумажной массы, прилежащем к сетке

Диспергирующее воздействие обезвоживающих элементов сеточного стола может распространяться на всю высоту потока бумажной массы, обезвоживаемой на сетке, или на слой, прилежащий к сетке, и зависит от целого ряда факторов: скорости бумагоделательной машины, натяжения и жесткости сетки, реологических характеристик бумажной массы, а также массы сетки с бумажной массой в зоне действия обезвоживающего элемента.

Рассмотрим условия разрушения структурных неоднородностей в слое бумажной массы, прилежащем к сетке, что необходимо для оценки условий существования слоя на сетке волокон.

Для определения скоростей сдвига в слое бумажной массы, прилежащем к сетке, и расчета их распределения вдоль сеточного стола, используем уравнение движения волокнистой суспензии в векторном виде [3].

$$\rho \frac{d\bar{V}}{dt} = \rho \bar{F} - \text{grad}p + \text{div} \left(\sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \dot{\gamma}_{ij}} + \mu \dot{\gamma}_{ij} \right).$$

Известно, что напряжение сдвига в потоке волокнистой суспензии определяются скоростями деформации. Компоненты тензора скоростей деформаций в развернутом виде имеют вид

$$\|\dot{\gamma}_{ij}\| = \begin{vmatrix} \frac{\partial u}{\partial x}, & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right), & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right), & \frac{\partial v}{\partial y}, & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right), & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right), & \frac{\partial w}{\partial z} \end{vmatrix},$$

где u, v, w – проекции скорости соответственно на оси OX, OY, OZ .

Предположим, что слой бумажной массы, прилежащий к формирующей сетке, настолько мал, что воздействие сетки распространяется на весь слой бумажной массы без изменения по высоте. Изменение скорости смещения сетки происходит только в вертикальном направлении.

Тогда компоненты тензора скоростей деформаций в потоке бумажной массы для постоянной скорости протяжки сетки могут быть представлены в виде

$$\begin{cases} \dot{\gamma}_{yx} = \dot{\gamma}_{xy} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial y}{\partial t} \right], \\ \dot{\gamma}_{xx} = \dot{\gamma}_{yy} = 0, \end{cases} \quad (1.57)$$

где

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\partial y}{\partial t} + v \frac{\partial y}{\partial x}. \quad (1.58)$$

Так как рассматриваем установившиеся движения, то

$$\frac{\partial y}{\partial t} = 0, \quad (1.59)$$

тогда

$$\dot{\gamma}_{xy} = \frac{v}{2} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{v}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right). \quad (1.60)$$

Найдем распределение скоростей сдвига вдоль сеточного стола в слое бумажной массы, прилежащем к сетке, для случая обезвоживания волокнистой суспензии переменной массы.

Для решения поставленной задачи перейдем к размерным величинам.

С учетом принятого обезразмеривания (1.48)

$$lu = x - a; \quad y = zl. \quad (1.61)$$

Получим

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{l}{l} \frac{\partial z}{\partial u}, \quad \frac{\partial}{\partial x} = \frac{l}{l} \frac{\partial}{\partial u},$$

окончательно

$$\dot{\gamma}_{xy} = \frac{v}{2l} \frac{\partial^2 z}{\partial u^2}, \quad (1.62)$$

где

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial u} &= \frac{C_1}{1-B(u)} - \frac{G_1(u)}{1-B(u)}, \\ \frac{\partial^2 z}{\partial u^2} &= \frac{\partial}{\partial u} \left[\frac{C_1}{1-B(u)} - \frac{G_1(u)}{1-B(u)} \right] = \\ &= \frac{\partial}{\partial u} \left[\frac{C_1 - G_1(u)}{1-B(u)} \right] = \\ &= \frac{-F(u)[1-B(u)] - [C_1 - G_1(u)][-B'(u)]}{[1-B(u)]^2} = \\ &= -\frac{F(u)}{1-B(u)} + B'(u) \frac{C_1 - G_1(u)}{[1-B(u)]^2}. \end{aligned}$$

Распишем значение переменной $B'(u)$

$$B'(u) = \frac{\partial B}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial u}$$

С учетом (1.48) имеем

$$x = a + lu, \quad \frac{\partial x}{\partial u} = l.$$

Откуда

$$B'(u) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho(x)v^2}{T} \right] l = \rho'(x) \frac{lv^2}{T},$$

где $\rho'(x)$ - производная функция плотности бумажной массы и сетки по горизонтальной координате.

Запишем выражение для определения распределения скорости сдвига в потоке бумажной массы вдоль сеточного стола

$$\dot{\gamma}_{xy} = \frac{v}{2l} \left\{ \frac{-F(u)}{1-B(u)} + \frac{\rho'(x)v^2 l}{T} \frac{C_1 - G_1(u)}{[1-B(u)]} \right\}. \quad (1.63)$$

Известно, что скорости сдвига однозначно определяют касательные напряжения в потоке бумажной массы.

Для нахождения компонента тензора напряжения сдвига в потоке бумажной массы используем реологическое уравнение [3]

$$\tau_{ij} = \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \dot{\gamma}_{ij}} + \mu \dot{\gamma}_{ij}, \quad (1.64)$$

откуда

$$\begin{cases} \tau_{xx} = \tau_{yy} = \sum_{k=1}^{n+1} A_k, \\ \tau_{yx} = \tau_{xy} = \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \dot{\gamma}_{xy}} + \mu \dot{\gamma}_{xy}. \end{cases} \quad (1.65)$$

Функцию, описывающую воздействие обезвоживающего элемента можно восстановить при помощи интерполяционного многочлена Лагранжа или используя известные теоретические зависимости. Кугушевым И.Д. и его научной школой [1,4] разработана методика расчета распределения скоростей фильтрации бумажной массы на сеточном столе с учетом конструктивных параметров сеточного стола и вида обезвоживаемой массы. Преобразуем эти зависимости к виду, удобному для проведения численных исследований скоростей сдвига в потоке бумажной массы, размещенном на формирующей сетке. Примем расчетную схему, представленную на рис.6.

Обезвоживание бумажной массы над регистровым валиком происходит под действием знакопеременных нагрузок. Причем в набегающем водяном клине действует фильтрационный напор, создаваемый сходящейся сеткой и регистровым валиком. Часть этого напора тратится на преодоление: высоты слоя воды под сеткой в критической точке h'_k , высоты слоя массы на сетке h_1 , гидравлического сопротивления сетки. Максимальное значение вакуума в набегающем водяном клине определяется из выражения

$$H'_k = \zeta v^2 + R \frac{(wt'_k)^2}{2} + h + \frac{v^2}{2g} (wt'_k)^2, \quad (1.66)$$

где v – скорость сетки; R – радиус валика; ζ - коэффициент гидравлического сопротивления сетки; wt'_k - критический угол в набегающем водяном клине.

$$wt'_k = \sqrt{\frac{v^2 - 2gh}{gR + V^2(2g\zeta + 1)}} \quad (1.67)$$

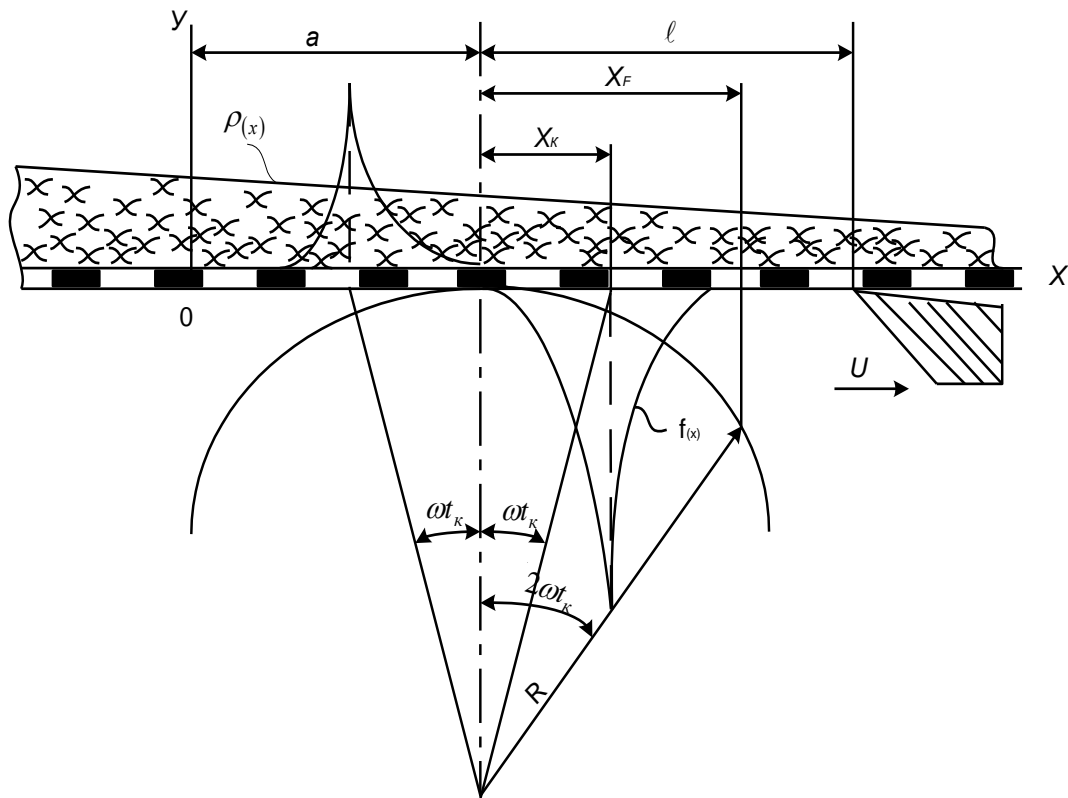


Рис.6. Расчетная схема для определения скоростей сдвига в потоке бумажной массы

Анализ литературных данных свидетельствует о преимущественном влиянии вакуум-импульса на вертикальное смещение сетки и тем самым на процесс диспергирования размещенной на ней бумажной массы. Величина вакуума растет в диапазоне значений горизонтальной координаты от 0 до X_K , соответствующего критическому углу сбегавшего водяного клина

$$wt_k = 3 \sqrt{\frac{2kH_m}{Rv} \frac{C - C_0}{C_0 - C_m}}, \quad (1.68)$$

где k – коэффициент фильтрации бумажной массы;
 C – концентрация осевшего слоя волокна;
 C_m – концентрация оборотной воды;
 C_0 – концентрация над осью валика;
 H_m – максимальный фильтрационный напор.

Максимальный фильтрационный напор не может превышать давление насыщенных паров волокнистой суспензии $S_{ин}$

$$H_{\max} = \frac{v^2}{2g} \quad \text{при} \quad \frac{v}{2g} < S_{ин}. \quad (1.69)$$

С учетом (1.69) выражение (1.68) преобразуется к виду

$$wt_k = \sqrt[3]{\frac{kv}{2g} \frac{C - C_0}{C - C_m}}. \quad (1.70)$$

Величина вакуума в зоне действия обезвоживающего элемента может быть рассчитана по формуле

$$H(x) = \frac{Rv \left[\arcsin \left(\frac{x}{R} \right) \right]^2 \frac{C_0 - C_m}{C - C_0}}{2k} \quad \text{при} \quad 0 < x < x_k. \quad (1.71)$$

После достижения максимального значения в точке, соответствующей критическому углу сбегающего клина, вакуум убывает и стремится к нулю в точке, соответствующей углу $2wt_k$, таким образом

$$H(x) = \frac{Rv \left(\arcsin \frac{x_k}{R} \right) - \left(\arcsin \frac{x}{R} \right)}{\arcsin \frac{x_k}{R}} \quad \text{при} \quad x_k < x < x_f. \quad (1.72)$$

Значения x_k , x_f находятся из выражений

$$x_k = R \sin wt_k,$$

$$x_f = R \sin 2wt_k.$$

Распределение вынуждающей силы $f(x)$ вдоль горизонтальной координаты имеет вид

$$f(x) = \delta H(x)I,$$

где δ - коэффициент размерности; I - ширина сетки; $H(x)$ - фильтрационный напор, определяемый из выражений (1.71) и (1.72).

С целью определения возможности применения разработанной математической модели, описывающей градиенты в слое бумажной массы, прилежащем к сетке, для оптимизации процесса формирования структуры отливаемого бумажного полотна проводились численные исследования вертикальных смещений формирующей сетки под действием обезвоживающих элементов на примере регистра валика, а также градиентов сдвига, возникающих в слое бумажной массы, прилежащем к сетке.

Расчеты проводились для формирующего устройства экспериментальной бумагоделательной машины, характеризующегося следующими конструктивными и технологическими параметрами:

- ширина сетки №16 – 0,6 м;
- скорость машины – 3,33-9,99 м/с;
- натяжение сетки – 2500-3500 Н/м;
- рабочая суспензия – суспензия бумаги писчей № 2;
- концентрация бумажной массы 1,36-3,49 %;
- высота слоя обезвоживаемой массы $(5,96-1,98) \cdot 10^{-3}$ м.

Исследовалось влияние на величину смещений сетки и скорости сдвига в потоке волокнистой суспензии следующих параметров:

- расстояние между конструктивными элементами сеточного стола;
- натяжение сетки;
- скорости машины;
- концентрация и высота слоя обезвоживаемой бумажной массы в зоне действия обезвоживающего элемента;
- коэффициент фильтрации бумажной массы.

Полученные расчетные данные представлены на рис.7-10.

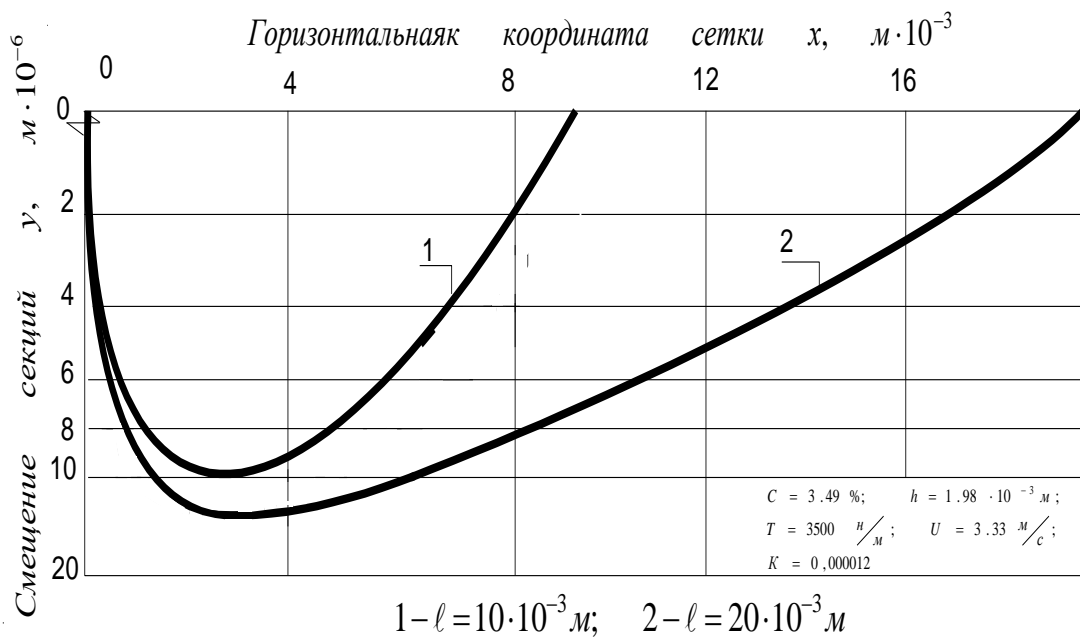


Рис.7. Влияние расстояния между обезвоживающими элементами на профиль смещения сетки

Анализ результатов расчета профиля смещений сетки при увеличении расстояния между конструктивными элементами сеточного стола от $10 \cdot 10^{-3}$ м до $20 \cdot 10^{-3}$ м свидетельствует об увеличении прогиба сетки (рис.7) и, как следствие, об увеличении градиентов сдвига в слое бумажной массы, прилежащем к сетке.

Таким образом, перемещением дефлектора относительно оси регистрового валика регулируются величины скоростей сдвига в потоке бумажной массы в зоне формования и создаются предпосылки для выработки бумажного полотна требуемой структуры.

Анализ профилей смещения формирующей сетки при изменении ее натяжения от 3500 Н/м до 2500 Н/м дает основание заключить, что увеличение натяжения сетки способствует уменьшению прогиба сетки и градиентов сдвига в потоке бумажной массы, однако, это уменьшение незначительно в рассмотренном диапазоне натяжения сетки.

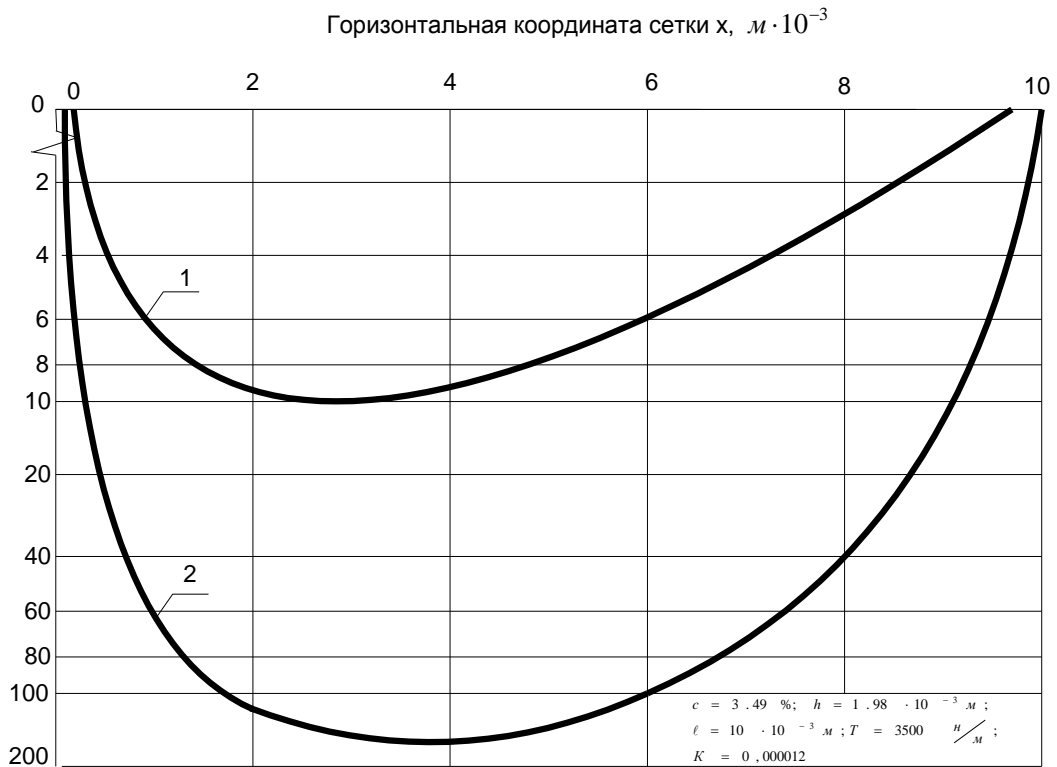


Рис.8. Влияние скорости бумагоделательной машины на профиль смещения сетки

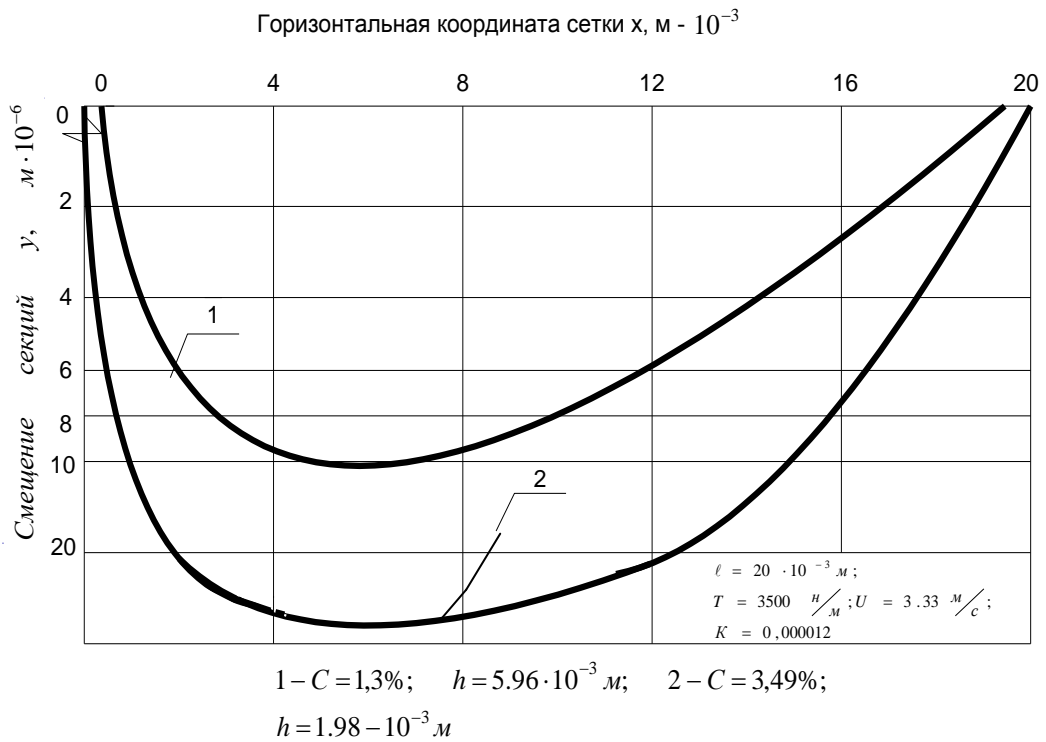


Рис.9. Влияние высоты слоя массы и ее концентрации на профиль смещения сетки



Рис.10. Влияние коэффициента фильтрации бумажной массы на профиль смещения сетки

Так как к натяжению сетки предъявляются жесткие требования в период эксплуатации БДМ, то управление смещением сетки путем изменения ее натяжения не представляется целесообразным.

Увеличение скорости бумагоделательной машины способствует интенсивной диспергации бумажной массы вследствие увеличения глубины и зоны действия вакуума, создаваемого обезвоживающими элементами сеточного стола. Однако в ряде случаев возможен отрыв потока бумажной массы от сетки, что приводит к дефектам формования.

Для устранения этого нежелательного явления необходимо регулировать величину смещения сетки, например, приближением дефлектора при использовании в качестве обезвоживающих элементов регистровых валиков. Расчетные данные, представленные на рис.8, показывают значительное увеличение смещений формирующей сетки (при повышении скорости машины с 3,33 м/с до 9,99 м/с максимальный прогиб сетки увеличился более чем в 15 раз) и рост градиентов сдвига в потоке ориентировочно на порядок.

Влияние высоты слоя бумажной массы и концентрации волокон в потоке на профиль смещения сетки и величины градиентов сдвига в потоке на профиль смещения сетки и величины градиентов сдвига в потоке целесообразно рассматривать во взаимодействии, поскольку с уменьшением высоты слоя бумажной массы на сетке происходит увеличение концентрации волокон. Несмотря на то, что глубина вакуума по мере обезвоживания бумажной массы увеличивается, зона его действия уменьшается формулы (1.68)-(1.72) и в итоге уменьшается величина вынуждающей силы, воздействующей на сетку БДМ, при сохранении прочих равных условий. Результатом является уменьшение величины максимального прогиба почти в 4 раза при уменьшении высоты слоя бумажной массы от $5,96 \cdot 10^{-3}$ м до $1,98 \cdot 10^{-3}$ м и увеличении средней концентрации волокон над осью валика от 1,3% до 3,49%. Градиенты сдвига в потоке при этом возрастают в 30-40 раз. Однако следует учитывать, что при увеличении концентрации бумажной массы прочность волокнистой структуры растет.

Распределение максимальных градиентов сдвига в потоке обезвоживаемой бумажной массы вдоль сеточного стола представлено в табл.1. Приведенные данные свидетельствуют о росте градиентов сдвига в потоке к концу зоны обезвоживания. Водоотдача различных видов бумажных масс характеризуется коэффициентом фильтрации. Как следует из формул (1.70) и (1.71), при увеличении коэффициента фильтрации бумажной массы увеличивается зона вакуума с одновременным уменьшением максимальной глубины вакуума. Результаты расчетов для значений коэффициента фильтрации $K = 0,000012$ и $K = 0,000085$ дают основание сделать следующие выводы: при использовании бумажной массы, легче отдающей воду, увеличиваются величины вертикальных смещений сетки за счет увеличения зоны вакуума и повышения значений результирующей величины вынуждающей силы (величины смещений увеличивались почти вдвое). Однако градиенты сдвига в потоке, прилежащем к сетке, имеют большие значения в случае обезвоживания бумажной массы, хуже отдающей воду ($K = 0,000012$), как это следует из данных, приведенных в табл.1.

Таблица 1

Изменение максимальных скоростей деформации вдоль сеточного стола

Номер валика	Высота слоя массы $h, 10^{-3} \text{ м}$	Концентрация, %	Скорость сдвига, 1/с	
			$T = 3500 \text{ Н/м}$	$T = 2500 \text{ Н/м}$
5	5,96	1,3	38,5	105
6	4,42	1,6	43,9	119
7	3,99	1,86	49,0	133
8	3,04	2,05	52,9	143
9	2,60	2,25	57,5	155
10	2,38	2,44	62,6	169
11	2,24	2,6	67,7	183
12	2,15	2,79	108	292
13	2,000	3,03	122	329
14	1,80	3,49	338	912

Следовательно, с увеличением водоотдачи бумажной массы прогиб сетки увеличивается, но обезвоживание осуществляется более плавно и распределение вынуждающей силы таково, что градиенты сдвига в потоке характеризуются гораздо меньшими значениями.

Таким образом, при обезвоживании бумажной массы с повышенной водоотдачей вероятность возникновения повторной флокуляции волокон на сеточном столе возрастает.

Анализ результатов численного исследования позволяет сделать следующие выводы:

- повышение скорости бумагоделательной машины способствует увеличению диспергирующей способности сеточного стола;
- изменением расстояния между конструктивными элементами сеточного стола обеспечивается возможность регулирования диспергирующего воздействия обезвоживающих элементов формирующего устройства на бумажную массу;
- по мере обезвоживания бумажной массы в зоне формирования с повышением концентрации волокон, уменьшением водоотдачи волокнистой суспензии возрастают градиенты сдвига в бумажной массе, размещенной на сетке.

1.3.3. Аналитическое исследование вертикальных колебаний сетки под действием виброактиватора

Обезвоживание бумажной массы в начальной зоне формования сеточного стола бумагоделательной машины сопровождается возникновением импульсов давления и вакуум-импульсов при взаимодействии обезвоживающих элементов с сеткой, приводящих к вертикальным смещениям сетки и возникновению в потоке пульсаций давления, диспергирующих бумажную массу. Регулирование величины импульса давления и вакуум-импульса традиционных обезвоживающих элементов, таких как регистровые валики и гидропланки, ограничено конструктивными параметрами бумагоделательной машины, ее скоростью и геометрией обезвоживающих элементов.

В практике целлюлозно-бумажного производства находят широкое применение конструкции формующих устройств, в которых для обеспечения более равномерного распределения волокон, лучшего их переплетения, повышения прочности бумаги в поперечном направлении используются различные виброактиваторы. Применение виброактиваторов позволяет управлять вертикальными смещениями сетки и создает предпосылки для выработки бумажного полотна с требуемой структурой.

В зависимости от высоты слоя обезвоживаемой бумажной массы, ее реологических характеристик, конструктивных параметров формующего устройства в зоне виброактивации турбулизирующее воздействие виброактиватора на бумажную массу может изменяться по высоте потока. Турбулентные вихри могут распространяться на весь поток по высоте без существенного затухания их энергии или воздействовать лишь на слой осевших на сетке волокон. Поэтому актуальной является задача аналитического исследования вертикальных смещений сетки под действием виброактиватора (например, вибропланки) с учетом натяжения

сетки, ее материала и количества обезвоживаемой массы в зоне виброактивации.

Для описания вертикальных колебаний сетки с размещенной на ней бумажной массой под действием вибропланки (рис.11) принимаем уравнение баланса сил

$$\frac{d}{dt} \left[\rho(x) \frac{dy(x,t)}{dt} \right] = T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}, \quad (1.73)$$

где y – вертикальная координата сетки;

x – горизонтальная координата сетки;

T – натяжение сетки;

$\rho(x)$ – функция, описывающая зависимость удельной плотности сетки с бумажной массой от продольной координаты;

t – время.

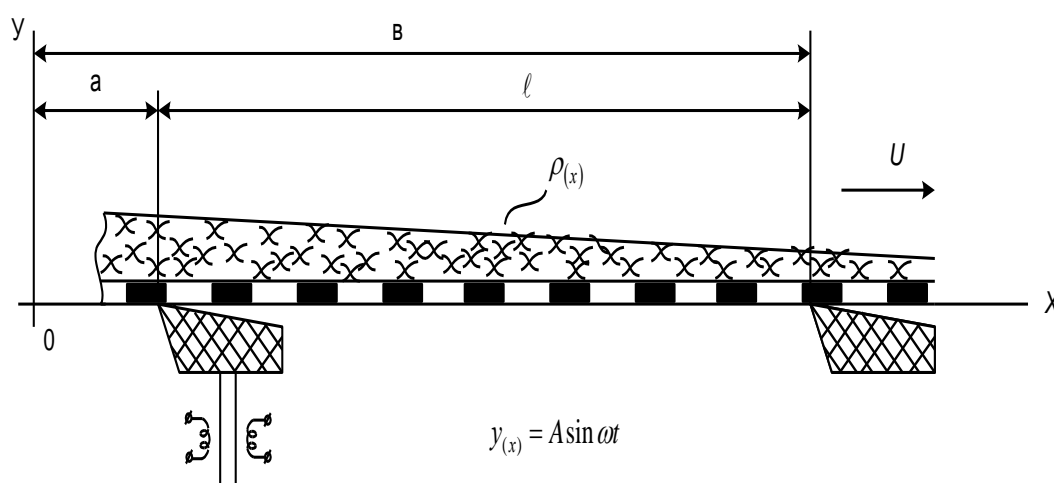


Рис.11. Расчетная схема воздействия вибропланки на формирующую сетку

На расчетной схеме приняты следующие обозначения: a – расстояние от начала координат до места установки вибропланки; b – расстояние от начала координат до ближайшего к вибропланке обезвоживающего элемента в положительном направлении по координате; l – расстояние от вибропланки до ближайшего обезвоживающего элемента.

Скорость бумагоделательной машины будем считать постоянной $V = const$. Ограничимся изучением установившихся колебаний.

В уравнение (1.53) подразумевается

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial x}.$$

Для решения уравнения (1.73) зададимся краевыми условиями в виде

$$\begin{cases} y(a,t) = A \sin \omega t; \\ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}(b,t) = 0 \end{cases}, \quad (1.74)$$

где A – амплитуда колебаний вибропланки;

ω – частота колебаний.

Первое выражение в системе уравнений (1.74) означает силовое воздействие вибропланки на сетку по линии контакта, а второе накладывает условие отсутствия изломов на ближайшем к вибропланке обезвоживающем элементе.

Проводим обезразмеривание

$$\begin{cases} u = \frac{x-a}{l}, \\ \tau = \frac{vt}{l}, \\ z = \frac{y}{A}, \\ B(u) = \beta^2(u) = \frac{\rho(x)v^2}{T}, \\ w_* = \frac{wl}{v}, \end{cases} \quad (1.75)$$

тогда задача преобразуется к виду

$$\frac{d}{d\tau} \left[B(u) \frac{dz}{d\tau} \right] = \frac{\partial^2 z}{\partial u^2}, \quad (1.76)$$

где

$$\begin{cases} \frac{d}{d\tau} = \frac{\partial}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial u}, \\ z(0, \tau) = \sin w_* \tau, \\ \frac{\partial^2 z}{\partial u^2}(1, \tau) = 0. \end{cases} \quad (1.77)$$

Периодическое решение будем искать в виде

$$z(u, \tau) = a(u) \cos w_* \tau + b(u) \sin w_* \tau, \quad (1.78)$$

Подставляя (1.78) в (1.76)-(1.77), получаем

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial u} \left[B(u) \frac{\partial a(u)}{\partial u} \right] + w_* \frac{\partial}{\partial u} [B(u)b(u)] + w_* B(u) \frac{\partial b(u)}{\partial u} - \\ - w_*^2 B(u)a(u) = \frac{\partial^2 a}{\partial u^2}, \\ \frac{\partial}{\partial u} \left[B(u) \frac{\partial b(u)}{\partial u} \right] - w_* \frac{\partial}{\partial u} [B(u)a(u)] - w_* B(u) \frac{\partial a(u)}{\partial u} - \\ - w_*^2 B(u)b(u) = \frac{\partial^2 b(u)}{\partial u^2}, \end{cases} \quad (1.79)$$

$$\begin{cases} a(0) = 0, \\ b(0) = 1, \\ a''(1) = 0, \\ b''(1) = 0. \end{cases} \quad (1.80)$$

Системы уравнений (1.79)-(1.80) решаются численно с использованием вычислительной техники. Исследуя случай установки вибропланки в конце зеркала залива сеточного стола, где обезвоживание бумажной массы незначительно, можно ограничиться решением системы уравнений (1.79)-(1.80) в первом приближении.

Введем параметр δ , зависящий от фильтрационных свойств бумажной массы в зоне действия виброактиватора.

Предположим

$$B(u) = B_0(1 - \delta u), \quad (1.81)$$

где $\delta > 0$ – малый параметр;

$$B_0 = \beta_0^2 = B(0) = \beta^2(0),$$

тогда величины $a(u)$ и $b(u)$ можно рассчитать по формулам

$$\begin{cases} a(u) = a_0(u) + \delta a_1(u) + \dots, \\ b(u) = b_0(u) + \delta b_1(u) + \dots \end{cases} \quad (1.82)$$

Подставляя (1.81)-(1.82) в (1.79)-(1.80), получаем

$$\begin{cases} B_0 [a_0''(u) + 2w_* b_0'(u) - w_*^2 a_0(u)] - a_0''(u) = 0, \\ B_0 [b_0''(u) - 2w_* a_0'(u) - w_*^2 b_0(u)] - b_0''(u) = 0, \end{cases} \quad (1.83)$$

$$\begin{cases} a_0(0) = 0, \\ b_0(0) = 0, \\ a_0''(1) = 0, \\ b_0''(1) = 0. \end{cases} \quad (1.84)$$

$$\begin{cases} B_0[a_1''(u) + 2w_*b_1'(u) - w_*^2a_1(u)] - a_1''(u) = B_0[a_0'(u) + w_*b_0(u)] + \\ + B_0u[a_0''(u) + 2w_*b_0' - w_*^2a_0(u)], \\ B_0[b_1''(u) - 2w_*a_1'(u) - w_*^2b_1(u)] - b_1''(u) = B_0[b_0'(u) - w_*a_0(u)] + \\ + B_0u[b_0''(u) - 2w_*a_0' - w_*^2b_0(u)], \end{cases} \quad (1.85)$$

$$\begin{cases} a_1(0) = 0, \\ b_1(0) = 0, \\ a_1''(0) = 0, \\ b_1''(1) = 0. \end{cases} \quad (1.86)$$

Общее решение системы уравнений (1.83) имеет вид:

$$\begin{cases} a_0(u) = c_1 \cos \mu_1 u + c_2 \sin \mu_1 u + c_3 \cos \mu_2 u - c_4 \sin \mu_2 u, \\ b_0(u) = c_2 \cos \mu_1 u - c_1 \sin \mu_1 u + c_4 \cos \mu_2 u + c_3 \sin \mu_2 u \end{cases} \quad (1.87)$$

где

$$\mu_1 = \frac{\beta_0 w_*}{1 - \beta_0}, \quad (1.88)$$

$$\mu_2 = \frac{\beta_0 w_*}{1 + \beta_0}.$$

Учитывая в (1.87) краевые условия (1.84), получаем:

$$\begin{cases} \Delta = \mu_1^4 + \mu_2^4 - 2\mu_1^2\mu_2^2 \cos(\mu_1 + \mu_2) \\ \Delta_1 = \mu_1\mu_2 \sin(\mu_1 + \mu_2) \\ \Delta_2 = \mu_2^4 - \mu_1^2\mu_2^2 \cos(\mu_1 + \mu_2) \\ c_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} \\ c_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} \\ c_3 = -c_1 \\ c_4 = 1 - c_2 \end{cases} \quad (1.89)$$

Общее решение системы (1.85) с учетом (1.87) имеет вид

$$\begin{cases} a_1(u) = p_1(u)\cos \mu_1 u - p_2(u)\sin \mu_1 u - p_3(u)\cos \mu_2 u - p_4(u)\sin \mu_2 u, \\ b_1(u) = -p_2(u)\cos \mu_1 u - p_1(u)\sin \mu_1 u + p_4(u)\cos \mu_2 u - p_3(u)\sin \mu_2 u \end{cases} \quad (1.90)$$

где

$$\begin{cases} p_1(u) = c_5 - c_1 \frac{(1-b_0)}{4} u + c_2 \frac{\mu_1^2}{2(\mu_1 + \mu_2)} u^2, \\ p_2(u) = c_6 + c_2 \frac{(1-b_0)}{4} u + c_1 \frac{\mu_1^2}{2(\mu_1 + \mu_2)} u^2, \\ p_3(u) = c_7 + c_3 \frac{(1-b_0)}{4} u + c_4 \frac{\mu_2^2}{2(\mu_1 + \mu_2)} u^2, \\ p_4(u) = c_8 + c_4 \frac{(1-b_0)}{4} u + c_3 \frac{\mu_2^2}{2(\mu_1 + \mu_2)} u^2. \end{cases} \quad (1.91)$$

Учитывая в (1.90), (1.91) краевые условия (1.86), находим c_5 , c_6 , c_7 , c_8 :

$$\left\{ \begin{array}{l}
Q_1 = \left[\frac{\mu_1^2(1-b_0)}{4} - \frac{2\mu_1^3}{\mu_1 + \mu_2} \right], \\
Q_2 = \left[\frac{\mu_1^2}{\mu_1 + \mu_2} - \frac{\mu_1(1-b_0)}{2} - \frac{\mu_1^4}{2(\mu_1 + \mu_2)} \right], \\
Q_3 = \left[\frac{\mu_2^2(1-b_0)}{4} - \frac{2\mu_2^3}{\mu_1 + \mu_2} \right], \\
Q_4 = \left[\frac{\mu_2(1-b_0)}{2} - \frac{\mu_2^2}{\mu_1 + \mu_2} + \frac{\mu_2^4}{2(\mu_1 + \mu_2)} \right], \\
R_1 = c_1 Q_1 + c_2 Q_2, \\
R_2 = -c_1 Q_2 + c_2 Q_1, \\
R_3 = c_3 Q_3 + c_4 Q_4, \\
R_4 = c_3 Q_4 - c_4 Q_3, \\
D_1 = R_1 \cos \mu_1 + R_2 \sin \mu_1 + R_3 \cos \mu_2 + R_4 \sin \mu_2, \\
D_2 = R_2 \cos \mu_1 - R_1 \sin \mu_1 - R_4 \cos \mu_2 + R_3 \sin \mu_2, \\
\Delta_5 = D_1 (\mu_1^2 \cos \mu_1 - \mu_2^2 \cos \mu_2) - D_2 (\mu_1^2 \sin \mu_1 + \mu_2^2 \sin \mu_2), \\
\Delta_6 = -D_1 (\mu_1^2 \sin \mu_1 + \mu_2^2 \sin \mu_2) - D_2 (\mu_1^2 \cos \mu_1 - \mu_2^2 \cos \mu_2), \\
c_5 = \frac{\Delta_5}{\Delta}, \\
c_6 = \frac{\Delta_6}{\Delta}, \\
c_7 = c_5, \\
c_8 = c_6.
\end{array} \right. \tag{1.92}$$

В результате получаем аналитические зависимости, описывающие вертикальные колебания формующей сетки при указанных краевых условиях.

2. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ОТЛИВА И ФОРМОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ ПОТОКА И КАЧЕСТВО ВЫРАБАТЫВАЕМОЙ БУМАГИ

Волокнистая суспензия очень низкой концентрации обезвоживается на сеточной части бумагоделательной машины, превращаясь во влажное бумажное полотно сухостью 17-21 %. В зависимости от вида вырабатываемой продукции концентрация суспензии, подаваемой из напорного ящика, составляет 0,1-1,3 %. Получаемое полотно бумаги, обладающее достаточной механической прочностью, передается для дальнейшего обезвоживания в прессовую часть машин. Процесс фильтрации воды из волокнистой суспензии и формирование полотна происходит на относительно коротком участке сеточного стола и является определяющим в получении бумажного полотна с требуемыми физико-механическими показателями. Дефекты формования не могут быть исправлены на последующих этапах технологического процесса и остаются в бумаге как дефекты ее производства.

2.1. Формование бумаги на сеточном столе бумагоделательной машины

На качество формования бумаги на сеточном столе большое влияние оказывают реологические характеристики используемой бумажной массы, отношение скорости напуска массы к скорости движения сетки, интенсивность обезвоживания.

Исследования влияния конструктивных особенностей массонапускных и формирующих устройств на структуру вырабатываемой бумаги, проведенные А. Майнике [5], приведены на рис.12.

На экспериментальной бумагоделательной машине вырабатывалась бумага с использованием как традиционных

напорных ящиков с перфорированными валами, так и высокотурбулентных напорных ящиков. В ходе эксперимента контролировался уровень флокулообразования в потоке бумажной массы, подаваемой на сеточный стол, а также качество формования бумаги. Анализ полученных результатов показывает, что поток, подаваемый из напорного ящика с перфорированными валами, характеризуется при более интенсивном хлопьеобразовании наличием более крупных флокул по сравнению с высокотурбулентным напорным ящиком. Различие между спектрами формования менее значительное, что объясняется вторичным флокулообразованием на сетке в процессе формования листа. В рассматриваемом случае участок обезвоживания был относительно небольшим – около 2,5 м. Если этот участок был бы длиннее, что характерно для плоскосеточных машин, различия в формовании были бы еще менее значительными в связи с развитием в зоне формования повторной флокуляции бумажной массы, определяемой ее реологическими характеристиками.

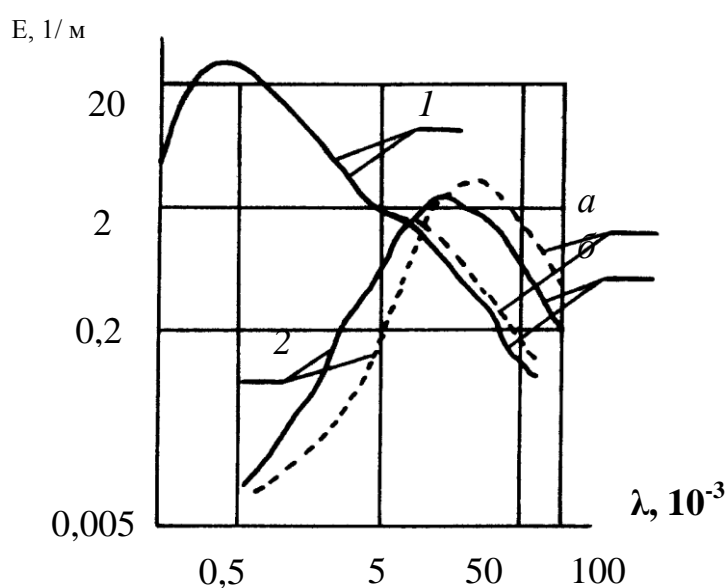


Рис.12. Спектры формования (1) и флокуляции (2) при использовании напорных ящиков: а – с перфорированными валиками; б – высокотурбулентного

На качество формования бумаги на плоскосеточной машине

значительное влияние оказывает соотношение скоростей напуска массы и сетки бумагоделательной машины. В зависимости от вида вырабатываемой продукции оптимальное соотношение для плоскосеточных машин составляет 0,9-1,1 (рис.13 а).

При двухсеточном формовании соотношение скоростей напуска и сеток также определяет эффективность формования. С увеличением этого соотношения формование бумаги улучшается (рис.13 б). Различие скоростей напускаемой бумажной массы и сетки вызывает перепад скоростей по высоте потока в зоне отлива и формования, возникающие при этом касательные напряжения способствуют дефлокуляции бумажной массы.

В то же время разность скоростей напуска массы и сеток как для плоскосеточных, так и для двухсеточных формующих устройств является причиной ориентации волокон в потоке бумажной массы в зоне отлива и формования, что проявляется в анизотропии ряда физико-механических показателей бумаги и в том числе анизотропии ее разрывной длины.

На рис.14 показана зависимость отношения разрывной длины бумаги в продольном и поперечном направлениях от соотношения скоростей напуска массы и сетки бумагоделательной машины. Изменяя соотношение скоростей напуска массы и сетки, можно в значительных пределах изменять степень анизотропии бумажного полотна, которая в конечном итоге определяется ориентацией волокон в структуре сформированного листа.

По конструктивным соображениям струя нередко подается на сетку не тангенциально, а под углом, хотя и небольшим. Вследствие этого струя создает давление на сетку и часть ее кинетической энергии превращается в энергию давления. Струя должна подаваться на сеточный стол непосредственно перед передней гранью формующего ящика. Если струя подается слишком близко к оси грудного вала, то в этом случае возможно интенсивное обезвоживание бумажной массы, нежелательное в начальной зоне формования. Чем больше угол падения струи массы, подаваемой из напускного устройства на сеточный стол, тем интенсивнее происходит обезвоживание массы в начальной зоне, так как вертикальная составляющая скоростного напора струи увеличивает фильтрационный напор.

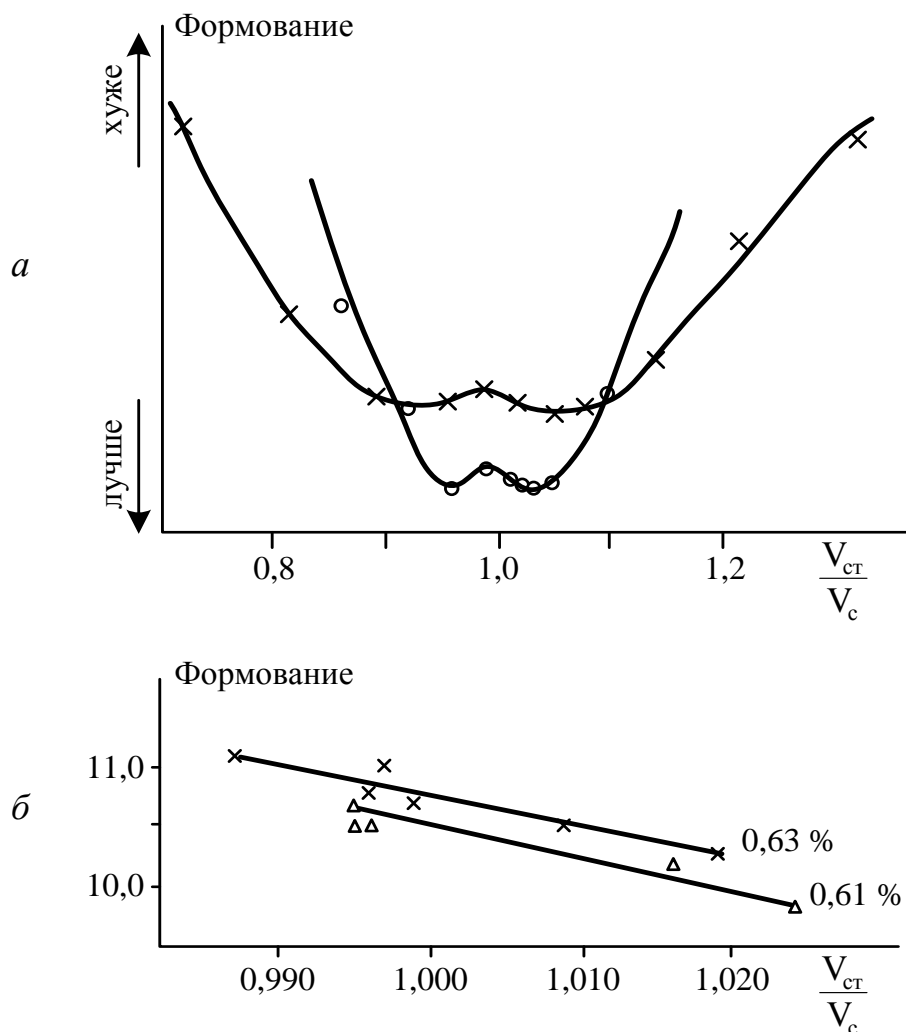


Рис.13. Влияние соотношения скоростей напуска массы и сетки на качество формования бумаги: *a* – плоскосеточное формующее устройство; *б* – формующее устройство Vel-Baie Former

При этом возможно появление обратного течения, проявляющегося в том, что небольшая часть струи, ответвляющаяся назад под воздействием сил трения и сдвига, вновь переносится вперед и, соударяясь со струей, образует волны, способные в несколько раз усилить первичные неустойчивости струи. На рис.15 показаны схемы образования обратных течений на плоскосеточных и двухсеточных формующих устройствах.

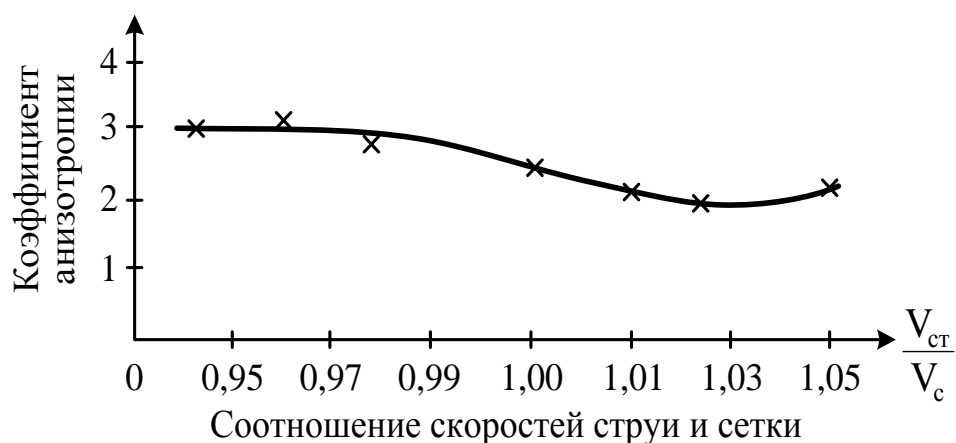


Рис.14. Влияние соотношения скоростей напуска массы и сетки на степень анизотропии бумаги

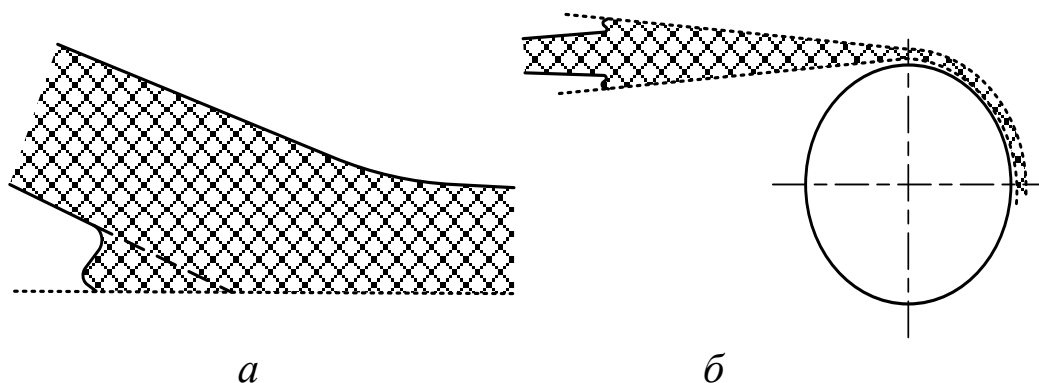


Рис.15. Образование обратных течений в зоне контакта струи: а - с плоскосеточным и б - двухсеточным формующими устройствами

Струя бумажной массы, подаваемая в зону отлива и формования, должна иметь равномерный профиль по всему сечению, в противном случае линия соударения струи с сеткой перемещается при изменении профиля струи, что приводит к колебаниям плотности бумаги.

Значительное влияние на равномерность распределения

волокон по площади листа оказывают сетки бумагоделательных машин, имеющие отчетливую и весьма грубую по сравнению с длиной волокон топографию.

Основными обезвоживающими элементами формирующих устройств современных бумагоделательных машин являются гидропланки и регистровые валики. Обезвоживание бумажной массы на регистровом валике происходит под воздействием вакуума, образующегося в «сбегающем» клине между поверхностью валика и сеткой. Часть воды, удаленной под воздействием вакуума в сбегающем клине, в виде транзитного слоя попадает в набегающий водяной клин и нагнетается сквозь сетку и осевший слой волокон, создавая импульс давления. Таким образом, обезвоживание на регистровом валике происходит под воздействием чередующихся вакуума и давления.

На рис.16 представлен сравнительный график изменения давления при обезвоживании бумажной массы на регистровом валике и гидропланках, из которого видно, что при обезвоживании на регистровом валике имеет место резкий перепад давления, в результате чего нарушается формирование бумажного полотна.

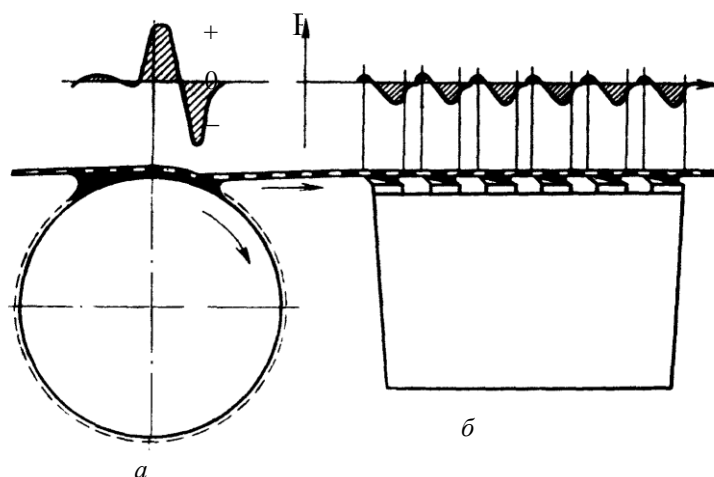


Рис.16. Изменение давления при обезвоживании
на: *a* -регистровом валике и *б*- гидропланках

При обезвоживании бумажной массы на гидропланках перепад давления примерно в 2-3 раза меньше, чем на регистровом

валике и его можно регулировать, изменяя угол или длину наклонной поверхности гидропланки. Импульсы давления, создаваемые регистровыми валиками и гидропланками, отличаются также своей продолжительностью. Импульсы давления, генерируемые регистровыми валиками, сконцентрированы, главным образом, на площади их контакта с сеткой. Относительно небольшое давление нередко возникает и непосредственно перед этой площадью (рис. 16 а). Гидропланки создают множество зон давления и вакуума на большой длине (рис. 16 б) и поддерживают в потоке массы на сетке интенсивную мелкомасштабную турбулентность.

Изменяя величину угла передней грани гидропланки, можно активно влиять на процесс формования бумажного полотна. Так, в начальной стадии отлива и формования необходимо обеспечивать умеренное удаление воды, чтобы сохранить возможность формования полотна с равномерной структурой как по ширине бумажного полотна, так и по толщине. Резкое обезвоживание в начальной зоне формования является причиной плохого удержания в полотне мелкого волокна и наполнителя, что отрицательно влияет на соотношение длинных и коротких волокон, распределение наполнителя, проклеивающих веществ и красителя.

Величина угла передней направляющей грани гидропланки (рис. 17 в) в значительной мере определяет соотношение количества воды, удаляемой из бумажной массы и находящейся на нижней поверхности сетки. Установлено, что если этот угол равен 45° , то удаляется около 85 % воды, а оставшиеся 15 % воды проходят через сетку и способствуют созданию микротурбулентности в потоке бумажной массы. Однако использование в производственных условиях гидропланок с углом наклона передней грани менее 40° не представляется целесообразным в связи с опасностью повреждения гидропланки.

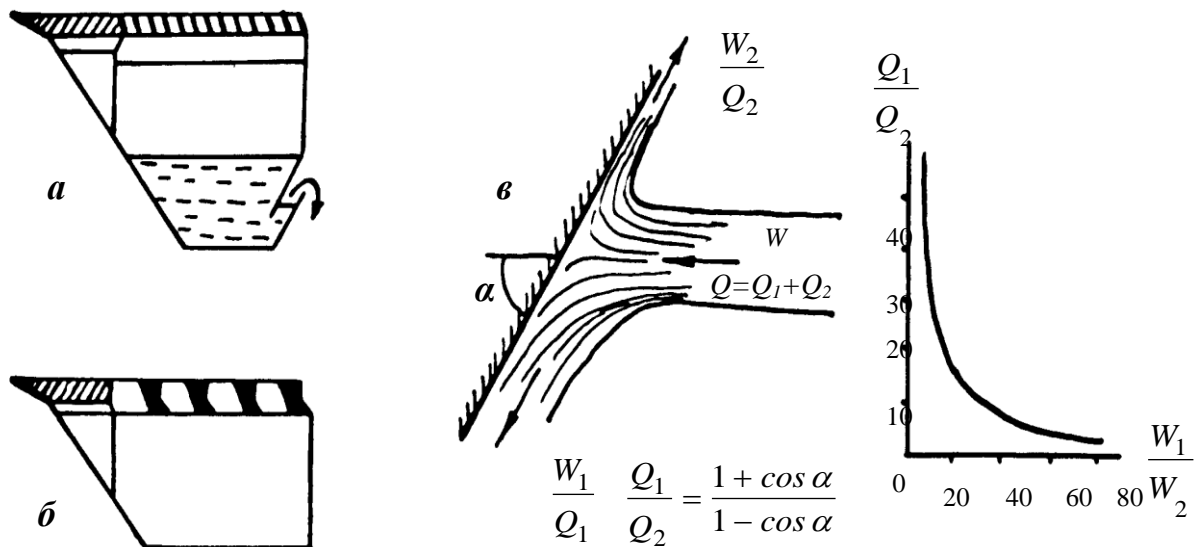


Рис.17. Мокрый отсасывающий ящик: *а* – с тонким разделением; *б* – обычный; *в* – баланс потоков на передней грани гидропланки

Воздействие направленного вверх потока воды при подходе к наклонной плоскости, как показано на рис.17, кроме угла наклона определяется также массой набегающего потока и его скоростью. При заданной скорости сетки снизить эффект обратной промывки формирующего полотна бумаги удастся лишь тогда, когда масса набегающего потока невелика. На практике это достигается использованием отсасывающих ящиков, рабочая поверхность которых образована большим количеством (15-20 штук) узких гидропланок (рис.17*а*). Для сравнения на рис.17*б* показана конструкция обычного формирующего ящика с грубым делением и относительно широкими гидропланками.

Являясь эффективными обезвоживающими элементами, мокрые отсасывающие ящики практически не создают в бумажной массе на сетке микротурбулентности. Рекомендуется устанавливать мокрые отсасывающие ящики в конце зоны формирования за гидропланками. Интенсивно обезвоживая бумажную массу, ящики уплотняют слой формируемых волокон, уменьшая эффективность работы последующих обезвоживающих элементов. Для разрыхления этого слоя между мокрыми отсасывающими ящиками рекомендуется устанавливать регистровые валики.

Индикатором структурной неоднородности бумаги может служить распределение наполнителей по толщине бумаги. При выработке бумаги на плоскосеточных машинах в связи с тем, что вода удаляется из бумажной массы лишь в одном направлении, наблюдается неравномерное распределение наполнителей и мелкого волокна по толщине полотна бумаги. Более равномерное распределение наполнителей обеспечивается при промывке бумажного полотна с помощью водяных sprays в области «сухой линии» (рис.18).



Рис.18. Влияние промывки полотна в области сухой линии на распределение наполнителей

В результате уменьшения содержания наполнителя на лицевой стороне полотна удастся стабилизировать распределение наполнителей в структуре листа бумаги.

Эффективным способом обеспечения более равномерного распределения волокон, лучшего их переплетения, повышения прочности бумаги в поперечном направлении является тряска сетки бумагоделательной машины в горизонтальной плоскости перпендикулярно направлению движения на участке между грудным валом и отсасывающими ящиками. Применение тряски способствует улучшению качественных показателей бумаги,

однако ее эффективность резко снижается с повышением скорости бумагоделательной машины свыше 250-350 м/мин. Применение механизмов тряски значительно усложняет конструкцию сеточных столов, ведет к снижению эффективности их работы.

Известно, что процесс фильтрации воды из бумажной массы и формование полотна бумаги, происходящий на сравнительно коротком участке сеточного стола, является определяющим в получении качественных показателей бумаги. В связи с этим значительный интерес представляет вопрос о влиянии на качественные показатели бумаги таких факторов, как скорость фильтрации, время пребывания бумажной массы на сетке или время задержки в процессе формования, концентрация бумажной массы. Результаты исследований, проведенных в Санкт-Петербургском государственном технологическом университете растительных полимеров [2], представлены на рис.19.

Исследования проводились на суспензии сульфатной небеленой целлюлозы марки Ж-4 со степенью помола 40⁰ШР. Скорость фильтрации изменялась от 0 до 0,7 м/с, время задержки обезвоживания – от 0 до 25 с, концентрация – от 0,5 до 3 %.

О качестве бумажного листа судили по просвету образцов бумаги в проходящем луче света диаметром $0,5 \cdot 10^{-3}$ м.

В результате установлено, что увеличение концентрации исходной суспензии и времени задержки обезвоживания приводят к ухудшению структуры бумаги; увеличение скорости фильтрации улучшает просвет бумаги.

Исследования, проведенные В.П. Барановским [6], показали, что процесс формования для получения качественного полотна должен иметь определенную продолжительность, уменьшение которой приводит в конечном итоге к снижению качества бумажного полотна. Время формования определялось с помощью экспериментальной установки, на которой обезвоживание бумажной массы проводилось при постоянном вакууме. Критерием качества бумаги была принята разрывная длина. Результаты проведенных исследований представлены на рис.20, где показана зависимость разрывной длины типографской бумаги от времени формования при различных концентрациях бумажной массы.

Анализ полученных результатов показывает, что существует предельно допустимая продолжительность формования, при

которой разрывная длина достигает своего максимального значения. Если время формирования меньше предельно допустимого, то разрывная длина также меньше, чем при времени формирования, соответствующем предельно допустимому. Если же время больше предельно допустимого, то разрывная длина остается такой же, как и при предельно допустимом времени формирования. Замечено также, что с уменьшением концентрации массы в напорном ящике разрывная длина и предельно допустимая продолжительность формирования увеличиваются.

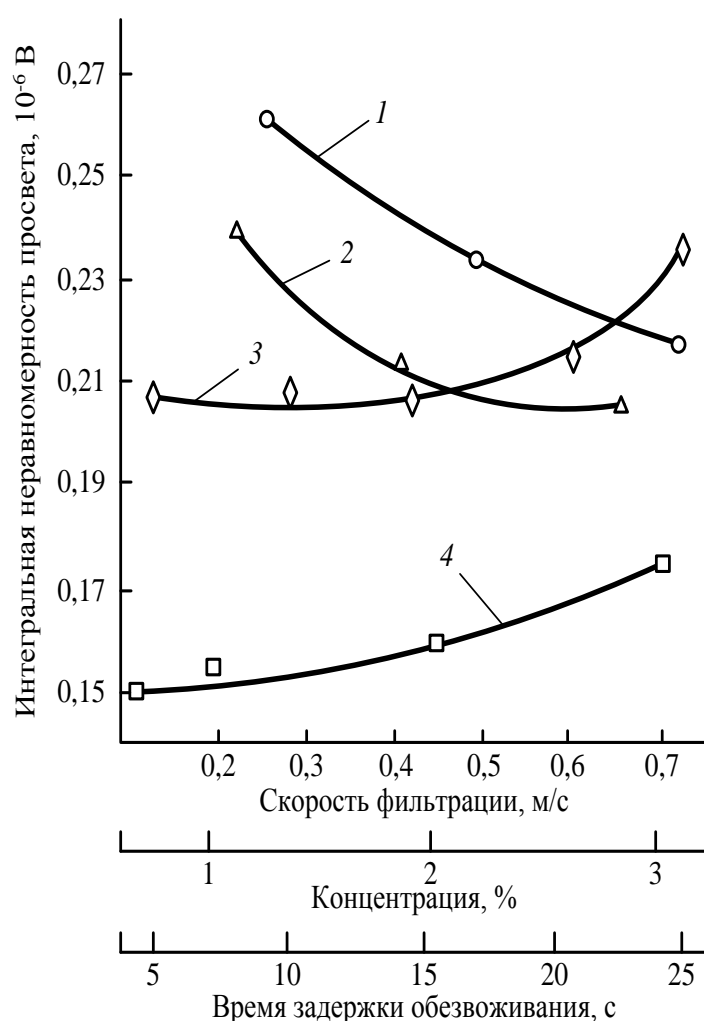


Рис.19. Влияние скорости фильтрации (1), (2), времени задержки обезвоживания (3) и концентрации (4) на интегральную неравномерность просвета: 1 – $\tau = 20$ с, $c = 3$ %; 2 – $\tau = 0$ с, $c = 3$ %; 3 – $V = 0,7$ м/с, $c = 3$ %; 4 – $\tau = 0$ с, $V = 0,7$ м/с

Таким образом, для получения качественного бумажного полотна время формования на бумагоделательной машине должно быть не меньше предельно допустимой продолжительности формования, но не больше времени флокуляции бумажной массы, определяемого ее реологическими характеристиками.

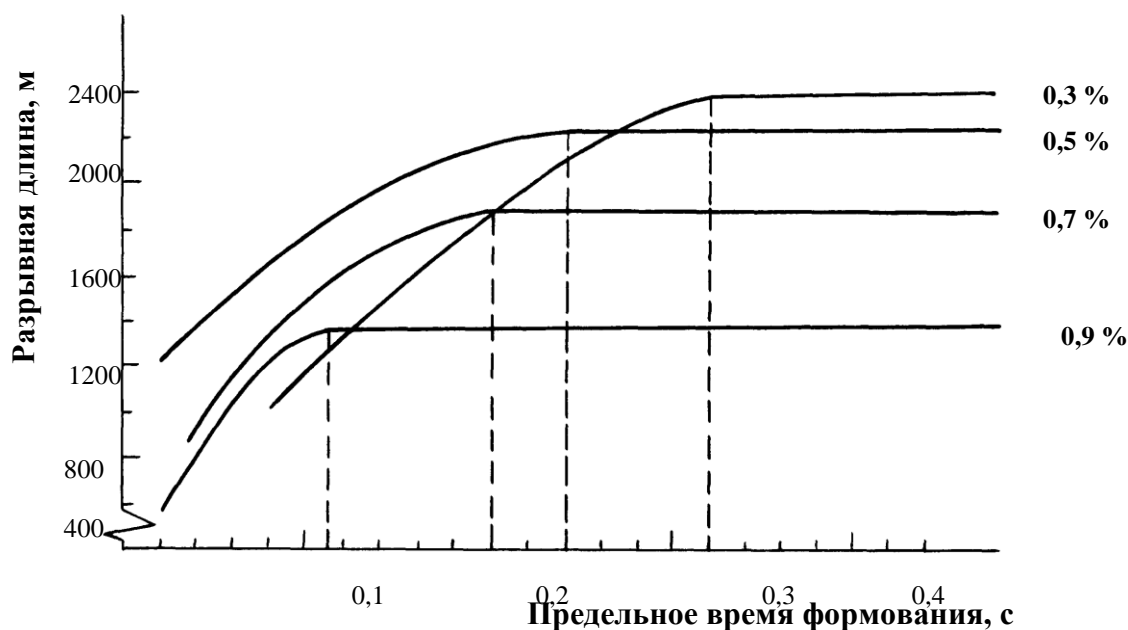


Рис.20. Влияние времени формования на разрывную длину типографской бумаги при различных концентрациях массы в напорном ящике

2.2. Влияние конструктивных элементов формирующего устройства на интенсивность турбулентности и структуру потока бумажной массы

Внутренняя структура потока бумажной массы в значительной степени определяется гидродинамическими параметрами течения, обеспечивающими диспергирование волокон и предопределяющими равномерность распределения волокон в структуре листа бумаги. Обезвоживающие элементы формирующих

устройств, расположенные в зоне отлива и формования, наряду с эффективным обезвоживанием, должны поддерживать в потоке микротурбулентный режим течения для предотвращения флокуляции и обеспечения равномерного распределения волокон в структуре бумажного листа.

Знание динамики структурообразования потока бумажной массы в зоне отлива и формования под воздействием конструктивных элементов формирующих устройств позволяет эффективно воздействовать на процесс формования бумаги путем обоснованного выбора конструктивных элементов и рациональной компоновки формирующих устройств.

Исследования процессов формирования структуры бумажного полотна под воздействием обезвоживающих элементов формирующих устройств проводились в Санкт-Петербургском государственном технологическом университете растительных полимеров [2]. Исследования проводились как на специально разработанном для этих целей экспериментальном формирующем устройстве, так и в условиях действующих бумагоделательных машин. Гидродинамические параметры потоков бумажных масс изучались с использованием комплекса контрольно-измерительной аппаратуры, включавшего пьезокерамический датчик для измерения пульсаций давления в потоке бумажной массы, датчик концентрации и датчик неравномерности просвета бумажного полотна.

Исследовались традиционные обезвоживающие элементы, такие как регистровые валы и гидропланки, конструкции которых соответствовали промышленным образцам. Формирующее устройство работало в замкнутом цикле. Отбор образцов бумаги осуществлялся после выхода формирующего устройства на требуемый режим работы с использованием съемного устройства, привод которого был синхронизирован с приводом сетки.

Анализ энергетического состояния потока массы в зоне отлива и формования при скоростях от 1,5 до 3,5 м/с (рис.21) показывает значительное увеличение пульсаций давления в зоне удара струи о сетку над грудной доской (точка б) и на гидропланках (точки в и д) по сравнению с уровнем пульсаций давления в напускной щели напорного ящика.

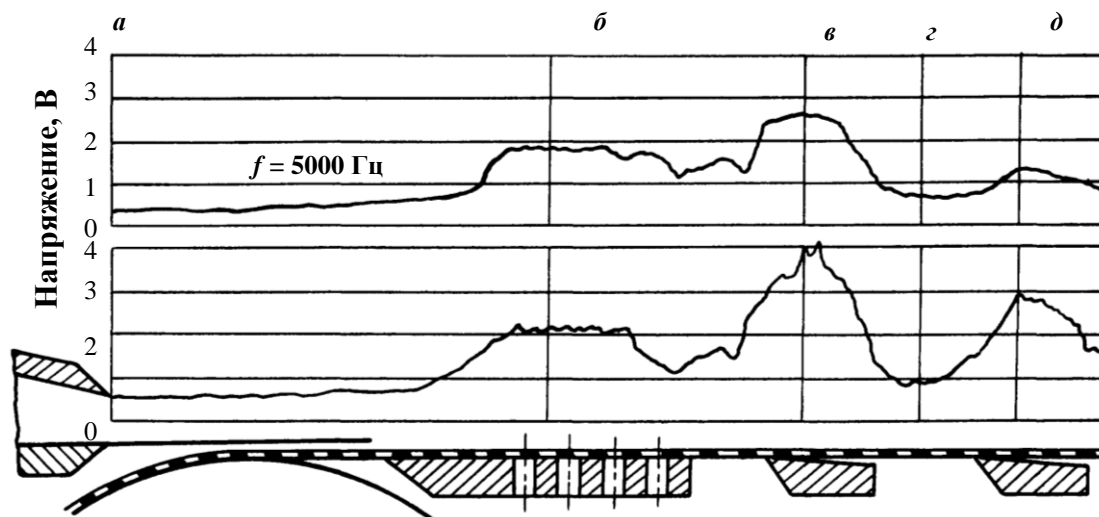


Рис.21. Изменение энергии пульсаций давления в потоке сульфитной небеленой целлюлозы в начальной зоне формования (скорость сетки 2,7 м/с; $C = 0,4\%$): *а* – напускное сечение напорного ящика; *б* – точка удара струи о сетку; *в* – первая гидропланка; *г* – участок между гидропланками; *д* – вторая гидропланка

Динамика изменения пульсационных характеристик на рассматриваемой трассе движения сульфитной небеленой целлюлозы прослеживается на примере данных, приведенных на рис.22.

Сопоставление спектральных характеристик потока бумажной массы в зоне удара струи о сетку и напускном сечении напорного ящика свидетельствует о смещении спектра пульсаций давления в область высоких частот в зоне удара струи о сетку и на обезвоживающих элементах, причем наиболее интенсивно пульсации давления проявляются в высокочастотной области порядка 5000 Гц, что соответствует длине волны $\lambda = 0,5-0,6 \cdot 10^{-3}$ м, определяющей масштаб пульсаций давления при скорости движения сетки 2,7 м/с. Профиль изменения пульсаций давления в потоке бумажной массы (рис.22) свидетельствует о наличии тесной взаимосвязи спектра пульсаций давления с топографией сетки, взаимодействующей с грудной доской и гидропланками. Определяющим условием наличия высокочастотной составляющей спектра в потоке бумажной массы является расстояние между

нитьями утка используемой формирующей сетки. При применении бронзовой сетки № 28 расстояние между нитьями утка составляет $0,55 \cdot 10^{-3}$ м.

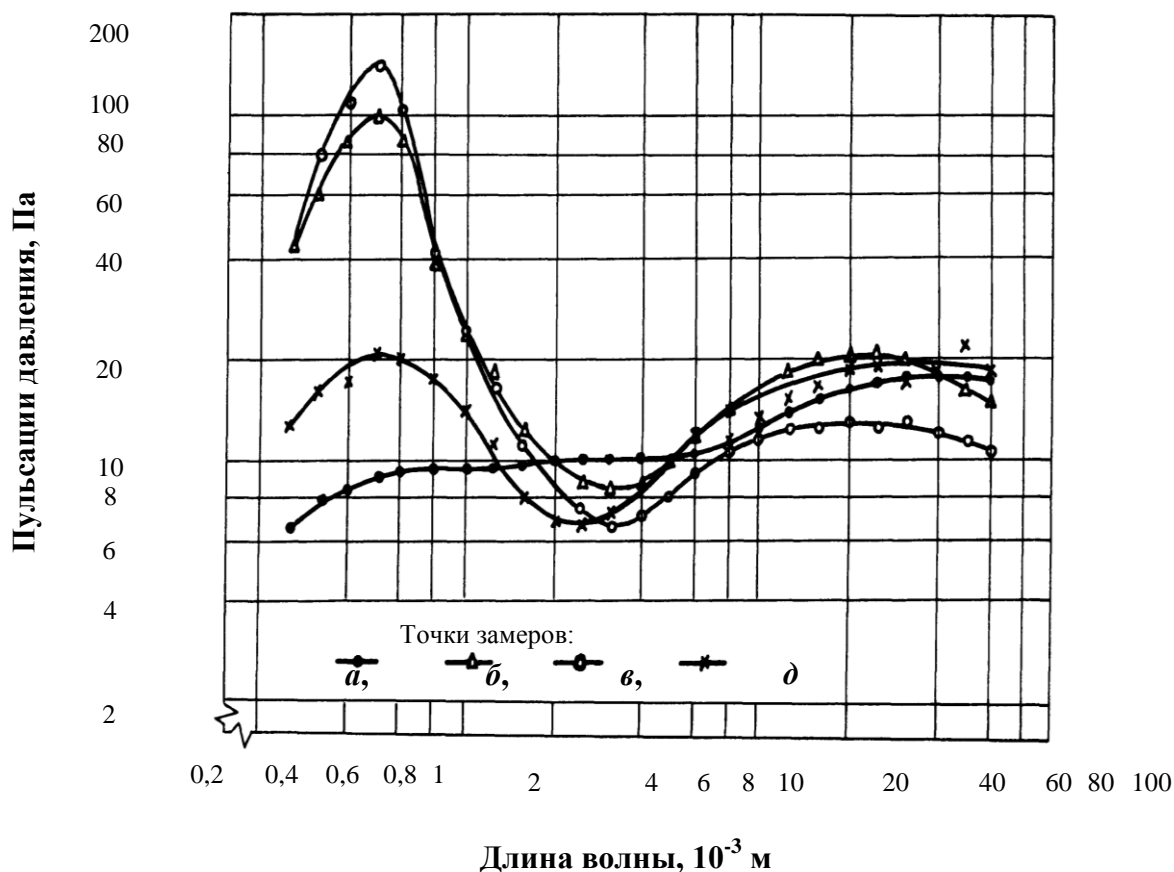


Рис. 22. Спектры пульсаций давления в потоке сульфитной небеленой целлюлозы в начальной зоне формования ($C_{Н.я.} = 0,4 \%$; скорость движения сетки 2,7 м/с)

Таким образом, характерный спектр и масштаб пульсаций давления в потоке бумажной массы может быть определен простым расчетом. Действительно, длина волны, соответствующая максимальной интенсивности пульсаций давления в высокочастотной части спектра, остается величиной постоянной при увеличении скорости, в то время как интенсивность пульсации давления в данном волновом диапазоне возрастает с повышением скорости движения сетки.

Анализ спектров пульсации давления в напускном сечении

напорного ящика, зоне удара струи о сетку и на обезвоживающих элементах показывает существенное перераспределение энергии пульсаций давления из низкочастотной области спектра в высокочастотную, что предопределяет процесс диспергирования волокон в потоке бумажной массы. На открытом участке сетки за гидропланками также наблюдается увеличение интенсивности пульсаций давления в высокочастотной области, обусловленное микроколебаниями сетки на участках между гидропланками и взаимодействием поверхности бумажной массы с воздухом.

На рис.23 показана динамика изменения интенсивности пульсаций давления в потоке бумажной массы в зоне отлива и формирования бумаги (точки *a*, *б*, *в*, *г*, *д* рис.23) при увеличении скорости движения бронзовой сетки № 28.

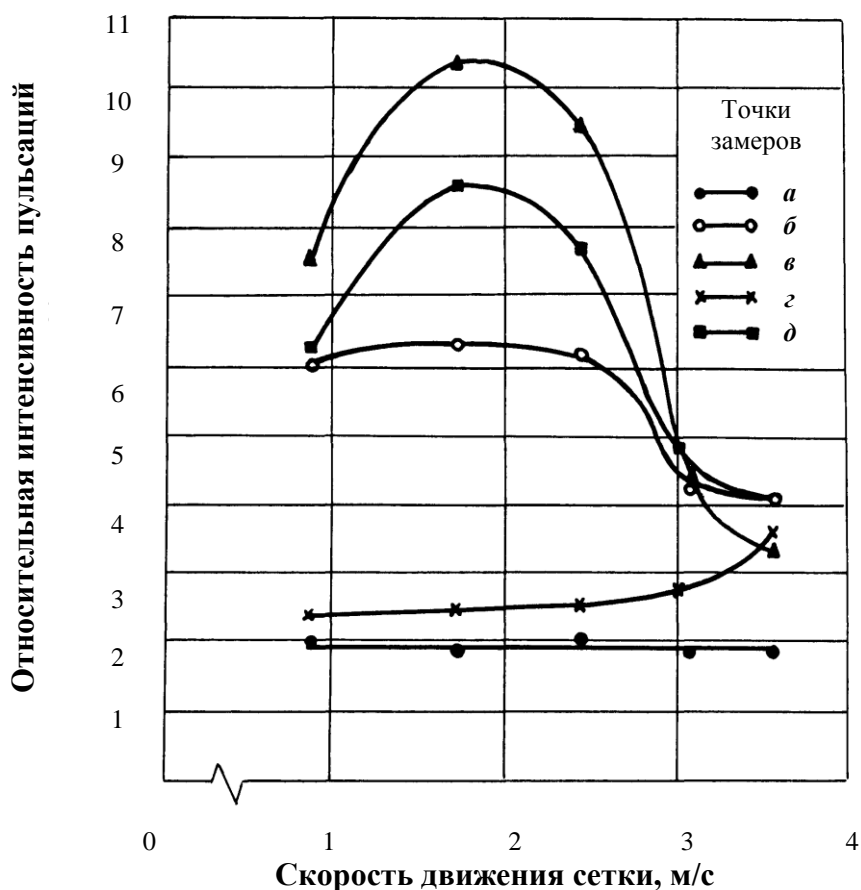


Рис.23. Изменение интенсивности пульсаций давления в потоке сульфитной небеленой целлюлозы в начальной зоне формирования при увеличении скорости машины ($C_{н.я.} = 0,4 \%$; 18^0 ШР)

Анализ представленных данных свидетельствует о более высоком уровне интенсивности пульсаций давления в начальной зоне формования в сравнении с напускным сечением напорного ящика в диапазоне скоростей от 1,83 до 3,53 м/с. Повышение интенсивности пульсаций давления на открытом участке сетки между гидропланками при скорости сетки свыше 3,53 м/с является следствием смещения зоны действия гидропланки в область открытого участка сетки. Максимальные напряжения в потоке сульфитной небеленой целлюлозы имеют место при скоростях движения сетки 2,7 м/с и составляют 2,9; 28,9; 80,4; 4,9; 55,2 Па в рассматриваемых точках *a*, *б*, *в*, *г*, *д*, соответственно. Таким образом, основными генераторами пульсаций давления на рассматриваемом участке сеточного стола являются гидропланки. Сравнение напряжений в потоке бумажной массы в напускном сечении напорного ящика (2,9 Па) с напряжениями в зоне действия гидропланки (80,4 Па) показывает, что гидропланка является интенсивным генератором высокочастотных пульсаций давления, определяющих возникновение существенных напряжений в потоке, обеспечивающих его диспергирование.

Проведено исследование воздействия регистрового валика на интенсивность и спектр пульсаций давления в потоке сульфитной небеленой целлюлозы. При проведении исследований использовалась конструкция регистрового валика, близкая по своим параметрам к конструкциям промышленных регистровых валиков. Диаметр валика с резиновым покрытием был равен $150 \cdot 10^{-3}$ м. В качестве формирующего элемента использовалась бронзовая сетка № 28. Влияние регистрового валика на поток 0,4 % сульфитной небеленой целлюлозы изучалось в диапазоне скоростей от 1,83 до 3,53 м/с, т.е. в рабочем диапазоне среднескоростных бумагоделательных машин. Для определения зоны воздействия регистрового валика осуществлялось сканирование пьезокерамическим датчиком давления потока бумажной массы на высоте $6 \cdot 10^{-3}$ м от поверхности сетки в зоне $150 \cdot 10^{-3}$ м от точки контакта регистрового валика с сеткой по ходу и против движения сетки. Максимальная интенсивность пульсаций давления в потоке бумажной массы была отмечена на расстоянии $60 \cdot 10^{-3}$ м от точки контакта регистрового валика с сеткой по ходу ее движения, где и осуществлялись все измерения.

В спектрах пульсации давлений (рис.24) преобладают низкочастотные составляющие с длиной волны $\lambda = 36 - 45 \cdot 10^{-3}$ м, энергия которых снижается с повышением скорости потока. Имеет место незначительное перераспределение энергии низкочастотных колебаний в высокочастотную область спектра.

Промышленные исследования, проведенные на бумагоделательной машине № 5 Долинского ЦБЗ, полностью подтвердили выводы, полученные в процессе работы на экспериментальном формирующем устройстве (рис.25). Установлено, что регистровые валики не являются эффективными диспергаторами, поскольку генерируемые ими пульсации давления являются низкочастотными пульсациями с длиной волны $\lambda = 36 - 45 \cdot 10^{-3}$ м.

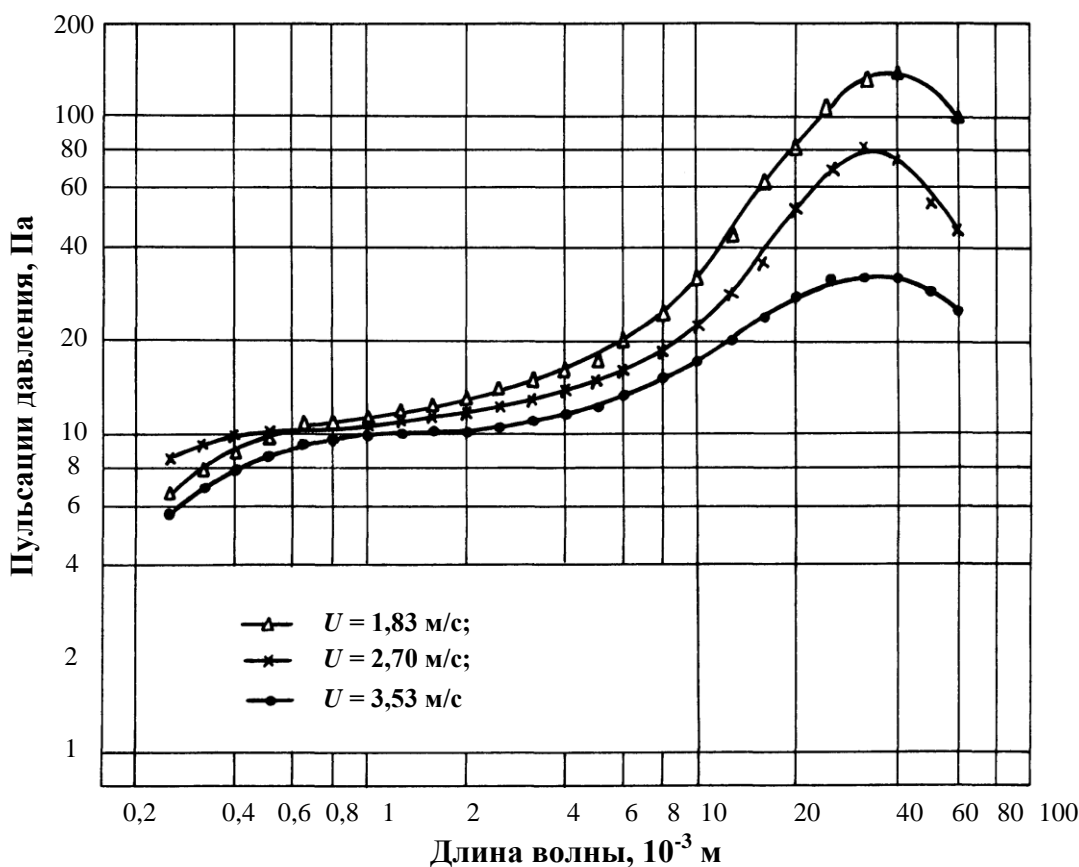


Рис.24. Спектры пульсаций давления, генерируемых в потоке сульфитной целлюлозы регистровым валиком при различных скоростях движения сетки ($C_{н.я.} = 0,4 \%$, 18^0 ШР)

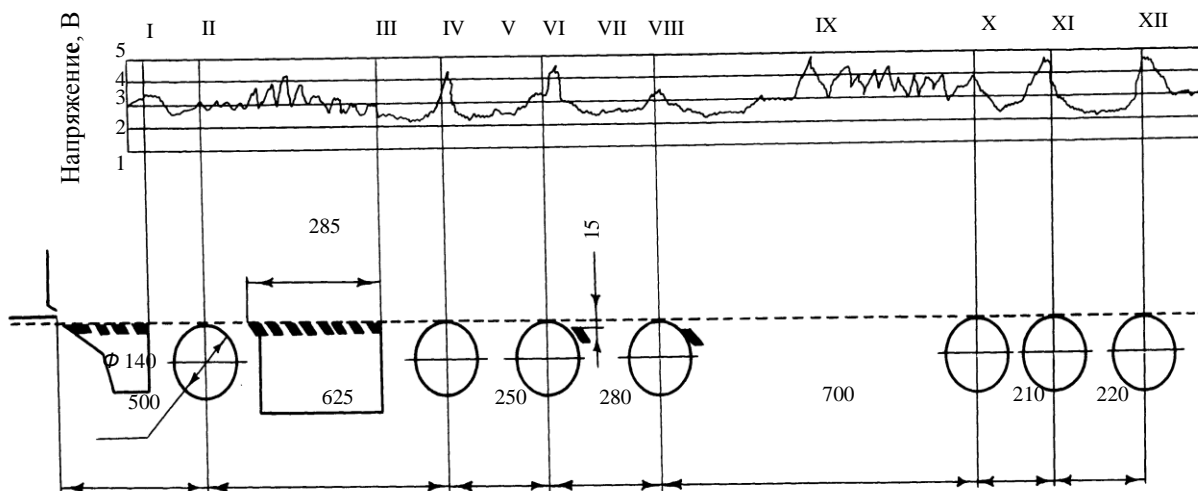


Рис.25. Влияние обезвоживающих элементов сеточного стола на энергетические характеристики потока бумажной массы

Пульсации такого масштаба не обеспечивают дефлокуляции потока и, более того, могут являться причиной колебаний массы 1 м^2 вырабатываемой бумаги.

Топография формирующей сетки оказывает существенное влияние на характер взаимодействия с обезвоживающими элементами, предопределяя гидродинамические параметры потока, находящегося в зоне воздействия.

Влияние бронзовой сетки № 16 и синтетической сетки № 16 на величину интенсивности пульсаций давления в потоке сульфитной целлюлозы над гидропланкой и регистровым валиком при изменении скорости движения сетки представлено на рис.26.

Наблюдается двукратное увеличение интенсивности пульсаций давления в потоке бумажной массы над гидропланкой при использовании бронзовой сетки по сравнению с синтетической сеткой того же номера. Синтетическая сетка, благодаря демпфирующим свойствам полиэфирных волокон, гасит высокочастотные колебания, возникающие в процессе взаимодействия гидропланки с сеткой.

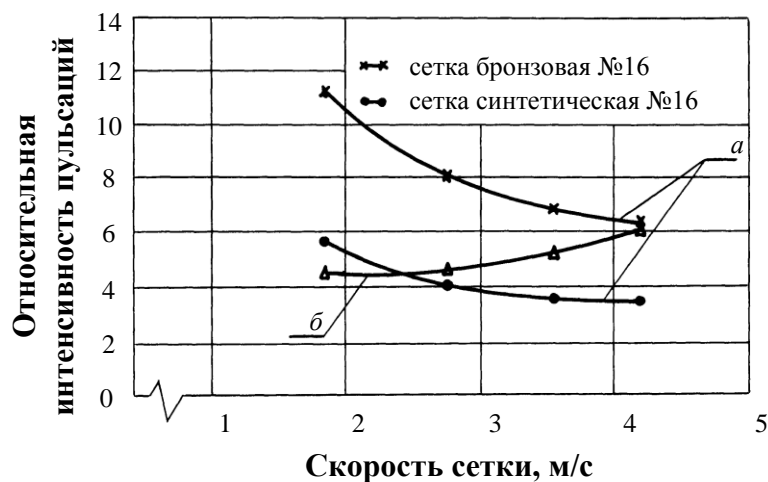


Рис. 26. Изменение относительной интенсивности пульсаций давления в зависимости от типа обезвоживающего элемента, вида сетки и скорости машины: *а* – гидропланка; *б* – регистровый валик

Диспергирующие напряжения, возникающие в потоке бумажной массы при взаимодействии гидропланки с бронзовой сеткой № 16, составляют 44,3 Па при скорости 1,83 м/с и возрастают до 70,9 Па при увеличении скорости до 4,16 м/с. Диспергирующие напряжения в потоке бумажной массы в результате взаимодействия гидропланки с синтетической сеткой составляют 10,9 Па и 22,4 Па, соответственно – для скоростей 1,83 м/с и 4,16 м/с. Повышение скорости движения сетки снижает эффективность взаимодействия гидропланки с сеткой, ввиду повышения прослойки отфильтрованной воды, нагнетаемой в пространство между гидропланкой и сеткой.

Таким образом, более рельефная топография бронзовой сетки при взаимодействии с гидропланкой способствует возникновению в потоке высоких диспергирующих напряжений, обеспечивающих дефлокуляцию бумажной массы.

Анализ данных, приведенных на рис.26, свидетельствует о незначительном повышении интенсивности пульсаций давления в потоке сульфитной целлюлозы под воздействием регистрового валика с повышением скорости движения сетки в диапазоне от

1,88 м/с до 3,53 м/с. Диспергирующие напряжения в потоке бумажной массы составляют 7,1; 16,8; 30,6 Па, соответственно: для скоростей движения сетки - 1,83; 2,70; 3,50 м/с.

Механизм структурообразования в потоке бумажной массы над обезвоживающими элементами прослеживается при анализе спектров распределения структурных неоднородностей в потоке бумажной массы в зоне действия обезвоживающих элементов.

На рис.27 показана динамика формирования структуры потока бумажной массы гидропланкой в виде волнового спектра распределения структурных неоднородностей, полученного с использованием датчика концентрации, устанавливаемого поочередно в характерных сечениях потока, транспортируемого формирующей сеткой над гидропланкой.

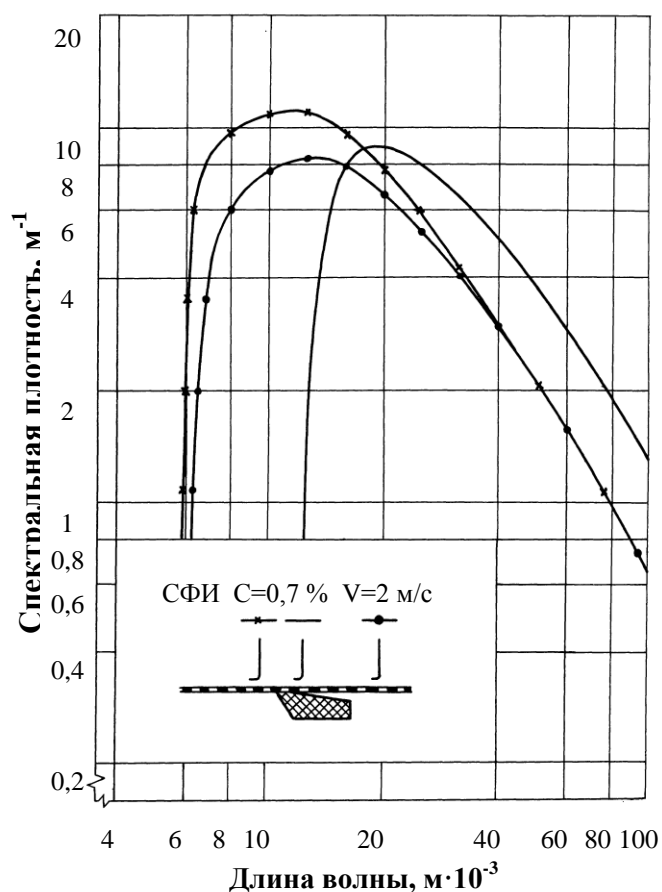


Рис.27. Формирование структуры потока гидропланкой

Датчик концентрации при измерениях находился в фиксированном положении относительно сетки.

Расстояние от оси чувствительного элемента до поверхности сетки составляло 0,006 м. Замеры пульсаций концентрации проводились в следующих точках сеточного стола над гидропланкой:

- на расстоянии 0,02 м до передней грани гидропланки;
- на расстоянии 0,01 м от передней грани гидропланки в точке, соответствующей максимуму интегральной интенсивности пульсаций давления (эта точка определялась сканированием датчика давления вдоль сеточного стола);
- за гидропланкой на расстоянии 0,01 м от ее конца.

Рассмотрим процесс формирования структуры потока бумажной массы в зоне действия гидропланки. Из напускной губы напорного ящика диспергированная суспензия поступает на формирующую сетку, где начинается процесс обезвоживания, при котором образуется слой осевших на сетке волокон. Существование слоя осевших на сетке волокон контролировалось визуально при сдуве массы с сетки. Поток бумажной массы перед гидропланкой характеризуется мелкомасштабной структурой, что подтверждает расположение чувствительного элемента датчика над слоем осевших волокон. Средняя концентрация массы в зоне чувствительного элемента датчика меньше средней концентрации волокон по высоте слоя. Из зоны формирования слоя осевших волокон бумажная масса попадает в первую зону диспергирования, где подвергается импульсу давления, в результате часть подсеточной отфильтрованной воды продавливается сквозь ячейки сетки обратно в поток бумажной массы и размывает слой осевших на сетке волокон. В потоке генерируются пульсации давления, диспергирующие бумажную массу. Спектральная плотность структурных неоднородностей сдвигается в область длинных волн в результате размыва осевших на сетке волокон, что приводит к выравниванию концентрации по высоте потока. Далее поток бумажной массы проходит зону вакуума, где начинается процесс обезвоживания и формирования слоя осевших на сетке волокон. Сетка под действием вакуума прогибается, а по прохождении зоны вакуума - разгибается. Вертикальные смещения сетки приводят к генерации пульсаций давления в потоке массы, диспергирующих волокнистую суспензию, и поток попадает во вторую зону диспергирования. Перераспределение размеров структурных неоднородностей во второй зоне диспергирования показывают

данные измерения пульсаций концентрации после гидропланки.

Существенный сдвиг спектральной плотности в область коротких длин волн свидетельствует о прошедших изменениях волокнистой структуры в результате воздействия диспергирующих напряжений, причиной появления которых явились вертикальные смещения формирующей сетки. Произошло разрушение крупных флокулов (уменьшение спектральной плотности в области длин волн 0,016-0,020 м и выше) и появились структурные неоднородности с длиной волны от 0,010 до 0,006 м, которые в предыдущей точке сеточного стола над гидропланкой практически не наблюдались.

Исследования, проведенные при скоростях до 8 м/с, показали наличие аналогичных областей диспергирования бумажной массы.

Проводился сравнительный анализ формирования структуры потока гидропланкой и регистровым валиком, которые поочередно устанавливались в одном и том же сечении сеточного стола. Ось валика или передняя грань гидропланки располагались на расстоянии 1,2 м от напускной щели, где средняя концентрация волокон в бумажной массе составляла 0,6 %.

Проводилось сканирование датчиками давления и концентрации вдоль сеточного стола с целью определения положения максимума интегральной интенсивности пульсаций давления относительно обезвоживающего элемента. Максимум интегральной интенсивности пульсаций давления располагался на расстоянии 0,07 м от оси регистрового валика и расстоянии 0,01 м от передней грани гидропланки.

Измерения пульсаций концентрации проводились в зоне действия регистрового валика в точках:

- над осью валика, где наблюдался полный размыв слоя осевших на сетке волокон;

- на расстоянии 0,02 м от оси валика с целью исследования динамики изменения волнового спектра распределения структурных неоднородностей;

- в точке, соответствующей максимуму интегральной интенсивности пульсаций давления на расстоянии 0,07 м от оси валика;

для гидропланки в точках:

- от передней грани на расстоянии 0,01 м в максимуме

интегральной интенсивности пульсаций давления;

- на расстоянии 0,01 м за гидропланкой.

Перед замерами пульсаций концентрации осуществлялся контроль отсутствия слоя осевших на сетке волокон визуально при сдуве массы с сетки.

На рис.28 показана динамика формирования структуры потока бумажной массы в зоне действия регистра валика. Над осью регистра валика произошел размыв слоя осевших на сетке волокон за счет импульса давления при взаимодействии сетки с поверхностью регистра валика, при котором произошло продавливание повисшего под сеткой слоя отфильтрованной воды и транзитного на валике в поток массы на сетке. Концентрация волокон в зоне формования выравнивалась, о чем свидетельствует большая спектральная плотность на больших длинах волн.

Всё сказанное свидетельствует о том, что чувствительный элемент датчика концентрации находится в первой зоне диспергирования регистра валика. На расстоянии 0,02 м от оси валика происходит дальнейшее перераспределение структурных неоднородностей в первой зоне диспергирования - вторая точка замера находится на границе первой зоны диспергирования – вторая точка замера находится на границе первой зоны диспергирования и зоны обезвоживания. Здесь спектральная плотность увеличивается относительно первой точки замера в области коротких длин волн - произошел размыв флокул размером более 0,02 м и появились мелкие.

Пройдя первую зону диспергирования, поток бумажной массы попадает в зону обезвоживания регистра валика, где под действием вакуума начинает формироваться слой волокон на сетке. Формующая сетка смещается вниз, а после снятия вакуума распрямляется вновь. Это приводит к возникновению знакопеременных нагрузок, способствующих генерации пульсаций давления, о чем свидетельствует максимум интегральной интенсивности пульсаций давления.

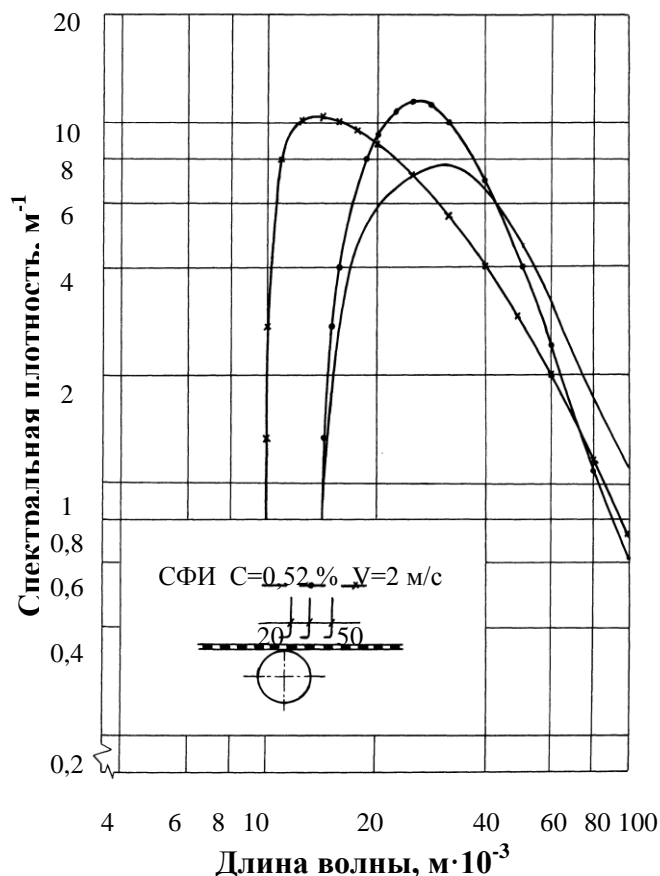


Рис.28. Формирование структуры потока регистровым валиком

Бумажная масса, пройдя зону обезвоживания, попадает во вторую зону диспергирования, которая начинается на расстоянии 0,07 м от оси валика, где происходит дальнейшее разрушение структурных неоднородностей с длиной волны от 0,02 м и выше. Спектральная плотность увеличилась в области длин волн до 0,01 м. Преобладающий размер структурных неоднородностей уменьшился от 0,015 м над осью валика до 0,007 м на расстоянии 0,07 м от его оси.

Изложенное выше подтверждает предположение о существовании над регистровым валиком двух зон диспергирования. Количественные отличия в механизмах диспергирования, связанные, прежде всего с величинами генерируемых пульсаций давления над гидропланкой и регистровым валиком, показывают экспериментальные данные, представленные на рис. 28 и рис. 29.

Поток бумажной массы в первой зоне диспергирования регистравого валика характеризуется более крупномасштабной структурой, чем в первой зоне диспергирования гидропланки. Преобладающий размер структурных неоднородностей в первой зоне диспергирования регистравого валика 0,015 м, тогда как на гидропланке - 0,0075 м. Во второй зоне диспергирования гидропланки больше мелких флокул, о чем свидетельствует увеличение спектральной плотности на длинах волн 0,01 м, что не наблюдается над регистравым валиком. Содержание неоднородностей размером более 0,015 м во второй зоне диспергирования гидропланки также меньше по сравнению с аналогичной зоной регистравого валика.

Такое воздействие на процесс структурообразования объясняется более грубым размывом слоя осевших на сетке волокон регистравым валиком - подсеточный слой отфильтрованной воды, продавливаемой валиком сквозь сетку обратно в поток массы, имеет большую неравномерность, а гидропланка большую часть этого потока отводит в подсеточную ванну. Относительное энергосодержание структурных неоднородностей различного размера показано для зон диспергирования гидропланки и регистравого валика. Например, если неоднородностей с длиной волны 0,05 м в потоке после регистравого валика всего 0,37 %, то после гидропланки их становится 9,75 %.

Таким образом, регистравый валик формирует более крупномасштабную структуру потока, чем гидропланка. Анализ вышеизложенного позволяет сделать следующее заключение о механизме диспергирования потока бумажной массы над обезвоживающими элементами начальной зоны формования (гидропланкой и регистравым валиком). При движении с постоянной скоростью между обезвоживающими элементами формирующая сетка прогибается. Около обезвоживающего элемента ускорения вертикальных смещений сетки относительно горизонтальной плоскости сеточного стола резко увеличиваются и достигают своего максимума (вертикальное смещение сетки в этой точке сеточного стола равно нулю). Затем под действием вакуума сетка вновь прогибается, а ускорения ее вертикальных смещений уменьшаются и меняют знак.

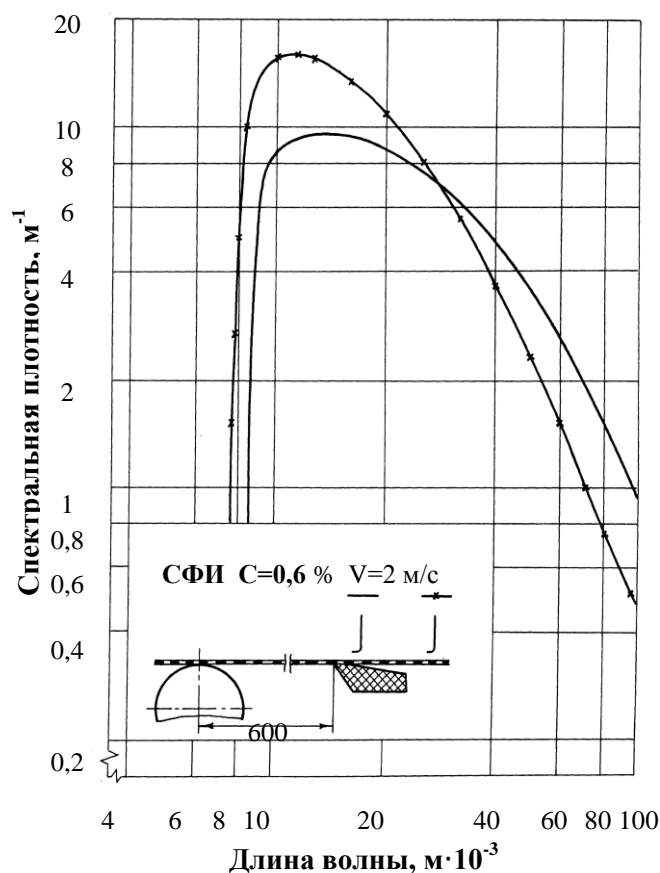


Рис.29. Формирование структуры потока гидропланкой, установленной после регистравого валика

Ускорения вертикальных смещений точек сетки до точки сеточного стола, где происходит смена их знака, направлены вниз. Поэтому волокна бумажной массы увлекаются сеткой и могут разворачиваться вниз. Однако навстречу им движутся струи отфильтрованной воды, продавливаемой обезвоживающим элементом сквозь ячейки сетки обратно в поток массы на сетке, размывающие слой осевших на сетке волокон. В потоке на сетке генерируются пульсации давления, диспергирующие бумажную массу, что подтверждается также экспериментальными данными зарубежных исследователей. Численное значение пульсаций давления, генерируемых в потоке бумажной массы в результате продавливания слоя подсеточной воды, зависят от места установки

обезвоживающего элемента, конструктивных параметров формирующего устройства и реологических характеристик бумажной массы.

После смены знака ускорения вертикальных смещений сетки направлены вверх и достигают своего максимума в точке сеточного стола, где вакуум, создаваемый обезвоживающим элементом, максимален, а затем ускорения уменьшаются. Сетка начинает смещаться вверх после снятия действия вакуума. Волокна бумажной массы увлекаются сеткой и движутся также вверх. Таким образом, на массу воздействует при прохождении зоны вакуума выталкивающий импульс, что при работе регистровых валиков на высоких скоростях движения сетки приводит к разрушению сформованного бумажного полотна.

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что обезвоживающие элементы, установленные в начальной зоне формования, наряду с обезвоживанием, оказывают эффективное диспергирующее воздействие на бумажную массу, обеспечивая тем самым возможность выработки высококачественного бумажного полотна на нижних допусках по массе 1 м^2 .

2.3. Влияние виброактивации в зоне формования на спектр пульсаций давления в потоке бумажной массы и качество бумаги

Конструктивные элементы сеточной части, расположенные в зоне отлива и формования, призваны, наряду с эффективным обезвоживанием, обеспечивать создание в потоке гидродинамических условий, предотвращающих возможность флокуляции и определяющих равномерное распределение волокон в структуре полотна бумаги. Эффективным средством повышения качественных показателей вырабатываемой бумаги на основе более равномерного распределения волокон является управление процессами отлива и формования бумаги и использованием виброактивации бумажной массы.

Под руководством и при непосредственном участии авторов разработан ряд конструктивных элементов формирующих устройств, защищенных авторскими свидетельствами №№ 867987, 1027309, 1139784, 1300058 и др., обеспечивающих управление процессом формирования бумажной массы путем ее виброактивации от места подачи потока в зону формирования вплоть до «сухой линии» (рис. 30–33). Исследовано влияние виброактивации бумажной массы в зоне формирования на равномерность распределения волокон в бумажной массе и равномерность просвета вырабатываемого бумажного полотна. Виброактивация бумажной массы осуществлялась виброэлементами, соединенными с электромагнитным вибратором ВЭДС-10А.

Использовавшиеся в исследованиях датчики давления и концентрации располагались над рассматриваемой конструкцией виброэлемента в точке, соответствовавшей максимуму интенсивности пульсаций давления. Исследовалась интенсивность пульсаций давления в потоке бумажной массы над виброэлементами, частота колебаний которых изменялась в диапазоне от 20 до 4000 Гц.

Проведенными исследованиями установлено, что применение виброактивации даже в месте подачи бумажной массы хорошо диспергированной проточной частью напорного ящика на сеточный стол дает положительные результаты.

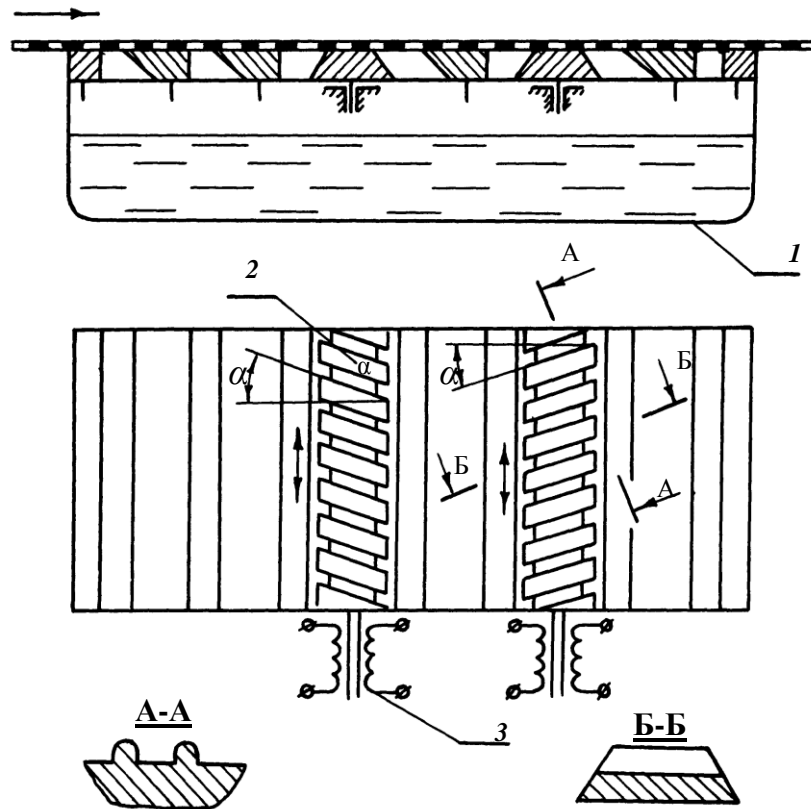


Рис.30. Отсасывающий ящик сеточной части БДМ по а.с.№ 1139784: 1 – корпус; 2 – рифленая планка; 3 – вибропривод

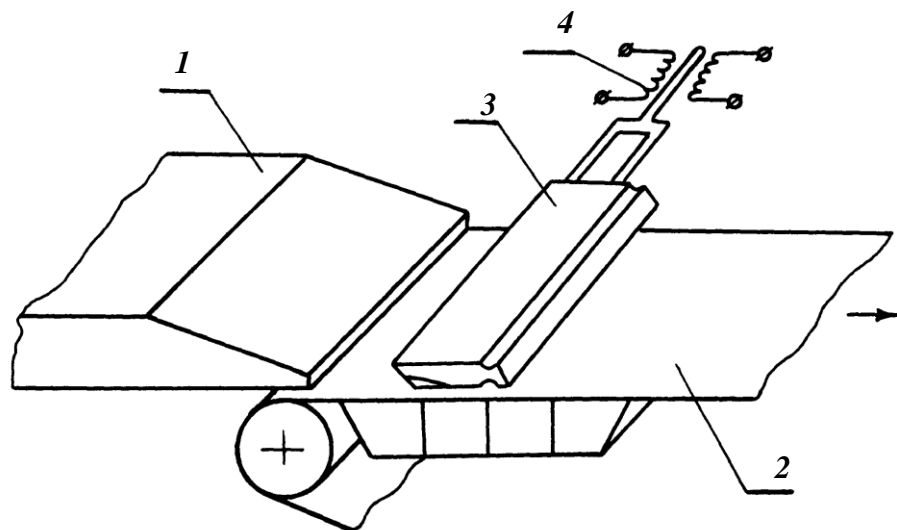


Рис.31. Сеточная часть бумагоделательной машины по а.с. № 1300058: 1 – напорный ящик; 2 – сеточный стол; 3 – рифленая планка; 4 – вибропривод

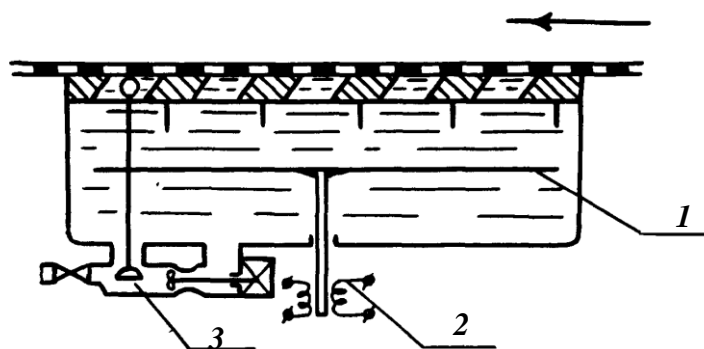


Рис.32. Мокрый отсасывающий ящик сеточной части БДМ по а.с.№ 867987: 1 – пластина; 2 – вибропривод; 3 – насос с регулировочным клапаном

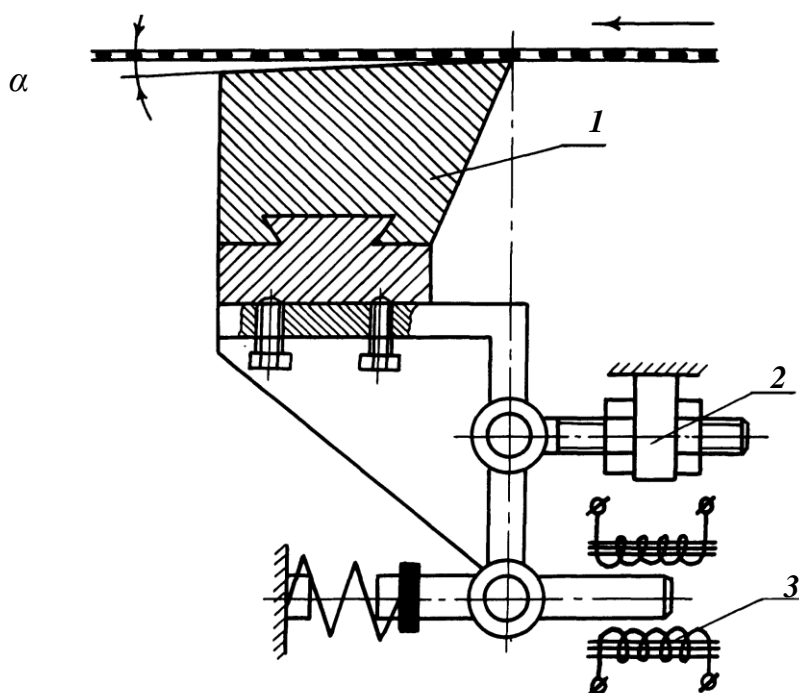


Рис.33. Гидропланка бумагоделательной машины по а.с.№ 1027309: 1 – гидропланка; 2 – механизм регулировки угла наклона; 3 – вибропривод

На рис.34 показано воздействие на поток бумажной массы виброактиватора, (а.с. № 1139784), установленного под сеткой в

зоне падения струи, при различных частотах виброактивации. Представленные данные дают возможность определить оптимальную частоту воздействия рифленой планки, размещенной под формирующей сеткой, которая для рассматриваемых условий составляет 120 Гц, о чем свидетельствует сдвиг спектральной плотности в область коротких длин волн. Длина волны преобладающего размера структурных неоднородностей относительно варианта применения неподвижной рифленой планки уменьшалась почти вдвое.

Более эффективным оказалось воздействие на поток виброактиватора, выполненного по а.с.№ 1300058, установленного над сеткой в зоне падающего потока, как это следует из данных, представленных на рис.35. Оптимальной также является частота 120 Гц, причем улучшение равномерности распределения волокон наблюдается на всех рассматриваемых частотах воздействия. Длина волны преобладающего размера структурных неоднородностей при виброактивации с частотой 120 Гц составляет $9 \cdot 10^{-3}$ м. Положительный эффект при применении виброактиватора подобного типа объясняется возникновением значительных диспергирующих напряжений при взаимодействии рифленой поверхности планки с потоком бумажной массы. При этом диспергирующее воздействие виброактиватора, выполненного по а.с.№ 1139784, несколько меньше по сравнению с виброэлементом, выполненным по а.с.№ 1300058, что объясняется частичным гашением пульсационной энергии, генерируемой рифленой планкой в слое подсеточной воды при продавливании отфильтрованной воды через формирующую сетку в поток бумажной массы.

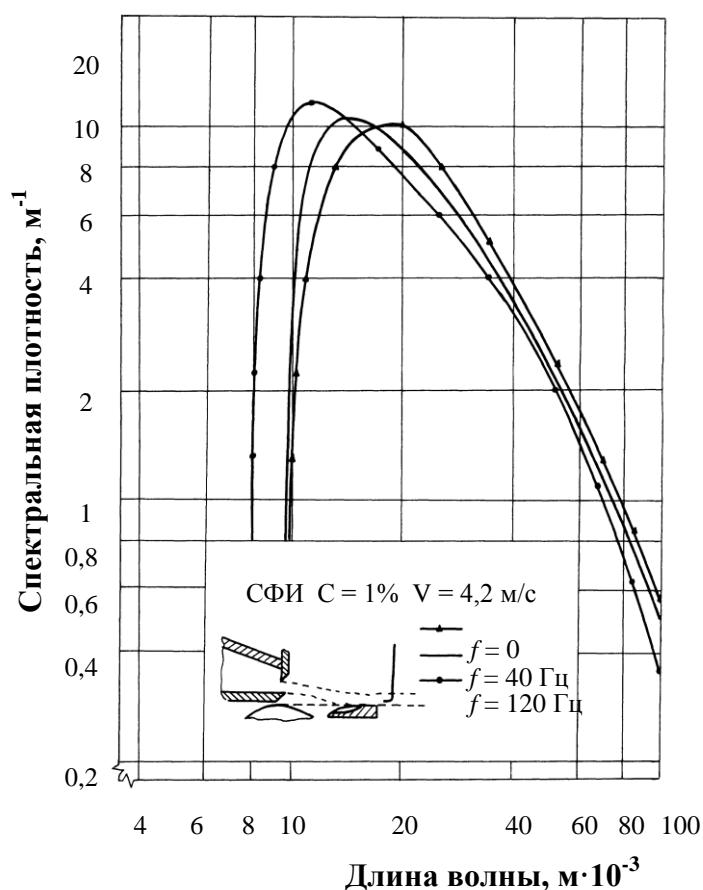


Рис.34. Влияние частоты колебаний виброактиватора по а.с.№1139784 на формирование структуры бумажной массы

Исследовано влияние рассмотренных виброактиваторов на формирование прочностных характеристик бумаги - определена разрывная длина бумаги, выработанной с использованием указанных виброактиваторов, как в продольном, так и в поперечном направлениях. Полученные данные подтверждают высокую эффективность применения виброактиватора (выполненного по а.с.№ 1300058) в зоне подачи потока на сеточный стол, о чем свидетельствуют повышение разрывной длины в продольном и поперечном направлениях и уменьшение коэффициента анизотропии до 1,24 в то время как при использовании виброактиватора, выполненного по а.с.№ 1139784, величина коэффициента анизотропии составляет 1,36.

Изучено влияние виброактиваторов на структуру бумажной

массы в зоне формирования и качество вырабатываемой бумаги. В качестве виброактиваторов применялись вибропластина, установленная в корпусе мокрого отсасывающего ящика (а.с.№ 867987), и вибропланка (а.с.№ 1027309). Исследования проводились на суспензии газетной бумаги марки В.

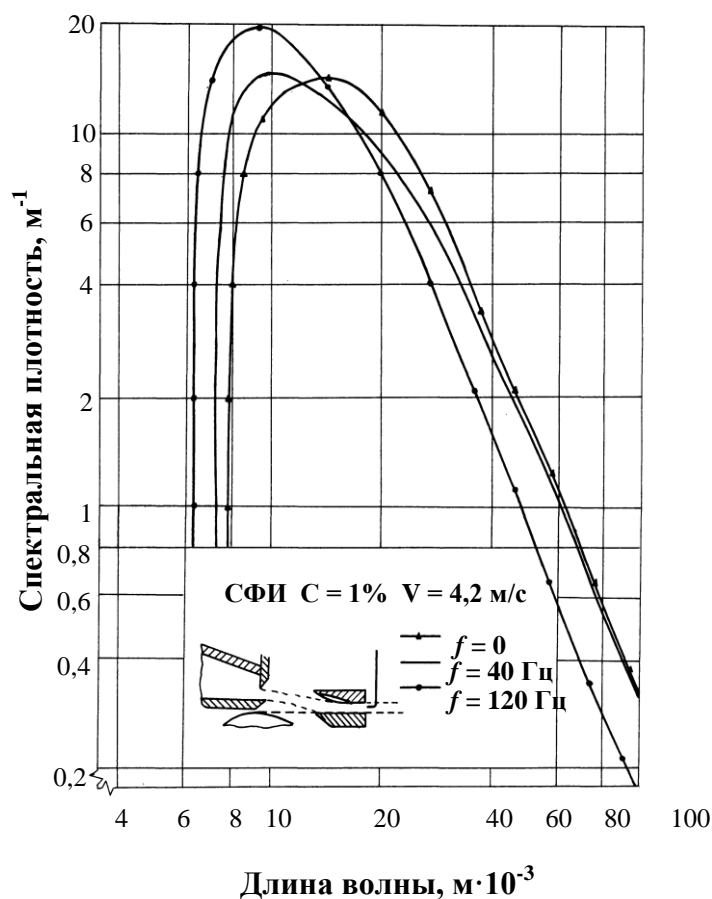


Рис.35. Влияние частоты колебаний виброактиватора по а.с.№1300058 на формирование структуры бумажной массы

Вибропластина (рис.36) при помощи штоков подключалась к электродинамическому вибратору ВЭДС-10А, обеспечивающему колебания пластины в диапазоне частот от 0 до 4000 Гц. Вибропластина выполнялась перфорированной с отверстиями диаметром $4 \cdot 10^{-3}$ м и живым сечением 40 %. Устанавливалась вибропластина в полностью залитом водой корпусе отсасывающего

ящика на расстоянии $10 \cdot 10^{-3}$ м от формирующей сетки. Исследования проводились при следующих скоростях движения сетки: 1,83; 2,70; 3,53 м/с. Измерения виброускорения пластины выполнялись с использованием индукционного датчика, входившего в комплект ВЭДС-10А. Датчик крепился на поверхности вибропластины.

Установлено, что максимальная интенсивность пульсаций давления в потоке бумажной массы имеет место при частоте 2600 Гц (рис.36). Величина виброускорения пластины при этой частоте составляла 130 м/с. С увеличением скорости сетки интенсивность пульсаций давления резко уменьшалась. Наиболее эффективно влияние вибровоздействия проявлялось при скорости сетки 1,83 м/с – значение диспергирующих напряжений в потоке бумажной массы составляет 27,1 Па по сравнению с 1,8 Па при отсутствии вибровоздействия. При использовании устройства по а.с. № 867987 пульсации давления, генерируемые пластиной, распространяются в корпусе отсасывающего ящика и частично гасятся его стенками. Слой воды между пластиной и сеткой также демпфирует пульсации давления, генерируемые пластиной. Более эффективное воздействие на поток бумажной массы оказывает устройство, выполненное по а.с.№ 1027309, представленное на рис.33. При использовании данного устройства наблюдается максимальная интенсивность пульсаций давления в потоке бумажной массы при частоте 1600 Гц. С повышением скорости движения сетки влияние виброактиватора на гидродинамические параметры потока бумажной массы снижается и при скорости сетки 3,33 м/с диспергирующие напряжения в потоке, обусловленные применением виброактивации, практически равны напряжениям, возникающим в потоке в результате воздействия неподвижной гидропланки. Снижение интенсивности пульсаций давления в потоке бумажной массы при повышении скорости движения сетки объясняется недостаточной мощностью вибростенда ВЭДС-10 при работе на высоких скоростях. При использовании в качестве рабочей суспензии сульфитной небеленой целлюлозы наибольшая интегральная интенсивность пульсации давления в потоке наблюдалась на частоте воздействия вибропланки 1130 Гц, повышение интегральной интенсивности пульсаций давления наблюдалось на частотах 560 и 2300 Гц. Максимальные пульсации давления, зарегистрированные при частоте вибропланки 1130 Гц,

составляют около 1000 Па на длине волны $1,3 \cdot 10^{-3}$ мм (рис.37).

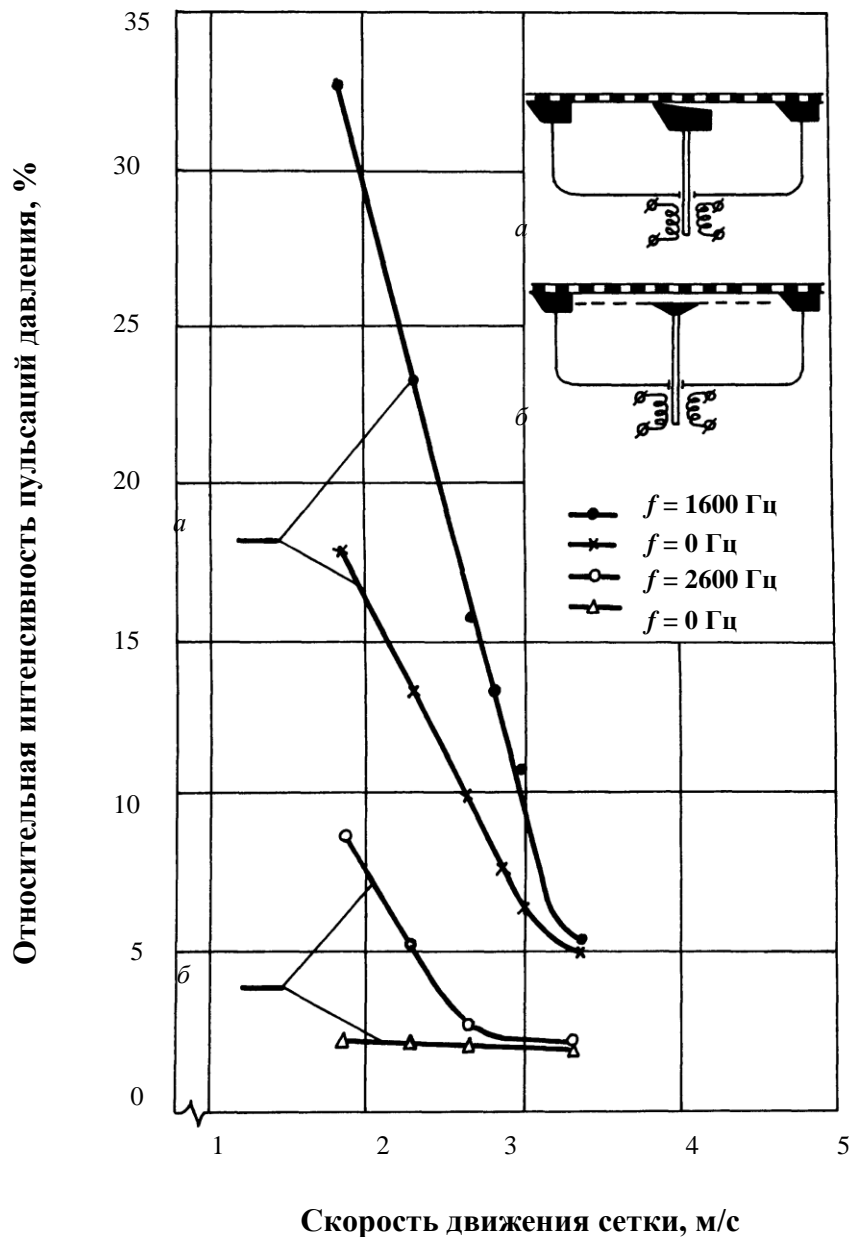


Рис.36. Изменение интенсивности пульсаций давления, генерируемых виброактиваторами, с повышением скорости сетки: а – под воздействием вибропланки, выполненной по а.с.№ 1027309; б – под воздействием вибропластины, выполненной по а.с.№ 867987

Распределение волокон при виброактивации на частоте 1130 Гц

также оказалось более равномерным в сравнении с другими режимами (рис.38). С увеличением частоты виброактивации количество импульсов давления, генерируемых вибропланкой, хотя и увеличивается, амплитуда колебаний вибростенда уменьшается, что является конструктивной особенностью электродинамических вибраторов и эффективность воздействия также снижается. Эффективность воздействия с частотой 1130 Гц объясняется еще и тем, что в этом режиме виброактивации в потоке генерируются турбулентные вихри масштабом одного порядка с длиной волокна.

Следует отдать предпочтение виброактивации на частоте 1130 Гц, так как относительная энергия пульсаций концентрации во всем диапазоне характеристических длин волн для этой частоты значительно превышает величину энергии, генерируемую виброактивацией на других частотах. Вибропланка обеспечивает распространение волн в обоих направлениях от нее, способствуя тем самым разрушению слоя осевших на сетке волокон на участке между ближайшими обезвоживающими элементами, о чем свидетельствуют экспериментальные данные, полученные путем измерения пульсаций концентрации в зонах, предшествующих гидропланке и вибропланке и после них. Так, на рис.38 показано различие в условиях формирования структуры бумажной массы гидропланкой и вибропланкой. Пульсации концентрации замерялись над вибропланкой на расстоянии 0,01 м от кромки в точке, соответствующей максимуму интенсивности пульсаций давления и в точке за вибропланкой на расстоянии 0,01 м от ее конца. Спектральная плотность в случае применения вибропланки сдвигается в область коротких длин волн относительно применения стационарной гидропланки для указанных точек замера. Относительная энергия пульсаций концентрации после вибропланки на 13 % больше, чем после гидропланки. Приведенные данные свидетельствуют о том, что вибропланка создает большую зону диспергирования, способствующую более равномерному распределению волокон в потоке массы.

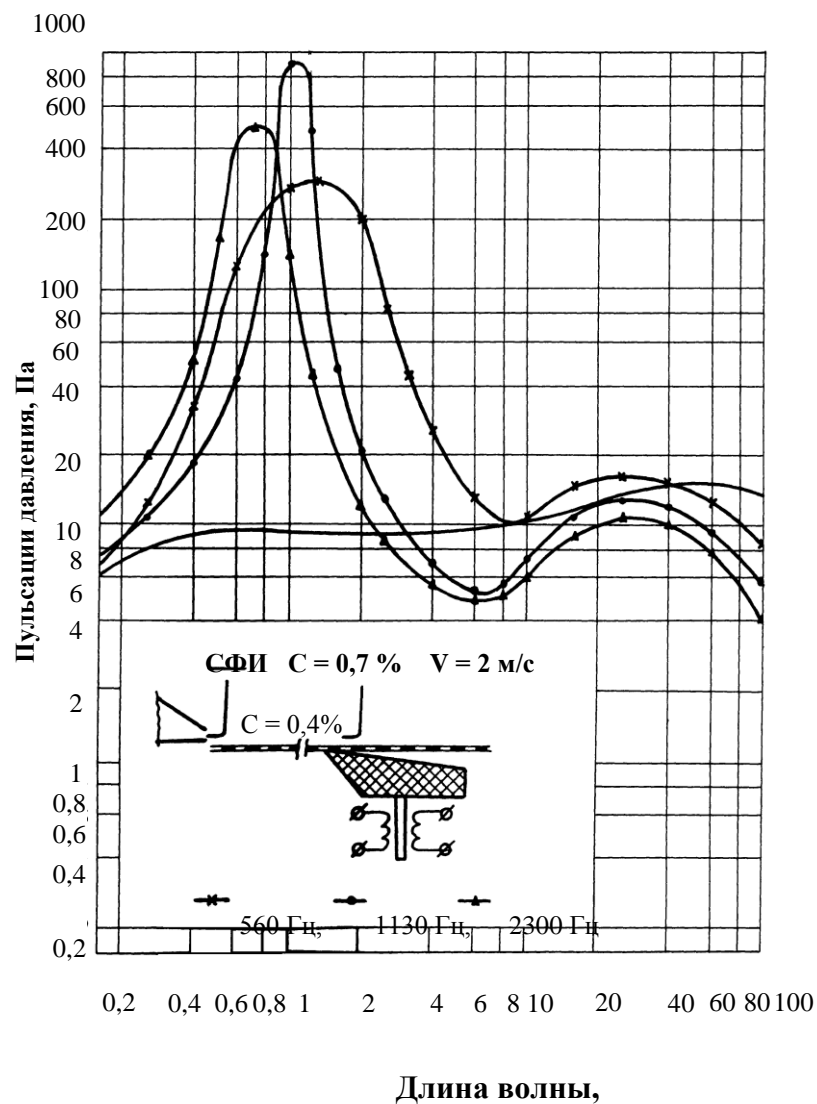


Рис.37. Спектры пульсаций давления в зоне формования при различных частотах виброактивации

Возможность управления процессами отлива и формования бумажного полотна посредством виброактивации бумажной массы и устранения дефектов работы напускного устройства показана на рис.39.

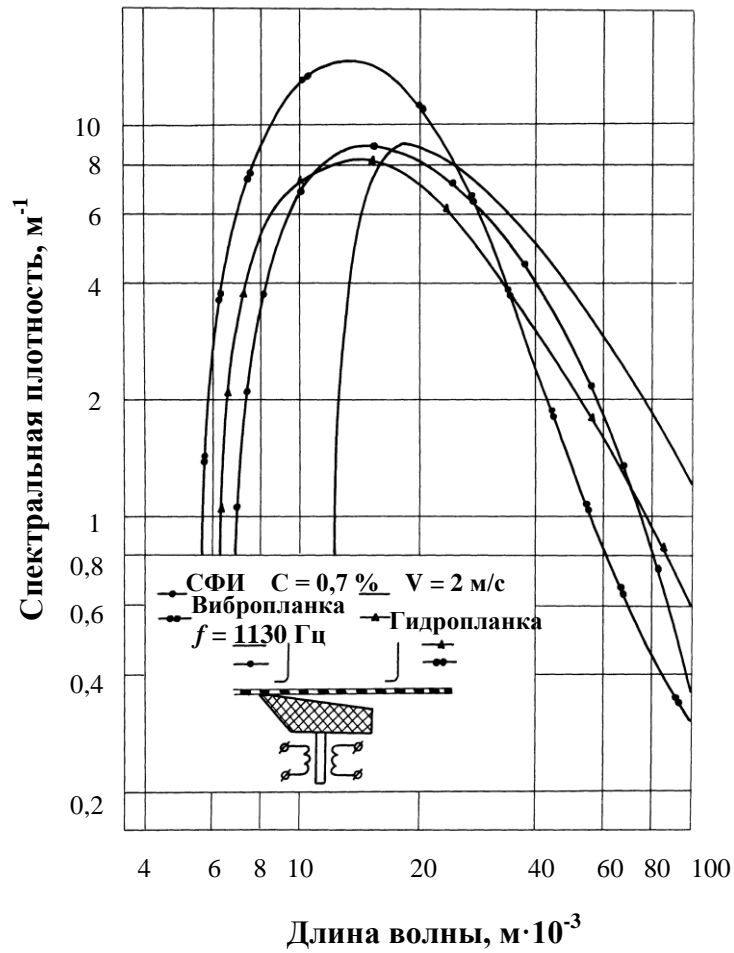


Рис.38. Сопоставление условий формирования бумажной массы вибропланкой и гидропланкой

После напуска на сетку в потоке бумажной массы идет процесс флокуляции, о чем свидетельствует смещение спектральной плотности в длинноволновую область. Исчезают флокулы длиной волны меньше 0,009 м, особенно интенсивно идет флокуляция на длинах волн выше 0,012 м. При виброактивации сульфатной целлюлозы на частоте 1600 Гц (оптимальной для данной суспензии) спектральная плотность сдвигается в область коротких длин волн. Равномерность распределения волокон в бумажной массе, подвергавшейся виброактивации в зоне формования, лучше, чем в потоке бумажной массы, подаваемом из напускного устройства. Распределение волокон в образцах бумаги изучалось как в проходящем свете (рис.40) так и исследованием образцов бумаги на разрывную длину. Из анализа спектров

просвета образцов бумаги следует, что спектральная плотность снижается в области длин волн выше 0,15 м у образцов бумаги, подвергавшихся виброактивации с уменьшением длины волны преобладающего размера структурных неоднородностей от 0,02 м (стационарная гидропланка) до 0,006 м (вибропланка).

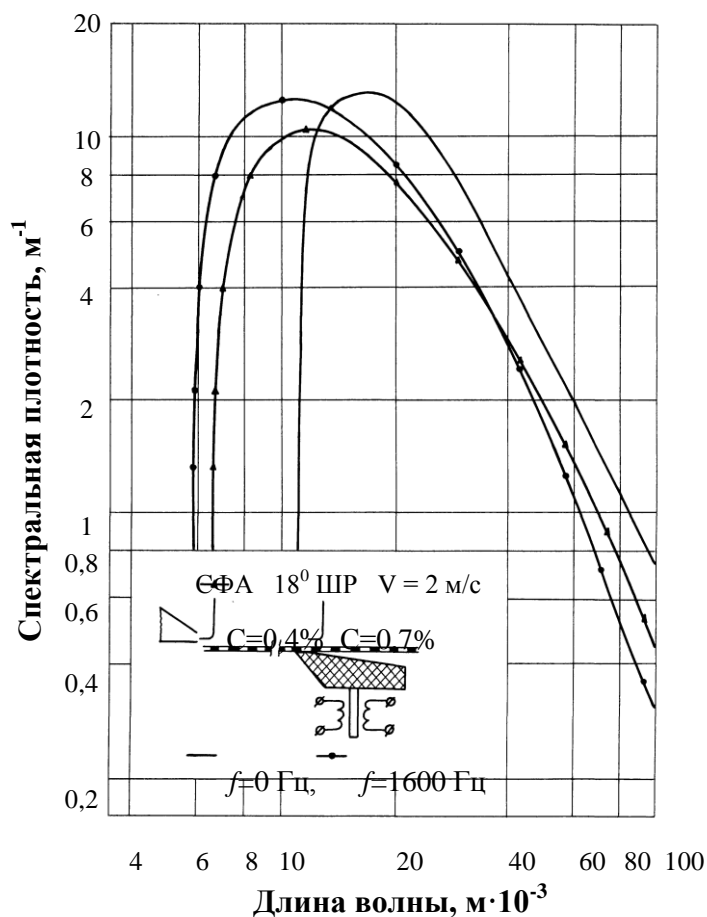


Рис.39. Управление процессом структурообразования в зоне формования

Установлено также, что относительная энергия пульсаций концентрации и просвета бумажного полотна, полученного с виброактивацией бумажной массы в зоне формования, превышает на 12,9 % и 28,61 % соответствующие показатели, полученные без виброактивации. Разрывная длина образцов бумажного полотна, полученного с применением виброактивации в начальной зоне

формования, увеличивалась в продольном направлении на 29 % и оставалась без существенных изменений в поперечном. Анализ спектров, замеренных на БДМ №5 Долинского ЦБЗ, показывает, что виброактивация бумажной массы посредством вибропланки более эффективна, чем традиционная тряска сеточного стола. Длина волны преобладающего размера структурных неоднородностей у образцов бумаги, снятых на БДМ № 5, составила 0,009 м против 0,006 м у образцов бумаги, выработанных при виброактивации бумажной массы в начальной зоне формования.

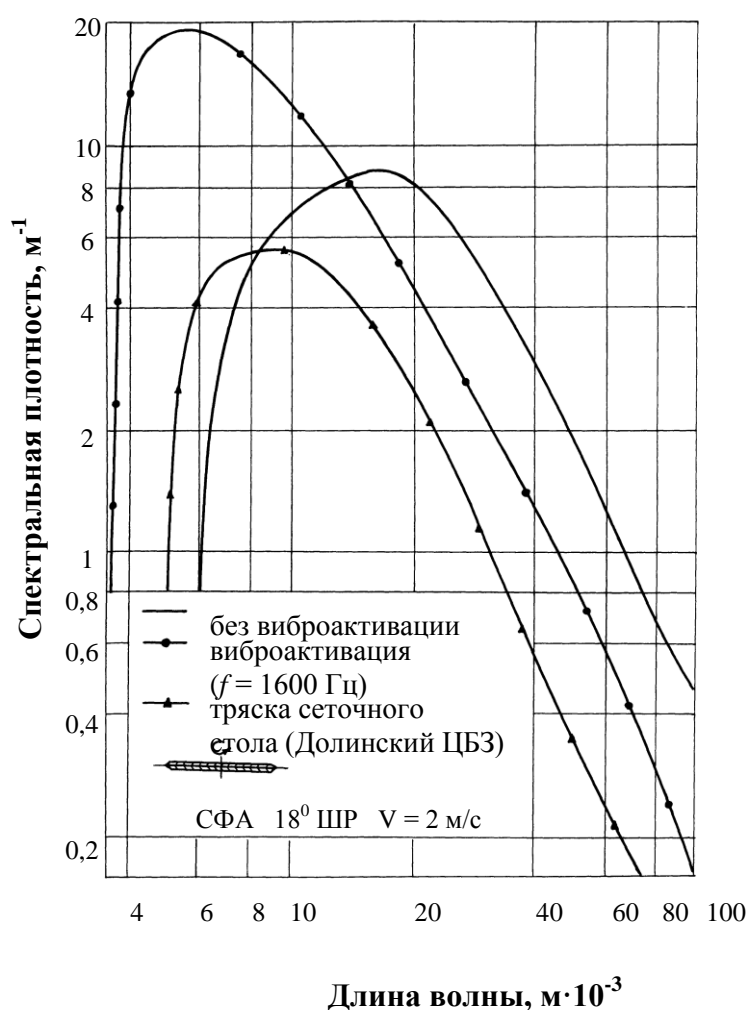


Рис.40. Влияние виброактивации бумажной массы на неравномерность просвета вырабатываемой бумаги

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУМАЖНЫХ МАСС В ПРИКЛАДНЫХ ЦЕЛЯХ

3.1. Расчет параметров формующих устройств с использованием реологических характеристик бумажных масс

При напуске бумажной массы на сеточный стол под давлением струи в зоне, предшествующей формующему ящику, происходят вертикальные смещения сетки, являющиеся причиной возникновения в потоке напряжений, диспергирующих бумажную массу. Величины вертикальных смещений и их профиль определяют уровень диспергированности бумажной массы в зоне отлива и формования бумаги. Давление струи на формующую сетку зависит главным образом от скорости и угла подачи потока на сеточный стол. Определим распределение скоростей в напускном сечении напорного ящика с учетом геометрии напускного устройства и реологических характеристик применяемой бумажной массы.

Для обеспечения качественного диспергирования бумажной массы, а также увеличения скорости волокнистой суспензии в пределах, близких к скорости сетки бумагоделательной машины, напускное устройство большинства конструкций современных напорных ящиков выполняется в виде плоского прямолинейного конфузора, оказывающего существенное влияние на формирование потока волокнистой суспензии, подаваемого в зону отлива и формования бумажного полотна, а, следовательно, и качество получаемой продукции.

Напускную щель, которой заканчивается напускное устройство напорного ящика, можно считать малым отверстием по следующим причинам:

1. Скорость подхода массы U_1 пренебрежимо мала, т.е. соблюдается неравенство

$$F_1 : F_2 > 4, \quad (3.1)$$

где F_1 – площадь входного живого сечения I-I, м²;
 F_2 – площадь напускной щели, м².

2. Скорости в верхней и нижней точках сжатого сечения примерно равны друг другу, т.е. соблюдается неравенство

$$H \geq 10a_2, \quad (3.2)$$

где H – заглубление верхней точки сжатого сечения под свободной поверхностью, м;
 a_2 – высота напускной щели, м.

Для анализа потерь энергии при движении бумажной массы в напускном устройстве напорного ящика воспользуемся уравнением Бернулли, выбрав для сравнения такие два сечения, в которых движение суспензии можно считать плавно изменяющимся – сечение I-I на входе в напускное устройство и сжатое сечение струи С-С (рис.41). Уравнение Бернулли для указанных сечений относительно горизонтальной плоскости сравнения п-п, проходящей через центр тяжести сжатого сечения струи, записывается следующим образом

$$Z_1 g \rho + P_1 + \frac{\alpha U_1^2}{2} \rho = Z_2 g \rho + P_2 + \frac{\alpha U_2^2}{2} \rho + h_\omega g \rho, \quad (3.3)$$

где Z_1 и Z_2 – напор суспензии над центром тяжести соответствующего сечения, м;

P_1 и P_2 – давление в соответствующем сечении, Па;

U_1 и U_2 – скорость движения суспензии в рассматриваемых сечениях, м/с; α – корректив скорости;

h_ω – потери напора при движении суспензии, м;

ρ – плотность суспензии, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с.

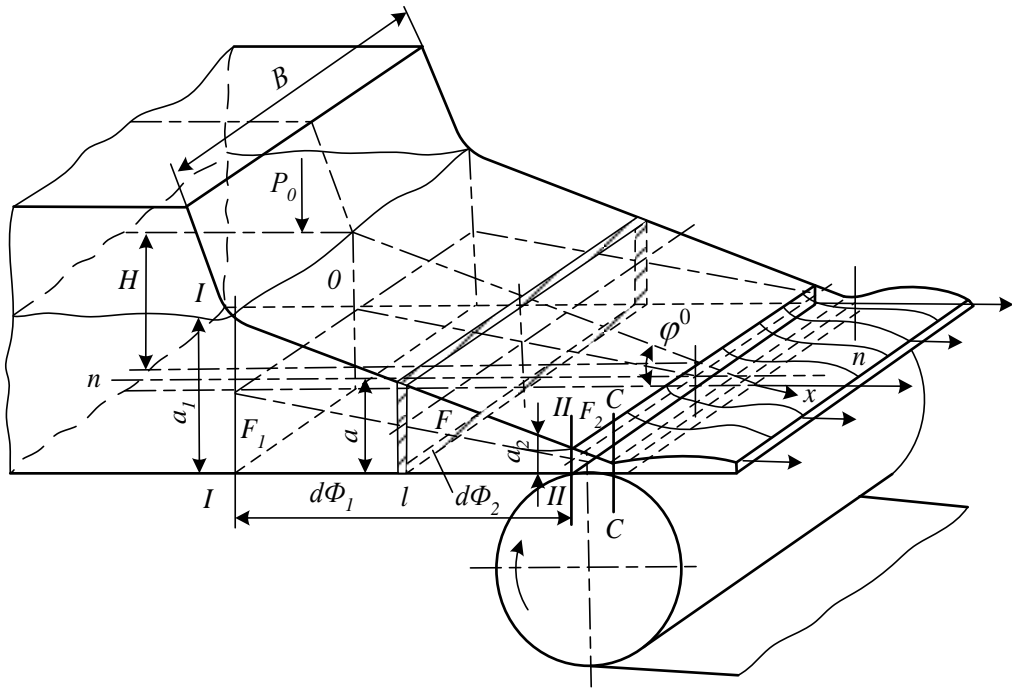


Рис.41. Расчетная схема напускного устройства

Значения отдельных слагаемых, входящих в уравнение

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= H_1; P_1 = P_0; \frac{\alpha U_1^2}{2} \rho \approx \frac{U_1^2}{2} \rho; Z_2 = 0; \\
 P_2 &= P_a; \frac{\alpha U_2^2}{2} \rho \approx \frac{U_2^2}{2} \rho \approx \frac{U_c^2}{2} \rho.
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Потери давления при движении волокнистой суспензии от сечения I-I до сжатого сечения C-C представим в виде

$$h_{\omega} g \rho = \zeta \frac{U_c^2}{2} \rho,
 \tag{3.5}$$

где
$$\zeta = \zeta_{\text{суж.вх}} + \zeta_{\text{тр}} + \zeta_{\text{о.к}} , \quad (3.6)$$

ζ – коэффициент сопротивления, учитывающий потери давления при движении суспензии от сечения I-I до сжатого сечения С-С;

$\zeta_{\text{суж.вх}}$ – коэффициент потерь давления на входе в конфузор; $\zeta_{\text{тр}}$ – коэффициент потерь давления на трение;

$\zeta_{\text{о.к}}$ – коэффициент потерь давления на острой кромке.

Отличительной особенностью напускных устройств напорных ящиков является плавность сопряжения плоского конфузора с передней стенкой напорного ящика, в связи с чем потери давления за счет сужения потока на входе в конфузор $\zeta_{\text{суж.вх}}$ можно считать пренебрежимо малыми.

Коэффициент потерь на острой кромке определяется экспериментальным путем. Так, например, для напорного ящика БДМ № 6 Котласского ЦБК $\zeta_{\text{о.к}} = 0,04$.

Аналитически определяем величину потерь давления на трение в напускном устройстве напорного ящика.

Работа сил трения в 1 секунду

$$\Delta E_{\text{тр}} = R \cdot U, \quad (3.7)$$

где $\Delta E_{\text{тр}}$ – работа сил трения в 1 секунду, Н/м.с.;

R – сила трения, Па;

U – средняя скорость потока, м/с.

Сила трения определяется по формуле

$$R = \int_{\sigma} \frac{\lambda}{4} \frac{\rho U^2}{2} d\sigma, \quad (3.8)$$

где σ – поверхность трения, м²;

λ – коэффициент трения для цилиндрической трубы, отнесенный к участку длиной в один метр.

Откуда

$$\Delta E_{mp} = \int_{\sigma} \frac{\lambda}{4} \frac{\rho U^3}{2} d\sigma. \quad (3.9)$$

Коэффициент потерь на трение в конфузоре определяется как отношение энергии, потерянной на трение ΔE_{mp} , к кинетической энергии на выходе из конфузора $\frac{mU_2^2}{2}$

$$\zeta_{mp} = \frac{\Delta E_{mp}}{\frac{mU_2^2}{2}} = \frac{1}{F_2} \int_{\sigma} \frac{\lambda}{4} \left(\frac{U}{U_2} \right)^3 d\sigma, \quad (3.10)$$

где $m = \rho F_2 U_2$ – массовый расход потока, кг/с.

Так как из уравнения неразрывности потока

$$U = \frac{U_2 F_2}{F}, \quad (3.11)$$

то коэффициент потерь давления на трение для конфузора с любой формой поперечного сечения

$$\zeta_{mp} = F_2^2 \frac{\lambda}{4} \int_{\sigma} \frac{d\sigma}{F^3}. \quad (3.12)$$

После интегрирования получаем коэффициент потерь на трение в напускном устройстве в виде

$$\zeta_{mp} = \frac{\lambda}{4} \left(\frac{a_2}{btg \frac{\varphi}{2}} \frac{n-1}{n} - \frac{1}{2 \sin \frac{\varphi}{2}} \cdot \frac{n^2-1}{n^2} \right), \quad (3.13)$$

где φ – угол конфузорности, рад;

a и b – размеры поперечного сечения напускного устройства, м;

$n = \frac{a_1}{a_2}$ – отношение высот входного и выходного сечения.

С учетом (3.4), (3.5), (3.13) уравнение (3.3) может быть записано как

$$Z_1 g \rho + P_1 + \frac{U_1^2}{2} \rho = Z_c g \rho + P_a + \frac{U_c^2}{2} \rho + \frac{U_c^2}{2} \rho + \left[\frac{\lambda}{4} \left(\frac{a_2}{btg \frac{\varphi}{2}} \frac{n-1}{n} - \frac{1}{2 \sin \frac{\varphi}{2}} \frac{n^2-1}{n^2} \right) + \zeta_{o.k.} \right] \frac{U_c^2}{2} \rho. \quad (3.14)$$

Анализ условий течения бумажной массы в напускных устройствах напорных ящиков проводим с использованием реологического уравнения волокнистых суспензий [3]. Данное реологическое уравнение дает хорошую сходимость с экспериментальными данными и достаточно полно отражает физическую суть структурообразования в потоке волокнистой суспензии. Последнее обстоятельство представляется особенно важным, ибо разработанное на основании данного реологического уравнения уравнение движения волокнистых суспензий дает возможность судить о внутреннем структурообразовании в потоке волокнистой суспензии, что является весьма важным при оценке степени диспергированности потока в проточной части напорных

ящиков.

Напускные устройства напорных ящиков представляют собой прямолинейные конфузоры, проходные сечения которых изменяются по ходу движения в одной плоскости и продольный линейный размер которых значительно превышает высоту входного сечения. Таким образом, задача исследования потока волокнистой суспензии сводится к плоской задаче, т.е. к движению суспензии между двумя плоскими пластинами, наклоненными друг к другу под углом φ . Предполагая, что движение в напускных устройствах является чисто радиальным, используя уравнение движения волокнистых суспензий в цилиндрических координатах, получаем уравнение, характеризующее изменение скоростей движения волокнистой суспензии вдоль линий тока в напускном устройстве

$$4 \left[\sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \frac{U}{r}} + \mu \frac{U}{r} \right] + \frac{\rho U^2}{2} = const, \quad (3.15)$$

где A_k – член, характеризующий суммарное структурное напряжение в потоке волокнистой суспензии, Па;
 α_k – временной фактор, характеризующий разрушение структуры в потоке суспензии, с;
 U – скоростной фактор потока, м/с;
 r – радиус-вектор, м;
 ρ – плотность суспензии, кг/м³;
 μ – коэффициент динамической вязкости диспергированной суспензии, Па·с.

После подстановки (3.14) расчетное уравнение принимает вид

$$4 \left[\sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \frac{U}{r}} + \mu \frac{U}{r} \right] + \frac{\rho U^2}{2} +$$

$$+ \frac{\rho U^2}{2} \left[\frac{\lambda}{4} \left(\frac{a_2}{b \operatorname{tg} \frac{\varphi}{4}} \cdot \frac{n-1}{n} - \frac{1}{2 \sin \frac{\varphi}{2}} \cdot \frac{n^2-1}{n^2} \right) + \zeta_{o.k} \right] = \text{const.} \quad (3.16)$$

Совместное решение полученного уравнения и уравнения неразрывности потока дает изменение скорости движения волокнистой суспензии вдоль линий тока с учетом потерь энергии в напускном устройстве напорного ящика. Значение постоянной в уравнении (3.16) определяется из эпюры скоростей на входе в напускное устройство, которую можно считать заданной, с учетом вида применяемой бумажной массы, скорости ее движения и гидравлической схемы проточной части, предшествующей напускному устройству.

Выяснив эпюру скоростей в зоне подачи потока на сеточный стол с учетом угла подачи, определяем давление струи на сетку по формуле

$$P = P_c + \kappa \frac{\rho U^2}{2}, \quad (3.17)$$

где P_c – статическое давление;
 κ – безразмерный коэффициент;
 ρ – плотность бумажной массы;
 U – скорость струи.

С учетом того, что статическое давление внутри струи равно атмосферному, выражение (3.17) преобразуется к виду

$$P_y = \kappa \frac{\rho U^2 \sin^2 \alpha}{2}, \quad (3.18)$$

где α – угол подачи струи на сетку.

3.2. Управление процессами структурообразования

в начальной зоне формирования бумагоделательной машины

Требования повышения качества вырабатываемой продукции при одновременном снижении массы 1 м^2 диктуют необходимость контроля структурных компонентов по толщине и площади листа бумаги с последующей корректировкой условий эксплуатации напускных и формирующих устройств. В основе расчета этих устройств должен лежать комплексный подход, учитывающий особенности реологических характеристик применяемых бумажных масс, взаимосвязь и взаимовлияние диспергирующей и обезвоживающей способностей конструктивных элементов формирующих устройств.

В практике целлюлозно-бумажного производства нашли широкое применение конструкции формирующих устройств, в которых для обеспечения более равномерного распределения волокон, лучшего их переплетения, повышения прочности бумаги в поперечном направлении сетка бумагоделательной машины на участке между грудным валом и отсасывающими ящиками сотрясается в горизонтальной плоскости, перпендикулярно направлению ее хода. Изучению эффективности воздействия трясочных механизмов на формирование структуры бумажного полотна посвящен целый ряд работ. Так в работе Ф.Г. Шухмана [7] предложена аналитическая зависимость для вычисления численного значения силы Φ , определяющей ориентацию волокон в структуре листа

$$\Phi = \frac{m \cdot V_c^2 \cdot (1 - \psi)}{l}, \quad (3.19)$$

где ψ – коэффициент отставания массы;

l – длина волокна;

V_c – скорость перемещения сетки;

m – масса волокон.

Для осуществления поворота волокна, по мнению

Ф. Г. Шухмана, необходимо выполнение условия

$$a > 0,393 \frac{l}{\alpha}, \quad (3.20)$$

где a – амплитуда колебаний сетки;
 α – коэффициент пропорциональности.

На основании приведенного неравенства делается вывод о взаимосвязи амплитуды колебаний сеточного стола с длиной волокна применяемой бумажной массы.

И. Д. Кугушевым показано [1], что при увеличении в композиции бумаги содержания длиноволокнистой фракции волокон амплитуду колебаний сеточного стола следует увеличивать, а с увеличением содержания коротких волокон – амплитуду колебаний необходимо уменьшать. При этом установлено

$$\alpha \cdot \omega^\sigma = \text{const}, \quad (3.21)$$

где α – амплитуда колебаний сетки;
 ω – круговая частота;
 σ – эмпирический коэффициент ($\sigma = 1,37 - 2,0$).

Из приведенной зависимости следует, что для выработки бумаги с заданной ориентацией волокон может быть использован ряд режимов тряски сеточного стола. Применение тряски в горизонтальной плоскости способствует улучшению качественных показателей бумаги, однако, эффективность ее использования резко снижается с повышением скорости машины свыше 250-350 м/мин. Применение механизмов тряски значительно усложняет конструкцию сеточных столов, ведет к снижению надежности их работы.

Анализ теоретических исследований по изучению влияния обезвоживания элементов сеточного стола на формирование

внутренней структуры потока бумажной массы в зоне отлива и формования бумаги свидетельствует о недостаточной изученности данного вопроса. Однако, как это было показано в работе [2], конструктивные элементы сеточного стола, расположенные в зоне отлива и формования, наряду с функцией обезвоживания выполняют функцию поддержания в потоке пульсаций давления, соизмеримых с длиной волокна, для предотвращения флокуляции и обеспечения равномерного распределения волокон в структуре бумажного полотна. В качестве примера рассмотрим результаты исследования пульсационных параметров потока бумажной массы, генерируемых конструктивными элементами зоны отлива и формования бумагоделательной машины № 5 Долинского ЦБЗ (рис.42). Гидродинамические характеристики потока бумажной массы на сеточном столе измерялись пьезокерамическим датчиком, перемещавшимся в слое бумажной массы вдоль сеточного стола. Анализ спектров пульсации давления в слое бумажной массы в зонах действия обезвоживающих элементов свидетельствует о том, что характерное повышение интенсивности пульсаций давления обуславливается как высокочастотными, так и низкочастотными пульсациями давления в зависимости от вида обезвоживающих элементов и их конструктивных параметров. Так, при взаимодействии грудной доски с нижней поверхностью сетки в слое бумажной массы возрастает интенсивность пульсаций давления на частотах порядка 6400 Гц (рис.42, кривая 1). Таким образом, в процессе отлива и формования бумаги сетка служит эффективным генератором высокочастотных пульсаций давления, способствующим равномерному распределению волокон в структуре листа бумаги.

Влияние регистрового валика на интенсивность пульсаций давления в слое бумажной массы обуславливается низкочастотными пульсациями с длиной волны порядка $63,3-25,3 \text{ м} \cdot 10^{-3}$, о чем свидетельствует кривая 2 рис.42. Низкочастотные пульсации давления не способствуют эффективному диспергированию волокнистой суспензии и могут привести к существенным колебаниям плотности бумажного листа, поэтому регистровый валик не является эффективным диспергатором.

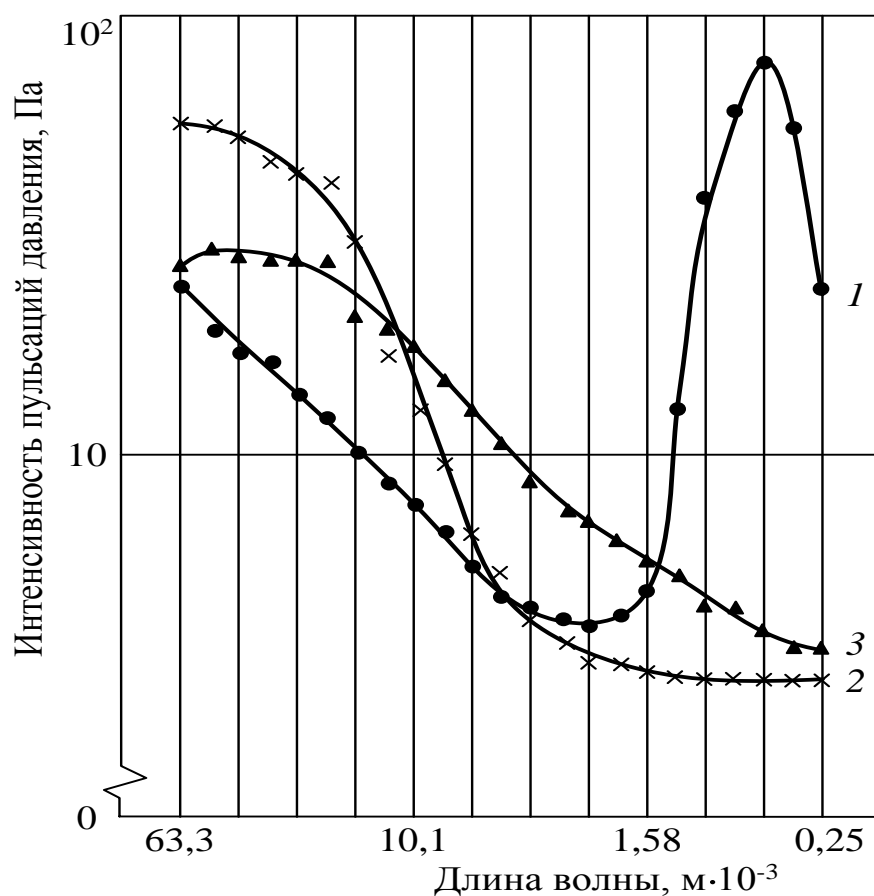


Рис.42. Спектры пульсации давления в потоке, бумажной массы на сеточном столе над: 1 – грудной доской; 2 – регистровым валиком; 3 – открытым участком сетки

Анализ воздействия мокрого отсасывающего ящика, состоящего из 8 гидропланок, на изменение интенсивности пульсаций давления в слое бумажной массы свидетельствует о существенном влиянии гидропланок на повышение уровня пульсаций давления в высокочастотной области спектра, аналогично случаю взаимодействия сетки с грудной доской.

Анализ изменения интенсивности пульсаций давления на открытом участке сетки длиной 0,7 м показывает повышение уровня энергии пульсаций давления за счет резонансных колебаний свободного участка сетки, обусловленного низкочастотными

пульсациями давления ниже 40 Гц (рис.42 кривая 3), что также приводит к значительным колебаниям плотности по площади бумажного листа.

В работе [4] высказано предположение о возможности предотвращения или уменьшения флокуляции в потоке бумажной массы на сеточном столе за счет воздействия вертикальных колебаний сетки. Получены зависимости, описывающие вертикальные колебания сетки, и влияние основных параметров колебаний на деформацию бумажной массы в процессе ее обезвоживания на плоскосеточной бумагоделательной машине.

Для расчета собственных частот колебаний сетки предложено уравнение

$$\frac{EJ}{\rho} \cdot \frac{d^4 y(x,t)}{dx^4} + \left(V^2 - \frac{T}{\rho} \right) \cdot \frac{d^2 y(x,t)}{dx^2} + 2V \frac{d^2 y(x,t)}{dx dt} + \frac{d^2 y(x,t)}{dt^2} = 0, \quad (3.22)$$

где y – вертикальное смещение сетки при колебаниях;

x – координаты вдоль оси сетки;

t – время;

E – приведенный модуль упругости сетки при колебании;

J – приведенный момент инерции;

ρ – масса 1 м² сетки с размещенной на ней бумажной массой;

V – натяжение сетки.

Условия существования флокул в потоке бумажной массы выражаются уравнением

$$P = A \cdot \dot{\gamma} = \frac{A^2 \omega^2}{V} \left(1 + \frac{nV}{\omega L} \right)^2, \quad (3.23)$$

где P – работа, необходимая для разрушения флокулы;

A – амплитуда колебаний;

$\dot{\gamma}$ – дефлокулирующий градиент скорости;
 ω – круговая частота.

Нестационарные турбулентные потоки характеризуются наличием высокочастотных и низкочастотных пульсаций давления. Принято считать, что низкочастотные колебания проявляют свое влияние лишь в пристенном слое, не изменяя общего профиля скорости потока при условии, что период возмущений значительно короче, чем период основных регулярных колебаний. Высокочастотные колебания изменяют общую картину турбулентного потока вследствие взаимодействия турбулентных пульсаций с регулярными возмущающими пульсациями. Такое взаимодействие пульсаций характеризуется сложным спектром колебаний.

В работе [8] пульсационная скорость представляется в следующем виде

$$U'(t) = U'_i + W'_i, \quad (3.24)$$

где U'_i – турбулентные составляющие пульсационной скорости;

W'_i – регулярные составляющие пульсационной скорости.

Касательные напряжения в турбулентном потоке при этом выражаются

$$\tau_T = -\rho[U'_i U'_x + U'_i W'_k + U'_k W'_i + W'_k W'_i], \quad (3.25)$$

где ρ – плотность среды.

Данное выражение дает численное значение величины касательного напряжения в турбулентном потоке вследствие турбулентных (случайных) и наложенных (регулярных) колебаний

с учетом их взаимодействия.

Влияние акустических колебаний на развитие и переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный показано на рис.43.

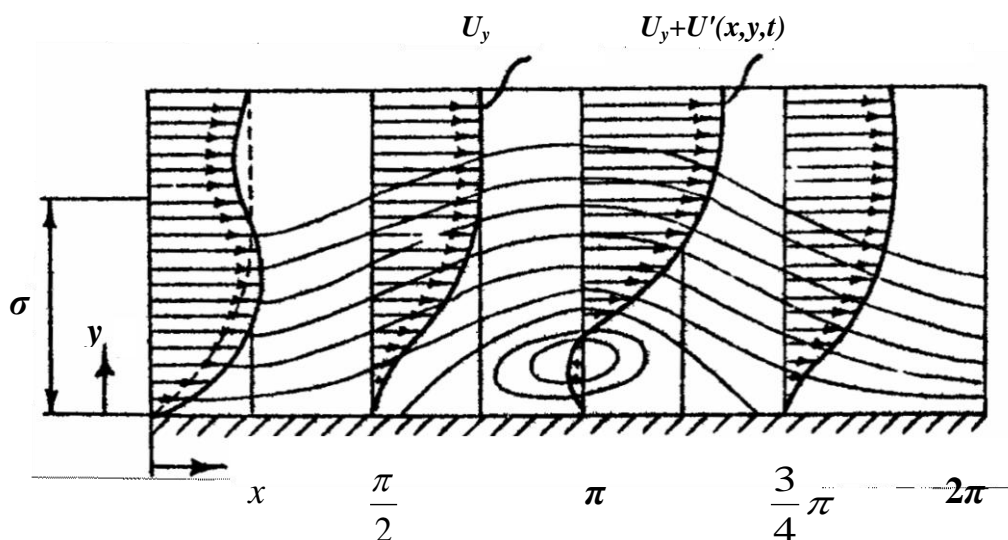


Рис.43. Влияние внешнего возмущения на изменение эпюры скоростей в потоке над продольно обтекаемой пластиной: U_y – основное течение; $U_y + U'(x, y, t)$ – возмущенное течение

Отмечается повышение уровня турбулентности продольной составляющей скорости под воздействием акустических колебаний при практически неизменной интенсивности турбулентности поперечных составляющих [8].

Оценим влияние виброактивации на формирование турбулентных пульсаций в потоке бумажной массы в начальной зоне отлива и формования БДМ.

Для бумажной массы, являющейся несжимаемой жидкой средой, с учетом ее реологических характеристик было получено уравнение, описывающее многомерное движение в векторной форме [3]

$$\rho \frac{d\bar{V}}{dt} = \rho \bar{F} - \text{grad}P + d\omega \left(\sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha \dot{\gamma}_{ij}} + \mu \dot{\gamma}_{ij} \right),$$

где ρ – плотность;

\bar{V} – вектор абсолютной скорости потока;

t – время;

F – вектор массовых сил;

P – тензор напряжений в суспензии;

A_k, α – параметры, определяемые реологическими характеристиками используемых бумажных масс;

$\dot{\gamma}$ – градиент скорости;

μ – коэффициент динамической вязкости.

Характерной особенностью уравнения, учитывающей реологические особенности бумажных масс, является наличие в нем члена, характеризующего внутреннее напряжение структурированного потока, т.е. члена

$$\sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\alpha_k \dot{\gamma}_{ij}}.$$

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

$$\rho \frac{d\bar{V}}{dt} = \rho \bar{F} - \text{grad}P + \mu_T \text{div} \dot{\gamma}_{ij},$$

где μ_T – коэффициент динамической вязкости, учитывающий демпфирующие свойства волокон.

В данном уравнении численное значение коэффициента динамической вязкости μ_T отличается от численного значения коэффициента динамической вязкости для ньютоновских жидкостей, поскольку в диспергированном потоке бумажной массы

на величину коэффициента μ_T оказывают влияние ориентированные по ходу потока волокна.

Для оценки эффективности воздействия гидропланки, соединенной с электромагнитным вибратором (вибропланки), на внутреннюю структуру потока бумажной массы на сеточном столе принимаем расчетную схему, показанную на рис.44.

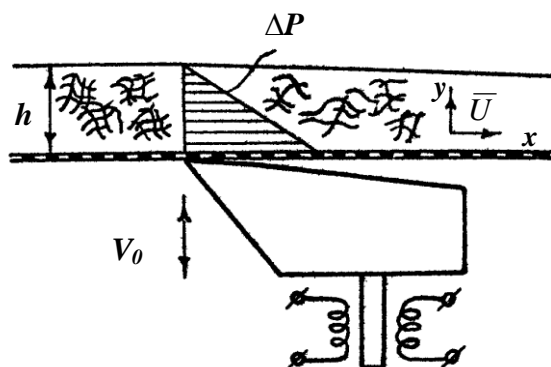


Рис.44. Расчетная схема пульсаций давления, генерируемых вибропланкой в бумажной массе на сеточном столе

Колебания в бумажной массе, размещенной на движущейся сетке, генерируются вертикальными перемещениями вибропланки, задаваемыми синусоидным генератором колебаний.

Рассматривая распространение плоской волны в двумерном слое бумажной массе, ограничимся решением двумерной задачи. В этом случае уравнение движения диспергированного потока бумажной массы случая имеет вид

$$\frac{dV}{dt} + U \frac{dV}{dx} + V \frac{dV}{dy} = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} + \mu \frac{d^2 x}{dy^2}. \quad (3.26)$$

Вибропланка подвергается вертикальным колебаниям со скоростью

$$V_0 = A_0 \omega \sin \omega t, \quad (3.27)$$

где A – амплитуда колебаний вибропланки;
 ω – круговая частота колебаний вибропланки.

После подстановки значения виброскорости V_0 в уравнение движения потока получаем уравнение движения с учетом влияния наложенных колебаний

$$\frac{dV_0}{dt} + U_0 \frac{dV_0}{dx} + V_0 \frac{dV_0}{dy} = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dy} + \mu \frac{d^2 V_0}{dy^2}, \quad (3.28)$$

где $\frac{dU_0}{dx}$, $\frac{dV_0}{dy}$ – проекции виброскорости на оси x и y ;

$\frac{dP}{dy}$ – градиент давления;

ρ – плотность суспензии;

μ – коэффициент динамической вязкости.

Поскольку виброскорость V_0 является функцией времени, уравнение (3.26) преобразуется к виду

$$\frac{dP}{dy} = -\rho \frac{dV_0}{dt}. \quad (3.29)$$

Так как

$$\frac{dV_0}{dt} = A_0 \omega^2 \cos \omega t, \quad (3.30)$$

уравнение приводится к виду

$$dP = -\rho A_2 \omega^2 \cos \omega t. \quad (3.31)$$

После интегрирования получаем выражение для определения разности давлений по высоте слоя бумажной массы

$$\Delta P = -\rho A_0 \omega^2 \int_{y_0}^{y_1} \cos \omega t dy. \quad (3.32)$$

Поскольку

$$t = \frac{y}{c},$$

где c – скорость распространения акустических колебаний в жидкости.

Выражение (3.32) преобразуется к виду

$$\Delta P = -\rho A_0 \omega^2 \int_{y_0}^h \cos \frac{2\pi f y}{c} dy = -\rho \frac{A_0 \omega^2 c}{2\pi f} \left(\sin \frac{2\pi f h}{c} - \sin \frac{2\pi f y_0}{c} \right). \quad (3.33)$$

Разность пульсаций давления ΔP , вызванная колебаниями виброплатки, наложенных на осредненное движение бумажной массы, приводит к возникновению в потоке пульсаций давления P' в продольном направлении.

Диспергированное состояние бумажной массы определяется гидродинамическими параметрами течения, формирующими турбулентный режим движения потока.

Пульсации давления в турбулентном потоке связаны с

пульсационной скоростью соотношением [9]

$$P' = -\rho \bar{U} U',$$

где ρ – плотность суспензии;
 \bar{U} – осредненная скорость течения;
 U' – пульсационная скорость.

Пульсации давления в бумажной массе на сеточном столе, вызванные воздействием вибропланки

$$\Delta P = P' = -\rho \bar{U} U_0', \quad (3.34)$$

где U_0' – продольная пульсационная скорость от воздействия вибропланки.

С учетом сказанного уравнение, характеризующее распределение пульсационной скорости U_0' по высоте слоя бумажной массы на сеточном столе, приобретает вид

$$U_0' = -\frac{\Delta P}{\rho \bar{U}} = \frac{A_0 \omega^2 c}{2\pi f \bar{U}} \left(\sin \frac{2\pi f h}{c} - \sin \frac{2\pi f y_0}{c} \right). \quad (3.35)$$

Анализ полученного уравнения показывает, что величина пульсационной скорости U_0' , вызванная колебаниями вибропланки, уменьшается с увеличением осредненной скорости \bar{U} , что свидетельствует о приемлемости данного способа оценки виброактивации на низко- и среднескоростных бумагоделательных машинах. Регулирование величины пульсационной скорости U и тем самым интенсивности пульсаций давления в бумажной массе целесообразно осуществлять изменением амплитуды колебаний A_0 при сохранении постоянными прочих параметров.

Величина амплитуды колебаний определяется по величине

виброускорения

$$a = A_0 \cdot \omega^2. \quad (3.36)$$

Принимая равными компоненты мгновенных пульсационных скоростей, определяем величину полной мгновенной пульсационной скорости

$$W' = \sqrt{(U')^2 + (V')^2 + (\omega')^2}.$$

Величина энергии турбулентности в потоке бумажной массы определяется из выражения

$$E = \frac{1}{2}(W')^2.$$

Для определения энергии пульсаций давления, генерируемых вибропланкой в потоке бумажной массы на сеточном столе, по аналогии принимаем

$$E_0 = \frac{1}{2}(U_0')^2, \quad (3.37)$$

где E_0 – энергия наложенных пульсаций давления, генерируемых вибропланкой.

Пульсационная скорость может быть представлена в виде суммы турбулентных U' и наложенных U_0' составляющих

$$U_{(t)} = U_i' + U_{0i}'. \quad (3.38)$$

Таким образом, уравнение для определения касательных напряжений Рейнольдса, возникающих в потоке, может быть представлено в виде

$$\tau = -\rho \left[\overline{U_i' U_\kappa'} + \overline{U_i' U_{0\kappa}'} + \overline{U_\kappa' U_{0i}'} + \overline{U_{0i}' U_{0\kappa}'} \right], \quad (3.39)$$

где $\overline{U_i' U_\kappa'}$ – напряжения трения, определяемые турбулентными пульсациями;
 $\overline{U_i' U_{0\kappa}'} + \overline{U_\kappa' U_{0i}'}$ – напряжения трения, определяемые взаимодействиями турбулентных и наложенных колебаний;
 $\overline{U_{0i}' U_{0\kappa}'}$ – напряжения трения, определяемые взаимодействием регулярных колебаний.

Вследствие равенства компонент мгновенной пульсационной скорости, характерного для изотропной турбулентности, уравнение упрощается

$$\tau = -\rho \left[(U_i')^2 + (U_{0i}')^2 + 2(U_i' U_{0i}') \right] = -\rho \left[(U')^2 + (U_0')^2 + 2(U' U_0') \right]. \quad (3.40)$$

или

$$\tau = -2\rho(E + E_0 + 2\sqrt{EE_0}), \quad (3.41)$$

где E – энергия турбулентных пульсаций;

E_0 – энергия наложенных пульсаций.

Степень диспергированности бумажной массы на сеточном

столе определяется величиной касательных напряжений. Сопоставление величины касательных напряжений, обусловленных взаимодействием турбулентных и наложенных пульсаций, полученных расчетным путем с напряжениями, характеризующими прочность волокнистой структуры, взятыми из реологических кривых, позволяет сделать вывод о степени диспергированности бумажной массы в зоне отлива и формования, т.е. должно выполняться неравенство

(3.42)

3.3. Моделирование процессов формования и обезвоживания бумажного полотна

Процесс обезвоживания бумажной массы в формующем устройстве БКДМ является одним из основных в производстве бумаги и картона. Качество бумажного полотна и производительность машин во многом определяются параметрами гидродинамической фильтрации и формования в формующем устройстве. В последнее время наиболее значительные изменения произошли именно в формующей части машины. По конструкции формующего устройства называют всю бумагоделательную машину. Плоскосеточные машины в настоящее время остаются основным бумагоделательным оборудованием. Вопросы их работы исследованы наиболее полно, совершенствуются методы моделирования гидродинамических процессов, протекающих при формовании бумаги. Только понимая работу плоскосеточных формующих устройств, можно анализировать работу формующих устройств современных компоновок, включая двухсеточные.

Обезвоживание бумажной массы на сеточном столе происходит на отдельных обезвоживающих элементах регистражной части: регистровых валиках (гладких и желобчатых), гидропланках, открытых участках сетки и отсасывающих ящиках. Теория

обезвоживания бумажного полотна разработана профессором Кугушевым И. Д. [1].

В набегающем водяном клине создается напор, возникающий между сеткой и регистровым валиком. Расчетная схема для определения фильтрационного напора приведена на рис.45. Критический угол набегающего водяного клина [1]

$$\omega'_k = \sqrt{\frac{V^2 - 2g \cdot h}{g \cdot R + V^2(2\varepsilon + 1)}}. \quad (3.43)$$

Максимальный напор набегающего водяного клина определяется из выражения

$$H = \frac{V}{2g} - h,$$

где

$$X_B = R \sin \omega'_k, \quad (3.44)$$

$$X_K = R \sin 2\omega'_k. \quad (3.45)$$

Тогда величина давления на участке от X_A до 0 вычисляется по формуле

$$H(x) = \frac{V^2}{2g} \sin \left(\frac{X}{X_B} \cdot \frac{\pi}{2} \right). \quad (3.46)$$

В точке X_B величина импульса давления достигает максимума. На участке $X_B < X < 0$ фильтрационный напор уменьшается. В диапазоне от 0 до X_K величина вакуума растет.

Этот диапазон соответствует критическому углу сбегающего водяного клина

$$\omega t_k = \sqrt{\frac{2 \cdot K \cdot H_{\max} \cdot (C_0 - C_M)}{R \cdot V \cdot (C - C_0)}}, \quad (3.47)$$

где K – коэффициент фильтрации бумажной массы;
 H_{\max} – максимальный фильтрационный напор;
 C_0 – концентрация над осью валика;
 C_M – концентрация оборотной воды;
 C – концентрация осевшего слоя волокон.

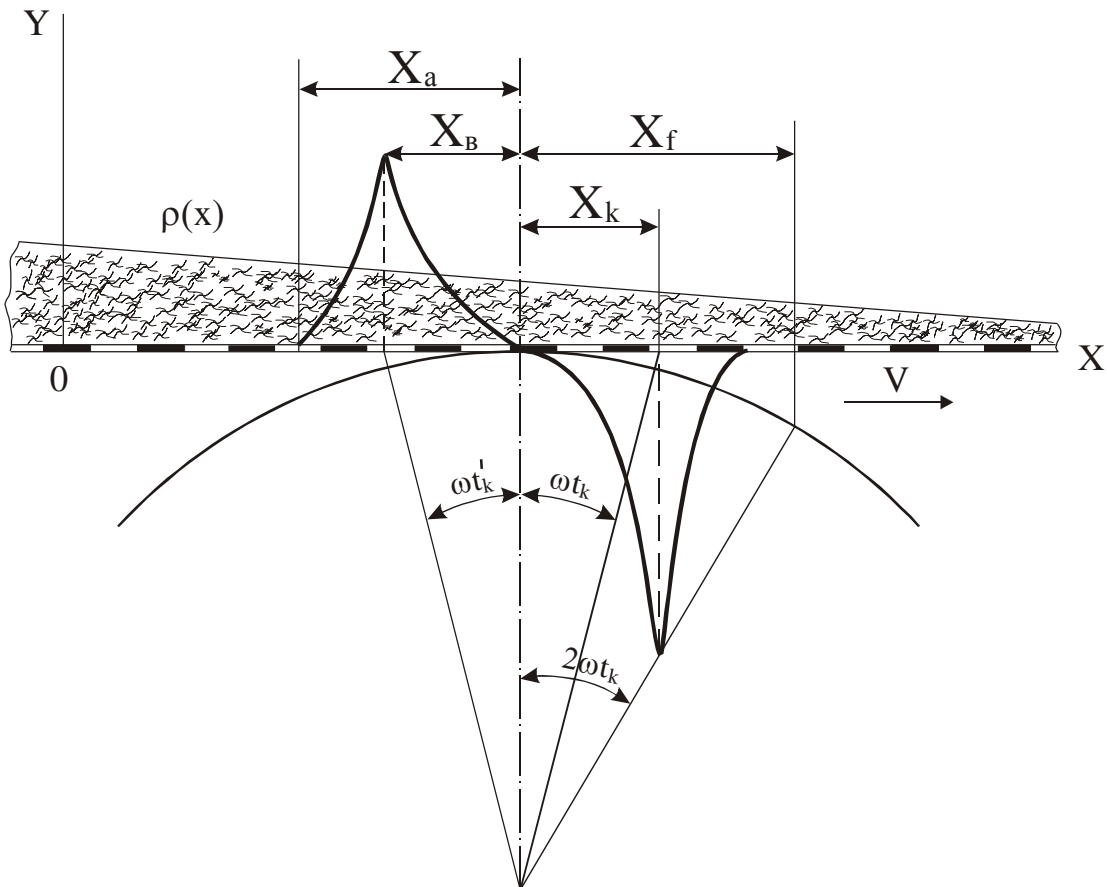


Рис.45. Расчетная схема для определения фильтрационного напора

$$H = \frac{V^2}{2g}; \quad \frac{V^2}{2g} < S_{н.н.}, \quad (3.48)$$

где $S_{н.н.}$ – давление насыщенных паров волокнистой суспензии.

Величина вакуума на рассматриваемом участке может быть рассчитана по формуле

$$0 < X \leq X_F$$

$$H(x) = \frac{V^2}{2g} \sin\left(\frac{X}{X_k} \cdot \frac{\pi}{2}\right). \quad (3.49)$$

После достижения максимального значения в точке, соответствующей критическому углу сбегавшего водяного клина, вакуум убывает и стремится к 0 в точке, соответствующей углу $2\omega t_k$.

При $X_A < X \leq 0$

$$f^{1-2}(x) = \delta \frac{V^2}{2g} \sin\left(\frac{X}{X_B} \cdot \frac{\pi}{2}\right). \quad (3.50)$$

При $0 < X \leq X_F$

$$f^{3-4}(x) = \delta \frac{V^2}{2g} \sin\left(\frac{X}{X_k} \cdot \frac{\pi}{2}\right).$$

Для определения градиентов сдвига в потоке бумажной массы необходимо определить F_I

$$F_I(x) = \int f(x) dx.$$

Расчет $F_I(x)$ ведется в зависимости от диапазона горизонтальной координаты

$$F_1^{1-2} = \delta \frac{X_B}{\pi} \cdot \frac{V^2}{g} \cos\left(\frac{X}{X_B} \cdot \frac{\pi}{2}\right), \quad (3.51)$$

$$F_1^{3-4} = \delta \frac{X_k}{\pi} \cdot \frac{V^2}{g} \cos\left(\frac{X}{X_k} \cdot \frac{\pi}{2}\right). \quad (3.52)$$

На открытом участке сетки вынуждающая сила постоянна и равна напору, оказываемому уровнем массы, находящейся на сетке, и обезвоживание происходит под действием силы тяжести

$$h(x) = h_n,$$

$$f^5(x) = \rho(x) \cdot g \cdot h_n, \quad (3.53)$$

$$F_1^5 = g \cdot h_n \cdot \left(\rho_0 \cdot X - \frac{\beta \cdot X^2}{2} \right). \quad (3.54)$$

При высокой скорости машины регистровые валики создают помехи формированию бумажного полотна. При прохождении над регистровыми валиками волокнистый слой на сетке подвергается попеременному воздействию давления и разрежения.

Разрежение, создаваемое гидропланками, можно регулировать, изменяя угол наклона планки к сетке, что позволяет подбирать оптимальные условия для наилучшего формирования бумажного полотна. Отсасывающее действие гидропланок возрастает по мере увеличения концентрации волокна в слое бумажной массы, т.е. по ходу движения бумажного полотна.

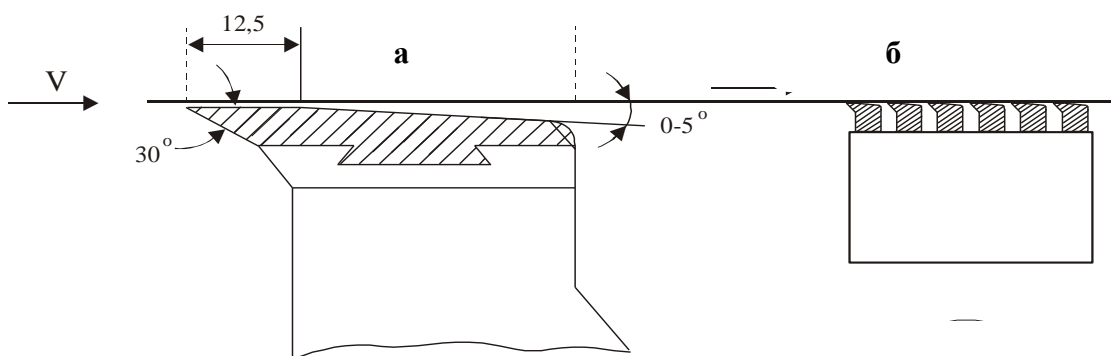


Рис.46. Гидропланки: а - стационарная; б - многоэлементная

Типичные конструкции гидропланок показаны на рис.46. Как видно из этого рисунка, передняя кромка гидропланки скошена под углом 30° к сетке, на плоскую переднюю часть планки шириной $12,5 \text{ мм}$ опирается сетка. Остальная поверхность гидропланки, также обычно плоская, расположена под углом $1\text{—}2,5^\circ$ к сетке. Обычно общая ширина гидропланки составляет 50 мм , а соотношение между горизонтальной и наклонной частью ее находится в пределах от $1\div 3$ до $1\div 2$, повышаясь в зависимости от места положения планки по ходу сетки. Для создания лучшего уплотнения горизонтальная часть планки делается более широкой во второй половине сеточного стола. Конструкция гидропланки должна исключать ее прогиб и вибрацию. Для создания легкого импульса, заменяющего тряску и улучшающего формирование бумажного полотна, переднюю кромку гидропланки слегка закругляют. Кроме стационарных гидропланок применяются также гидропланки с регулируемым углом наклона ее поверхности по отношению к сетке. На передней кромке гидропланки наблюдается импульс давления, величина которого зависит от угла передней кромки гидропланки.

Подсеточный слой воды, подающийся на гидропланку, разделяется на два потока: нисходящий и восходящий. Последний создает давление на сетку и часть его может перейти в надсеточный слой. Без учета действия сил тяжести и гидравлического сопротивления сетки распределение потоков будет происходить в

соответствии со следующей зависимостью [2]

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{1 - \cos \beta}{1 + \cos \beta}, \quad (3.55)$$

где Q_1, Q_2 - производительности восходящего и нисходящего потоков;

β - угол передней кромки гидропланки.

Поскольку

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (3.56)$$

определим из формулы (3.56) Q_2 и подставим в выражение (3.55). Результат, выраженный относительно Q_1 , будет иметь вид

$$Q_1 = \frac{1}{2} \cdot V \cdot L \cdot h_p \cdot (1 - \cos \beta), \quad (3.57)$$

где V – скорость сетки;

L – ширина сетки;

h_p – высота подсеточного слоя.

Преобразуем формулу гидравлического напора

$$H = \frac{V^2 \phi}{2g} \cdot \frac{S}{S} = \frac{V_\phi Q_1}{2gS}, \quad (3.58)$$

где $V_\phi = V \cdot \sin \beta$ – скорость фильтрации; (3.59)

S – сечение формирующей сетки.

Допустим, что

$$S = 2X_k L, \quad (3.60)$$

где X_k – расстояние от передней кромки гидропланки в горизонтальной плоскости до максимума фильтрационного напора восходящего потока.

Подставив (3.57), (3.59) и (3.60) в (3.58), получим

$$H = \frac{V^2 \cdot \sin \beta \cdot h_p \cdot (1 - \cos \beta)}{8g \cdot X_k}. \quad (3.61)$$

Поскольку часть напора H расходуется на преодоление сопротивления слоя бумажной массы на сетке h_n и гидродинамического сопротивления сетки h_c , то

$$h_c = \zeta \cdot V_{\phi}^2, \quad (3.62)$$

где ζ - коэффициент сопротивления сетки.

Так как

$$V \cdot \sin \beta = \sqrt{2g(H - h_n - h_c)}. \quad (3.63)$$

Подставим (3.19), (3.20) в (3.21) и после преобразования получим

$$X_k = \frac{V^2 \sin \beta \cdot h_p (1 - \cos \beta)}{8g \left(\frac{V^2 \sin^2 \beta}{2g} + h_n + \zeta \cdot V^2 \sin^2 \beta \right)}. \quad (3.64)$$

Предположим, что возникающий импульс давления описывается следующими уравнениями

$$\begin{cases} H = H_{\max} \sin \frac{\pi X}{2X_k}, & \text{при } 0 \leq X \leq X_k \\ H = H_{\max} \left(1 - \cos \frac{\pi X + 2\pi X_k}{2X_k} \right), & \text{при } X_k < X \leq 2X_k \end{cases}. \quad (3.65)$$

Исходя из этого, скорость фильтрации можно выразить

$$V_\phi = \frac{d(\Delta h)}{dt} = \frac{V \cdot d(\Delta h)}{dX}, \quad (3.66)$$

где Δh – высота слоя бумажной массы.

Приравнявая выражение (3.69) к (3.66) и получаем

$$\frac{V \cdot d(\Delta h)}{dX} = \sqrt{2g(H - h_n - h_c)}. \quad (3.67)$$

Подставляя выражения (3.62) и (3.65) в (3.67), получим уравнение в интегральной форме

$$\Delta h = \int_0^{X_k} \frac{1}{V} \sqrt{\left(\frac{V^2 \sin \beta}{2g} \sin \frac{\pi X}{2X_k} - h_n - \zeta \cdot V^2 \sin^2 \beta \right)} dX + \\ + \int_{X_k}^{2X_k} \frac{1}{V} \sqrt{\left(\frac{V^2 \sin \beta}{2g} \left(1 - \cos \frac{\pi X + 2\pi X_k}{2X_k} \right) - h_n - \zeta \cdot V^2 \sin^2 \beta \right)} dX. \quad (3.68)$$

Данный интеграл решается численными методами с использованием вычислительной техники.

В сбегавшем водяном клине создается вакуум. Вакуум является основной составляющей фильтрационного напора в процессе обезвоживания бумажной массы при скоростях сетки свыше 50-70 м/мин.

Так как слой осевших волокон размывается в набегающем клине, то фильтрация на сетке в сбегавшем водяном клине начинается с новым осаждением волокон из бумажной массы концентрацией C_0 и переменным фильтрационным напором, который можно выразить следующей функцией

$$H = f(x). \quad (3.69)$$

В первом приближении начальную часть сбегавшего водяного клина можно рассматривать как поршневой насос. При этом скорость фильтрации воды в сбегавший водяной клин равна скорости увеличения расстояния между сеткой и наклонной поверхностью гидропланки

$$V_{\phi} = V \cdot \operatorname{tg} \gamma, \quad (3.70)$$

где V - скорость сетки;
 γ - угол наклона гидропланки.

Поэтому высота слоя удаленной воды равна высоте слоя сбегавшего водяного клина

$$\Delta h = y = X \cdot \operatorname{tg} \gamma. \quad (3.71)$$

Так как процесс обезвоживания описывается уравнением баланса массы

$$h_0 = h_n + \Delta h, \quad (3.72)$$

и баланса волокна

$$h_0 C_0 = (h_n - \Delta l) C_0 + \Delta l \cdot C + \Delta h \cdot C_{RG}, \quad (3.73)$$

где Δl - прирост фильтрующего слоя;
 h_0, h_n - высота надсеточного слоя до и после обезвоживания соответственно;
 C_0 - концентрация массы в надсеточном слое;
 C - концентрация слоя осевших волокон;
 C_{RG} - концентрация регистровых вод

После подстановки (3.66) в (3.71) получаем

$$\Delta l = \Delta h \frac{C_0 - C_{RG}}{C - C_0}. \quad (3.74)$$

Подставим (3.69) в (3.72), а затем в уравнение Дарси (считая, что $l_0=0$)

$$V_\phi = \frac{kH(C - C_0)}{X \cdot \text{tg} \gamma (C_0 - C_{RG})}, \quad (3.75)$$

где k - коэффициент фильтрации.

Скорость фильтрации равна скорости увеличения расстояния между сеткой и наклонной поверхностью гидропланки вплоть до критической точки. Поэтому высота слоя воды,

удаленной из бумажной массы на участке сбегающего клина, должна быть равна высоте клина, а вакуум развивается такой, чтобы обеспечить фильтрацию указанного количества воды через слой осевших волокон (как следует из работы поршневого насоса).

Полагаем, что расстоянию X_k соответствует максимальный вакуум, возникающий внутри заполняющей водяной клин жидкости, и фильтрация достигает предельной скорости. Назовем X_k критическим углом сбегающего водяного клина.

Максимальный фильтрационный напор (при $X=X_k$)

$$H_{\max} = h_0 - h_k + \frac{V^2}{2g}. \quad (3.76)$$

Принимаем

$$H_{\max} = \frac{V^2}{2g}. \quad (3.77)$$

Чтобы составить уравнение для X_k , подставляем (3.75) в (3.73), затем приравниваем результат к выражению (3.68) и выражаем относительно X_k

$$X_k = \frac{kV(C-C_0)}{2g \cdot \text{tg}^2 \gamma (C_0 - C_{RG})}. \quad (3.78)$$

После достижения максимальной величины ($V^2/2g$) в критической точке сбегающего водяного клина X_k вакуум начинает убывать до нуля приблизительно на расстоянии $2X_k$. Предполагается, что вакуум в этой зоне уменьшается по формуле

$$H = \frac{V^2}{2g} \left(1 - \cos \frac{\pi X + 2\pi X_k}{2X_k} \right). \quad (3.79)$$

Обезвоживание бумажной массы происходит через слой волокон, осевших после размыва слоя $Y_k = X_k \cdot \operatorname{tg} \gamma$ над набегающим клином регистра валика. Тогда, из выражения (3.72), получаем

$$l_0 = \frac{C_0 - C_{RG}}{C - C_0} Y_k. \quad (3.80)$$

Подставляя выражения (3.66), (3.72) и (3.80) в уравнение Дарси, получаем дифференциальное уравнение для определения скорости фильтрации на расчетном участке

$$V_\phi = \frac{V \cdot d(\Delta h)}{dX} = \frac{kV^2(C - C_0)}{2g(C_0 - C_{RG})} \cdot \frac{1 - \cos \frac{\pi X + 2\pi X_k}{2X_k}}{Y_k + \Delta h}. \quad (3.81)$$

$$\begin{aligned} \text{Граничные условия } X = X_k, \Delta h = 0, \\ X = 2X_k, \Delta h = h_1. \end{aligned}$$

В результате интегрирования и подстановки граничных условий получим выражение

$$h_1^2 + 2Y_k h_1 - Y_k^2 \left(2 - \frac{4}{\pi} \right) = 0. \quad (3.82)$$

Решение этого квадратного уравнения имеет вид

$$h_1 = Y_k \left(-1 + \sqrt{3 - \frac{4}{\pi}} \right) \approx 0,314 Y_k. \quad (3.83)$$

Полученные зависимости позволяют определять оптимальную компоновку размещение гидропланок с учетом

требуемых условий формирования бумажного полотна в мокрой части сеточного стола БДМ и, тем самым, управлять процессом обезвоживания и формирования бумажного полотна.

Для расчета обезвоживания регистравая часть разбивается на отдельные расчетные участки. Весь расчет сводится к последовательному расчету обезвоживания бумажной массы на следующих друг за другом расчетных участках.

Принципиальным отличием обезвоживания на сеточной части от аналогичных процессов в других отраслях промышленности является то, что одновременно с обезвоживанием идет процесс формирования бумажного полотна.

Принципиальная схема процессов обезвоживания и формирования бумажной массы на сеточном столе представлена на рис. 47.

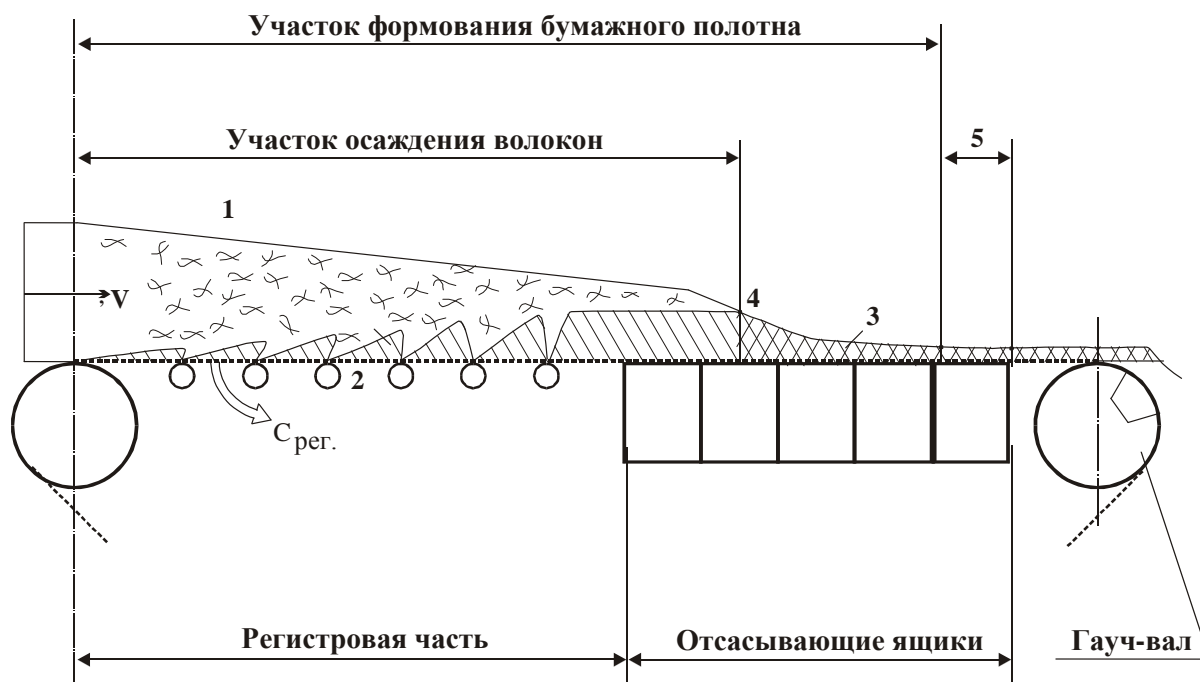


Рис.47. Принципиальная схема обезвоживания и формирования бумажного полотна на сеточном столе: 1 – бумажная масса; 2 – слой осевших волокон концентрацией C ; 3 – бумажное полотно; 4 – граница зеркала залива; 5 – участок стабилизации обезвоживания

Следует отметить, что определенная интенсивность

колебаний сетки предотвращает возможность повторного флокулообразования в бумажной массе, что улучшает равномерность распределения волокон. Поэтому необходимо оптимизировать расстановку обезвоживающих элементов с целью не только обеспечить необходимый режим обезвоживания, но и создать оптимальный режим вертикальных смещений сетки.

Для описания вертикальных смещений на участке между обезвоживающими элементами используем уравнение баланса сил

$$\frac{d}{dt} \left(\rho(x) \frac{dy(x,t)}{dt} \right) = T \frac{dy^2(x,t)}{dx^2} + f(x), \quad (3.84)$$

где $\rho(x)$ – функция, описывающая изменение плотности;

T – натяжение сетки;

$f(x)$ – сила, действующая на расчетном участке:

$$\frac{d}{dt} = \frac{d}{dt} + V \frac{d}{dx}. \quad (3.85)$$

Поскольку ограничиваемся рассмотрением установившихся колебаний, то

$$\frac{d}{dt} = \frac{d}{dx} V \quad (3.86)$$

$$V^2 \frac{d}{dx} \left(\rho(x) \frac{dy}{dx} \right) = T \frac{d^2 y}{dx^2} + f, \quad (3.87)$$

$$V^2 \left(\frac{d\rho(x)}{dx} \cdot \frac{dy}{dx} + \rho(x) \frac{d^2 y}{dx^2} \right) = T \frac{d^2 y}{dx^2} + f$$

или

$$\frac{d^2 y}{dx^2} \left(V^2 \rho(x) - T \right) + V^2 \frac{d\rho(x)}{dx} \cdot \frac{dy}{dx} = f. \quad (3.88)$$

Интегрируя уравнение (3.87), получим

$$V^2 \rho \frac{dy}{dx} = T \frac{dy}{dx} + \int f(x) dx + C_1 \quad (3.89)$$

или

$$\left(V^2 \rho(x) - T \right) \frac{dy}{dx} = \int f(x) dx + C_1. \quad (3.90)$$

Отсюда

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\int f(x) dx}{V^2 \rho(x) - T} + \frac{C_1}{V^2 \rho(x) - T}. \quad (3.91)$$

Обозначим

$$\int f(x) dx = F_1(x). \quad (3.92)$$

Для определения скоростей сдвига в слое бумажной массы, прилежащем к сетке, воспользуемся уравнением движения волокнистых суспензий [3].

Компоненты тензора деформаций в развернутом виде имеют вид

$$\| \gamma_{ij} \| \left\{ \begin{array}{l} \frac{dU}{dx}; \frac{1}{2} \left(\frac{dU}{dy} + \frac{dV}{dx} \right); \frac{1}{2} \left(\frac{dU}{dz} + \frac{dW}{dx} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{dU}{dy} + \frac{dV}{dx} \right); \frac{dV}{dy}; \frac{1}{2} \left(\frac{dV}{dz} + \frac{dW}{dy} \right), \\ \frac{1}{2} \left(\frac{dW}{dx} + \frac{dU}{dz} \right); \frac{1}{2} \left(\frac{dW}{dy} + \frac{dV}{dz} \right); \frac{dW}{dz} \end{array} \right. , \quad (3.93)$$

где U, V, W – проекции скорости соответственно на оси OX, OY и OZ .

Компоненты тензора скоростей деформаций в потоке бумажной массы для постоянной скорости движения сетки могут быть представлены в виде

$$\dot{\gamma}_{xy} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{dx} \left[\frac{dy}{dt} \right]; \quad (3.94)$$

$$\dot{\gamma}_{xx} = \dot{\gamma}_{yy} = 0,$$

где

$$\frac{dy}{dt} = \frac{dy}{dt} + V \frac{dy}{dx}. \quad (3.95)$$

Так как рассматриваем установившееся движение, то

$$\frac{dy}{dt} = 0. \quad (3.96)$$

Тогда

$$\dot{\gamma}_{xy} = \frac{V}{2} \cdot \frac{d^2 y}{dx^2}. \quad (3.97)$$

Выражая из уравнения (3.97) $\dot{\gamma}_{xy}$ и произведя подстановку в (3.88), получаем

$$\frac{2}{V} \left(V^2 \rho(x) - T \right) \cdot \dot{\gamma}_{xy} + V^2 \frac{d\rho(x)}{dx} \cdot \frac{dy}{dx} = f. \quad (3.98)$$

Отсюда, с учетом (3.95), получаем выражение для определения скоростей сдвига

$$\dot{\gamma}_{xy} = \frac{V \cdot f}{2(V^2 \rho(x) - T)} + \frac{\beta \cdot V^3 (F_1(x) + C_1)}{2(V^2 \rho(x) - T)^2}. \quad (3.99)$$

Уравнение (3.99) принимает различные формы в зависимости от вида f .

По предложенному алгоритму производится расчет параметров процесса обезвоживания и градиентов сдвига в потоках волокнистых суспензий по специально разработанной программе.

Исходные данные для численного моделирования представлены в табл. 2-3.

Численное исследование проводилось для начальной зоны обезвоживания. С целью определения наиболее значимых параметров исследовались две основные группы: физико-химические и конструктивные. Группа физико-химических параметров: вид волокна; вид полимерных добавок; концентрация массы в напорном ящике; степень разработанности (удельная поверхность волокон - м²/г).

Группа конструктивных параметров: конструктивные параметры гидропланок; расстояние между обезвоживающими элементами; вид и натяжение сетки.

Таблица 2

Исходные данные для численного моделирования

Наименование параметра	Характеристика
Вид бумаги	Писчая № 2
Композиция по волокну	Целлюлоза сульфитная – 60 % Древесная масса – 40 %
Скорость машины, м/мин	450
Концентрация в напорном ящике, %	0,7
Концентрация осевшего слоя волокон, %	4,0
Масса 1 м ² бумаги, г	65
Вид сетки	Синтетическая № 26

Таблица 3

Варьируемые параметры при моделировании

Наименование параметра	min	max
Степень разработанности поверхности, м ² /г	20	80
Дозировка полимера, %:		
– ПАА	0,1	0,5
– ГПАА	–	–
– АА/ДМЭА	–	–
– крахмал окисленный	0,1	3
Сетки:		
– металлическая	№12	№28
– синтетическая	–	–
Расстояние между гидропланками, м	0,1	0,4
Угол наклона α , °	1	6
Длина наклонной поверхности гидропланки, м	0,035	0,080

Схема расчетного участка при моделировании приведена на рис.48.

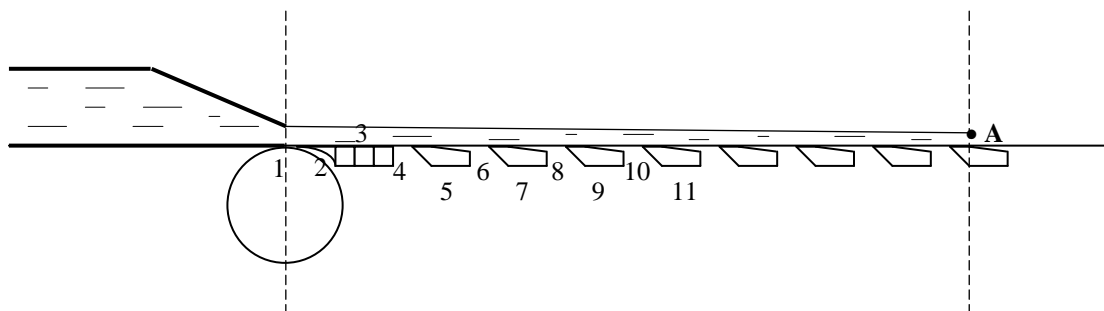
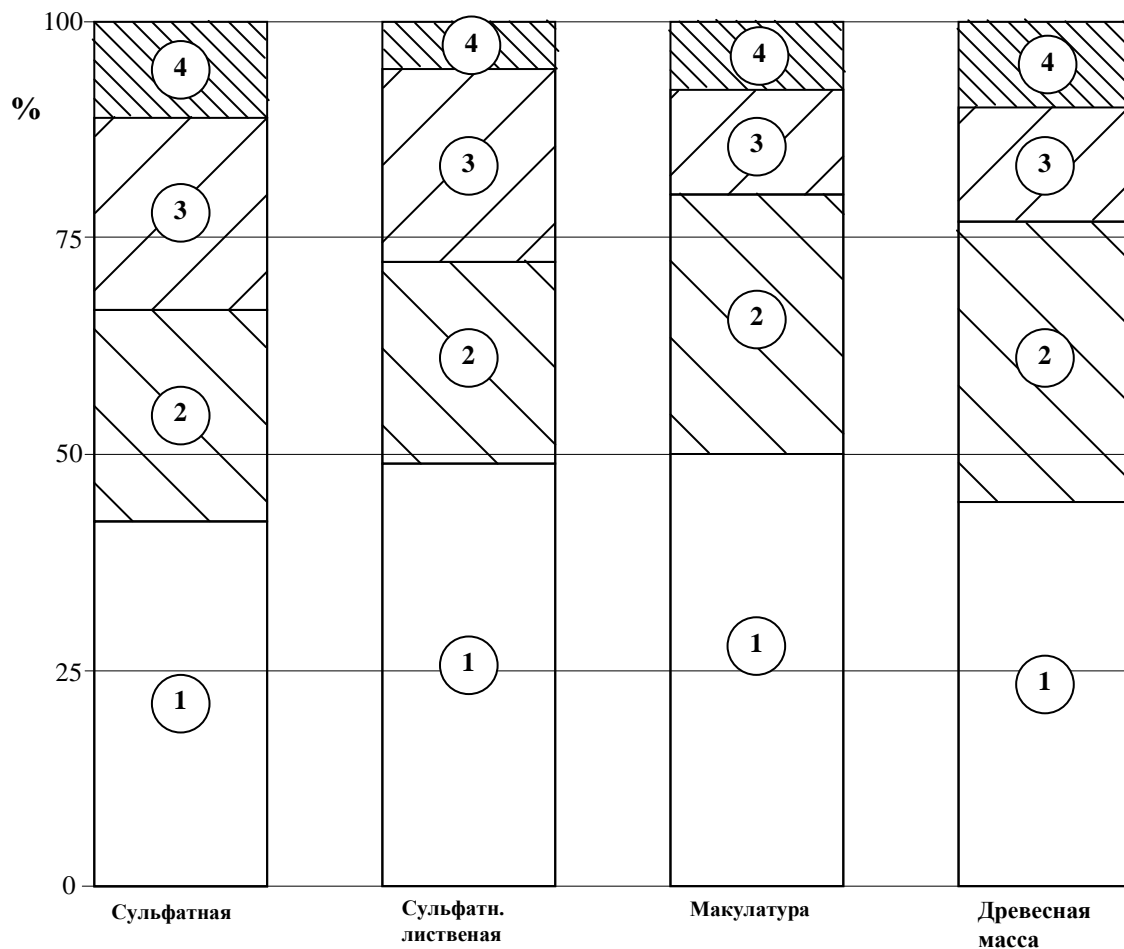


Рис.48. Схема расчетного участка: 1-11- участки формирования и обезвоживания; А – точка сравнения

В результате обработки данных программного расчета получена диаграмма (рис.49), позволяющая оценить степень влияния исследуемых параметров на процесс обезвоживания и формирования бумажной массы.

Установлено, что влияние физико-химических факторов на обезвоживание и формирование бумажного полотна больше, чем влияние гидродинамических факторов. Анализ результатов исследования показывает, что наиболее эффективно (из конструктивных параметров) на процесс обезвоживания влияет угол наклона рабочей плоскости гидропланки.

Моделирование процессов обезвоживания и формирования бумажного полотна позволяет оптимизировать компоновку существующих сеточных частей бумагоделательных машин и разрабатывать научно обоснованные рекомендации при создании нового бумагоделательного оборудования.




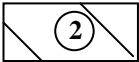
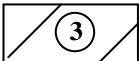

-  **Эффект степени разработанности поверхности**
-  **Эффект полимерных добавок**
-  **Эффект от изменения конструктивных параметров обезвоживающих элементов**
-  **Эффект от вида сетки и ее натяжения**

Рис.49. Влияние варьируемых параметров на процесс формования и обезвоживания

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в учебном пособии материалы направлены на решение задачи производства высококачественного бумажного полотна с высокой степенью однородности внутренней структуры и минимальными колебаниями массы 1 м^2 . В учебном пособии показано, что обезвоживающие элементы формирующих устройств наряду с функцией эффективного обезвоживания бумажной массы призваны поддерживать в ней определенные пульсации давления для предотвращения возможности повторной флокуляции волокон и обеспечения их равномерного распределения в структуре полотна бумаги. Рассмотрены механизмы диспергирования бумажной массы в формирующих устройствах. Рассмотрены: основы теории расчета диспергирующего воздействия обезвоживающих элементов формирующих устройств; аналитическая модель диспергирования бумажной массы на сеточном столе, отражающая влияние конструктивного исполнения обезвоживающих элементов, вида используемой бумажной массы и скорости БДМ на качественные показатели бумаги; аналитическая модель динамических колебаний сеток формирующих устройств и их воздействия на структуру обезвоживаемой бумажной массы; аналитическая модель диспергирования бумажной массы под действием виброактивации в начальной зоне формования, отражающая влияние параметров виброактивации на качество бумаги. Показано влияние обезвоживающих элементов на интенсивность турбулентности и структуру бумажной массы. Проведена оценка влияния пульсационных характеристик потока бумажной массы в массонапускных и формирующих устройствах БДМ на качество формования бумажного полотна. Показано влияние виброактивации в зоне формования на спектр пульсации давления бумажной массы и качество вырабатываемой бумаги. Рассмотрены конструкции наиболее эффективных виброактиваторов формирующих устройств. Предложена методика моделирования процессов обезвоживания и формования бумажного полотна, учитывающая реологические характеристики бумажной массы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кугушев И.Д. Теория процессов отлива и формования бумажной массы. – М.: Лесная промышленность, 1967. – 262 с.
2. Александров А.В. Основы теории структурообразования бумажной массы в процессе напуска на сеточную часть БДМ: дис. ... д-ра техн. наук. – Л., 1988. – 398 с.
3. Терентьев О.А. Гидродинамика волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве. – М.: Лесная промышленность, 1980. – 248 с.
4. Слуцкий А.Е., Кугушев И.Е., Терентьев О.А. и др. О взаимодействии сетки и обезвоживающих элементов на сеточной части бумагоделательной машины // Химия и технология бумаги.: межвуз. сб. науч.тр./ ЛТИ ЦБП. Л., 1982. Вып. 10. С. 16-20.
5. Meineke A. Apparative Losungen der Blattbildung// Wochenblatt fur Papierfabrication, 1978. №3. S. 96-101.
6. Барановский В.П. Исследование процессов формования и обезвоживания бумажной массы на вакуум-формирующих устройствах: дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1972.- 157 с.
7. Шухман Ф. Г. Бумагоделательные машины. – М.: Гослесбумиздат, 1958.- 320 с.
8. Галицейский Б. М., Рыжов Ю., Якуш Е.В, Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках. – М.: Машиностроение, 1977. С. 7-166.
9. Хинце И.О. Турбулентность. Ее механизм и теория. – М.: Наука, 1963. – 630 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ.....	3
1.	ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ДИСПЕРГИРОВАНИЯ БУМАЖНЫХ МАСС НА СЕТОЧНОМ СТОЛЕ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ.....	4
1.1.	Взаимодействие обезвоживающих элементов с потокм подсеточной воды.....	4
1.2.	Исследование процесса возникновения вертикальных смещений формующей сетки под воздействием конструктивных элементов сеточного стола.....	9
1.3.	Анализ условий диспергирования бумажной массы на сеточном столе под действием обезвоживающих элементов.....	20
1.3.1	Аналитическое исследование установившихся вертикальных смещений сетки с размещенным на ней слоем переменной массы.....	20
1.3.2	Численное исследование скоростей сдвига в слое бумажной массы, прилежащем к сетке.....	25
1.3.3	Аналитическое исследование вертикальных колебаний сетки под действием виброактиватора....	38
2.	ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ОТЛИВА И ФОРМОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ ПОТОКА И КАЧЕСТВО ВЫРАБАТЫВАЕМОЙ БУМАГИ	46
2.1.	Формование бумаги на сеточном столе бумагоделательной машины.....	46
2.2.	Влияние конструктивных элементов формующего устройства на интенсивность турбулентности и структуру потока бумажной массы.....	57
2.3.	Влияние виброактивации в зоне формования на спектр пульсации давления в потоке бумажной массы и качество бумаги.....	73
3.	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУМАЖНЫХ МАСС В ПРИКЛАДНЫХ ЦЕЛЯХ.....	87

3.1.	Расчет параметров формующих устройств с использованием реологических характеристик бумажных масс.....	87
3.2.	Управление процессами структурообразования в начальной зоне формования бумагоделательной машины.....	95
3.3.	Моделирование процессов формования и обезвоживания бумажного полотна.....	109
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	130
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	131

Учебное издание

Александр Васильевич Александров

Татьяна Николаевна Александрова

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

**Часть II. Гидродинамика процессов формования
бумаги**

Учебное пособие

Редактор и корректор Т.А. Смирнова

Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2015 г., поз.63

Подп. к печати

Формат 60x84/16. Бумага тип.№1

Печать офсетная. Печ. л. 8,5

Уч.-изд.л. 8,5 Тираж 100 экз. Изд № 63

Цена «С». Заказ

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

