

**Г. З. Шульман
А. В. Тверитина**

**ТЕОРИЯ И КОНСТРУКЦИЯ
БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИН**

Часть I

Текст лекций

**Санкт-Петербург
2023**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»**
Высшая школа технологии и энергетики
Кафедра машин автоматизированных систем

ТЕОРИЯ И КОНСТРУКЦИЯ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИН

Часть I

Текст лекций для студентов всех форм обучения
по направлению подготовки
15.03.02 — Технологические машины и оборудование

Составители:
Г. З. Шульман
А. В. Тверитина

Санкт-Петербург
2023

Утверждено
на заседании кафедры МАС
25.01.2023 г., протокол № 5

Рецензенты:
Б. Е. Борилкевич, А. Н. Евдокимов

Текст лекций, состоящий из в двух частей, соответствует программам и учебным планам дисциплины «Теория и конструкция бумагоделательных машин» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование». Текст лекций охватывает весь объём материалов по дисциплине. Издание предназначено для самостоятельной работы студентов.

Текст лекций предназначен для бакалавров очной и заочной форм обучения.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве
текстов лекций

Редактор и корректор А. А. Чернышева
Техн. редактор Д. А. Романова

Темплан 2022 г., поз. 5000/22

Подписано к печати 20.04.2023.	Формат 60x84/16.	Бумага тип № 1.
Печать офсетная.	Печ.л. 5,3.	Уч.-изд. л. 5,3.
Тираж 30 экз. (1 завод)	Изд. № 5000/22.	Цена «С». Заказ №

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. СВЕДЕНИЯ ПО ИСТОРИИ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИН	4
2. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ЧАСТИ БДМ И КДМ	4
2.1. Определение основных параметров работы машины.....	7
3. МАССОНАПУСКНЫЕ УСТРОЙСТВА.....	10
3.1. Классификация напускных устройств.....	10
3.2. Краткое описание конструкции и работы напорного ящика открытого типа	11
3.3. Напорные ящики закрытого типа с перфорированными валами. Краткое описание конструкции и работы.....	14
3.4. Напорные ящики турбулентного типа	17
3.5. Конструкция напорных ящиков турбулентного типа	25
3.6. Определение основных размеров конструкции напорных ящиков	30
3.7. Определение необходимого давления волокнистой суспензии на входе в коллектор напорного ящика	37
4. СЕТОЧНАЯ ЧАСТЬ	40
4.1. Сетки бумагоделательных и картоноделательных машин	50
4.2. Гауч-вал	53
4.3. Шаберы валов бумагоделательных машин	55
4.4. Краткая теория обезвоживания в сеточной части.....	56
5. ПРЕССОВАЯ ЧАСТЬ.....	65
5.1. Классификация прессов бумаго- и картоноделательных машин	73
5.2. Шабера прессовой части.....	74
5.3. Обезвоживание бумаги в прессовой части	75
5.4. Основные факторы, определяющие эффективность прессования.....	77
5.5. Определение сухости бумажного, картонного полотна после каждой зоны прессования	78
5.6. Прессовые сукна.....	79
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	83

1. СВЕДЕНИЯ ПО ИСТОРИИ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИН

Впервые производство бумаги из очёсов льна, пакли, луба молодого бамбука, тряпья, соломы, травы появилось в 105 г. н. э. в Китае.

Производство заключалось в измельчении сырья в каменной ступе и размешивании в большом количестве воды. Из чана массу зачерпывали тонким шёлковым ситом, натянутым на деревянную рамку. После стекания воды на сите образовывался лист бумаги, который перекладывали на сукно, затем отжимали на прессе и сушили на воздухе.

В 751 г. н. э. бумагу начали вырабатывать арабы. Первое бумажное предприятие было основано в 1550 г. на реке Усе, второе в 1665 г. на реке Пахре.

В 1799 г. во Франции корректор Парижской типографии Николай Луи Робер изобрёл машину для непрерывного отлива бумаги. Над деревянным бассейном помещалась бесконечная медная сетка шириной 640 мм и длиной 3000 мм, натянутая на два крайних валика. Из бассейна масса подавалась черпальным колесом с пластинками, которые захватывали её непрерывной струёй на сетку. Полотно отжималось между двумя валами, обтянутыми сукном и наматывалось на валик, расположенный в конце сетки. Затем бумажное полотно разрезалось на листы, которые прессовались и сушились. Машина приводилась во вращение вручную со скоростью 5 м/мин, производительность при этом составляла 500 кг в сутки.

В дальнейшем в совершенствовании машин вложили свой вклад механик Бриан Донкин в Англии в 1803 г., Фурдринье – именем, которого называют БДМ в Англии и США.

В 1816 г. в Петергофе была пущена первая русская бумагоделательная машина, построенная русскими мастерами на Петербургском литейном заводе под руководством Вестингаузена представителя фирмы Донкин.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ЧАСТИ БДМ И КДМ

Основным параметром классификации машин является обрезная ширина полотна картона или бумаги: 840; 1050; 1250; 1680; 2100; 2520; 4200; 6300; 6720; 8400; 10080; 10500. Она получается только на продольно-резательном станке.

Ширина сетки (мм)	Производ. (т/сутки)	Сорт	Масса (г/м ²)	Расчетная скорость (м/мин)	Пуск
5630	956	тестлайнер флютинг	125 - 250	1100	2004

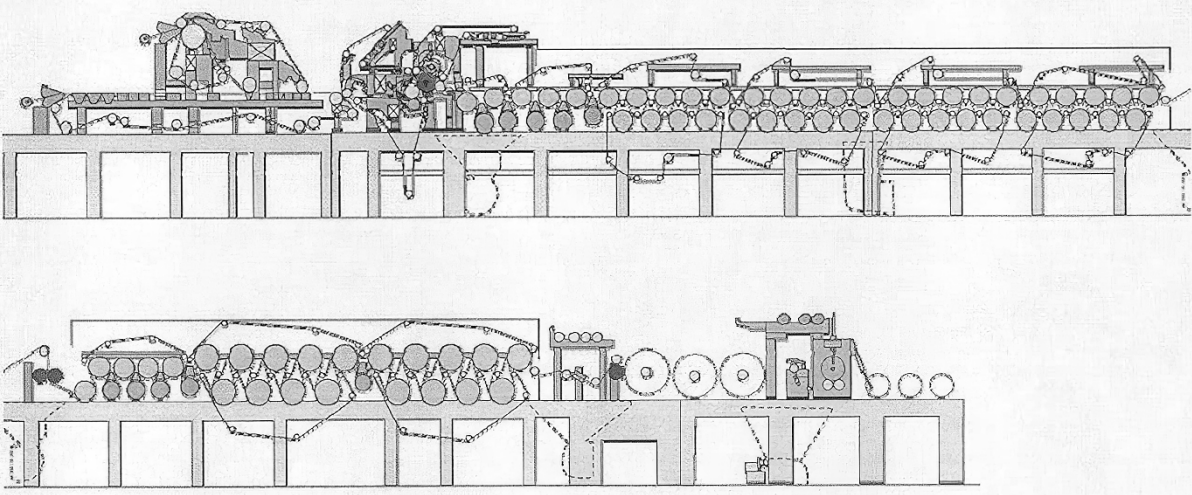


Рис. 1. Схема картоноделательной машины № 4 фабрики Hamburger в г. Питтен



Рис. 2. Самая большая бумагоделательная машина в мире на острове Хайнань, КНР

Машины разделяются по продукции: массовые и немассовые виды продукции, а также специальные виды.

Массовые: газетная, типографская, офсетная, все печатные виды бумаг.

Немассовые виды: конденсаторная, кабельная, электроизоляционная, сигаретная, папиросная, афишная, фильтровальная, чертёжная и т. д.

Специальная продукция: термостойкая и химически стойкая бумага, реставрационная, искусственная кожа, слюдянистая и т. д.

Four-wire forming section for linerboard grades



Рис. 3. Картоноделательная машина для выработки многослойного картона фирмы «Over-mecanik», Италия



Рис. 4. Машина для выработки санитарно-гигиенических бумаг

По типу машины разделяются на сеточные части: с плоскосеточными столами с одним или несколькими, с секциями двухсеточного формования. В работе используются машины со старыми конструкциями сеточных частей: круглосеточные и с вакуумформирующими устройствами. Для выработки специальных видов бумаг и картонов используются в машинах сеточные части с наклонным сеточным столом. В современных бумагоделательных и картоноделательных машинах часто используются сеточные части комбинированного типа, включающие плоский сеточный стол и верхние формирующие устройства.

Основные агрегаты и системы, входящие в состав БДМ и КДМ:

- напускные устройства;
- сеточная часть;
- прессовая часть;
- сушильная часть;
- каландр;
- накат;
- привод;

- а также вакуумная система, пароконденсатная система, система вентиляции, система подачи сжатого воздуха и подачи масла на механизмы перемещения, сетконатяжек, прессовых валов и валов, передающих полотно из сеточной части в прессовую.

Также машина оснащается системой подачи очищенного сжатого воздуха в приборы автоматики.

Машины оснащаются трубопроводами для подачи волокнистой суспензии в напускные устройства, отвода воды (суспензия очень низкой концентрации) из подсеточной ванны в РПО. Также имеются трубопроводы для подачи свежей воды на sprays высокого давления и осветленной воды на моющие sprays. Все трубопроводы оснащены насосами и запорно-регулирующей арматурой. Трубопроводы соединяющие агрегаты с вакуумной системой оснащены различными контролирующими приборами.

Все агрегаты машины оснащены мостками обслуживания.

2.1. Определение основных параметров работы машины

При разработке курсового проекта необходимо знать производительность машины «НЕТТО», т. е. на складе, и «БРУТТО», по которой производится расчёт. Предприятием для разработки машины, как правило, в техническом задании, указываются ассортимент вырабатываемой продукции с указанием массы 1 м² в граммах, годовая производительность машины, ориентировочная усадка полотна в сушильной части и некоторые другие параметры, которые будут рассмотрены ниже.

Основной характеристикой работы машины является часовая производительность машины, имеющая размерность кг/ч и всегда являющаяся «БРУТТО».

При заданной годовой производительности «НЕТТО» определяется часовая производительность машины:

$$Q_{\text{час}} = \frac{Q \cdot 1000}{t \cdot n \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}, \text{ кг/ч}, \quad (1)$$

где Q – годовая производительность, т/год;

t – количество часов работы машины в сутки – 24;

n – количество суток в году – 365;

k_1 – коэффициент, учитывающий потери товарной продукции на холостом ходу, в браке при обрывах, резке и отделке;

k_2 – коэффициент использования скорости машины;

k_3 – коэффициент рабочего числа работы машины в сутки.

Значения всех коэффициентов сведены в таблице 1.

Однако для определения часовой производительности машины имеется также формула, связывающая основные параметры машины и массу квадратного метра вырабатываемой продукции:

$$Q_{\text{час}} = 0,06 \cdot B \cdot V \cdot q, \text{ кг/ч}, \quad (2)$$

где B – ширина бумажного полотна на накате (необрезная), м;

V – скорость машины (определяется по скорости последнего сушильного цилиндра), м/мин;

q – масса 1 м² бумаги, картона или целлюлозы, г/м².

Таблица 1 – Коэффициенты расчета производительности

Коэффициент	Виды вырабатываемой продукции				
	бумага				картон
	газетная	типографская, офсетная, писчая	мешочная, оберточная	для гофрирования	
k_1	0,92	0,92	0,965	0,975	0,975
k_2	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
k_3	0,9	0,9	0,95	0,95	0,95

По этой формуле по заданной (как правило) ширине машины определяется скорость машины:

$$V = \frac{Q_{\text{час}}}{0,06 \cdot B \cdot q}, \text{ м/мин.} \quad (3)$$

Так как значение часовой производительности уже было определено, то, подставляя значение $Q_{\text{час}}$ из формулы (1), получим следующую формулу для скорости машины:

$$V = \frac{Q}{60 \cdot B \cdot q \cdot t \cdot n \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}, \text{ м/мин.} \quad (4)$$

При расчётах скорость по приводу, как правило, увеличивают на 25 ÷ 30 %, откуда:

$$V_{\text{пр}} = (1,25 \div 1,3) V. \quad (5)$$

При расчётах используется всегда скорость по приводу, но так как скорости агрегатов машины разные в соответствии с изменениями ширины полотна при обезвоживании, то и скорости по приводу также разные.

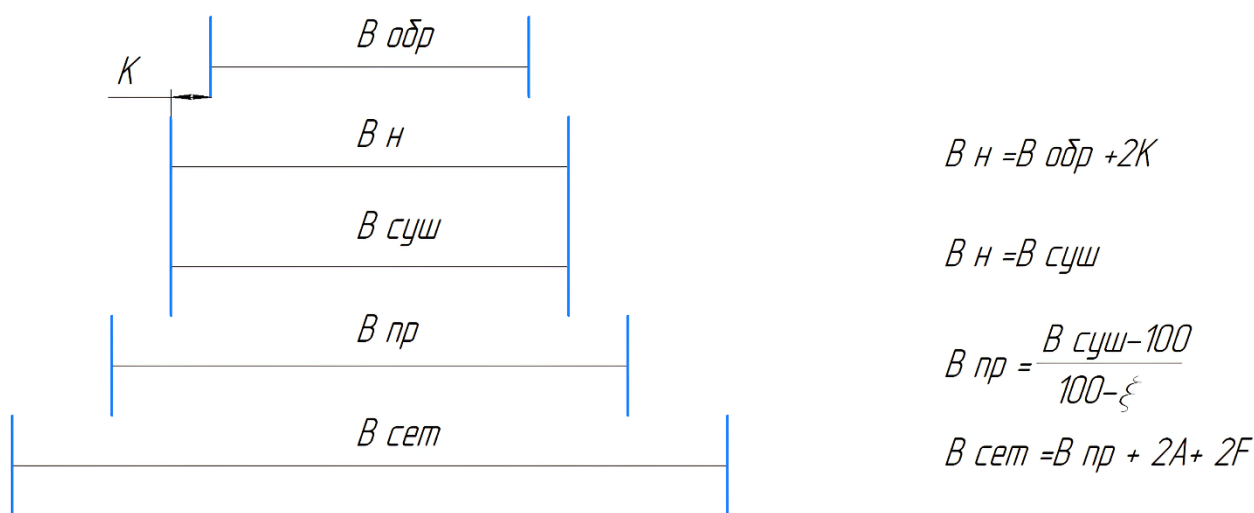


Рис. 5. Изменение ширины полотна на БДМ и КДМ,

где B – ширина полотна, м;

K – величина кромок, обрезаемых на продольно-резательном станке;

ξ – величина поперечной усадки бумажного или картонного полотна в сушильной части, %.

Величина поперечной усадки зависит от композиции волокнистой суспензии, % – 2,5 ÷ 10;

A – величина кромок, отсекаемых гидроножами перед гауч-валом, мм – 40 ÷ 120;

F – величина форматных линеек.

3. МАССОНАПУСКНЫЕ УСТРОЙСТВА

Существенное влияние на качество картонно-бумажного полотна в процессе работы бумагоделательных и картоноделательных машин (БДМ и КДМ) оказывают напускные устройства, обеспечивающие подачу волокнистой суспензии на сеточную часть.

Напускные устройства должны выполнять следующие функции:

- распределять поток при напуске на сетку машины с одинаковым расходом и скоростью по ширине отливаемого полотна;
- обеспечивать подвод суспензии к выпускной щели без выпадения волокон и образования струй;
- предотвращать возможность флокуляции и ориентации волокон в потоке, обеспечивая микротурбулентный режим движения волокнистой суспензии;
- исключать застойные зоны и вовлечение воздуха, крупные вихреобразования и поперечные токи в проточной части напорного ящика;
- выпускать на сетку струю волокнистой суспензии с определённой скоростью, сохраняя при этом микротурбулентный режим течения.

3.1. Классификация напускных устройств

Напускные устройства в зависимости от скорости машин в основном подразделяются на:

- устройства открытого типа;
- устройства закрытого типа;
- устройства турбулентного типа.

К напускным устройствам открытого типа можно отнести напорные ящики с перфорированными валами, работающие с сеточными частями тихоходных машин со скоростью до 180 м/мин. Ранее открытые напорные ящики использовались при скоростях до 250 м/мин, но из-за сильной флокуляции суспензии при низкой скорости потока в полости напорного ящика и как результат – получения бумажного полотна низкого качества, от таких ящиков в дальнейшем пришлось отказаться (напорный ящик машины Б-18).

Скорость вытекания потока зависит от высоты уровня суспензии в полости напорного ящика.

К напускным устройствам открытого типа можно также отнести напорные ящики, работающие в паре с наклонным сеточным столом, где прямо в полости напорного ящика начинается формование бумажного полотна. Такие ящики не оснащаются перфорированными валами и служат для выработки специальных бумаг при низкой концентрации (например, фильтровальная бумага, слюдяное полотно).

К напускным устройствам закрытого типа относятся напорные ящики с перфорированными валами, работающие на машинах со скоростью от 250 до 800 м/мин. В этих напорных ящиках, помимо давления свободного столба жидкости, имеется принудительное давление, создаваемое воздушной подушкой над слоем суспензии.

На современных БДМ и КДМ, работающих при скоростях от 300 м/мин, используются напорные ящики турбулентного типа (гидродинамические). В зависимости от ассортимента вырабатываемой продукции гидродинамические напорные ящики могут работать на машинах при скоростях свыше 3000 м/мин (санитарно-гигиеническая продукция). Работа напорных ящиков турбулентного типа основана на движении суспензии перед выпуском на сетку через ряд отверстий, представляющих собой ступенчатые диффузоры и узкие плоские каналы. Трение суспензии о стенки каналов, перепады скоростей и давлений вызывают появление интенсивной маломасштабной турбулентности, препятствующей появлению флоккул в потоке (хлопьеобразованию).

3.2. Краткое описание конструкции и работы напорного ящика открытого типа

Напорный ящик выполнен из отдельных металлоконструкций, герметично связанных между собой. В качестве уплотнительного материала для неподвижных соединений применен шнур из материала ФУМ (фторопластовый уплотнительный материал), химически стойкий в кислотно-щелочной среде. Стенки основной полости ящика, соприкасающиеся с волокнистой суспензией, облицованы полированными листами из нержавеющей стали. Отдельные узлы или отдельные элементы конструкции могут быть полностью изготовлены из нержавеющей стали.

Суспензия из трубопровода подаётся во входной патрубок коллектора напорного ящика и далее через отверстия потокораспределителя поступает в основную полость. В основной полости напорного ящика волокнистая суспензия перемешивается перфорированными валами, дросселируется регулируемым щитом и через выпускную щель подаётся на сеточную часть бумагоделательной машины.

Коллектор служит для равномерного поворота и распределения волокнистой суспензии, выравнивания давления по ширине напорного ящика. Камера коллектора имеет прямоугольное сечение, переменное по длине (профильное). Часть суспензии (до 10 % от поступающего расхода) через выходное отверстие в конце коллектора идет на рециркуляцию, что обеспечивает выравнивание статического давления суспензии в крайних сечениях коллектора. Для визуального наблюдения за поведением суспензии при регулировке служит трубопровод со стеклянной вставкой, подсоединённый своими концами к коллектору в его крайних сечениях. При равном давлении в камере коллектора суспензия в трубопроводе неподвижна, при изменении давления суспензия

движется от зоны большего давления к зоне меньшего. Для выравнивания давления следует приоткрыть или прикрыть задвижку (шаровой клапан), установленную на трубопроводе рециркуляции.

Потокораспределитель может представлять собой как перфорированную плиту с отверстиями, так и пакеты трубок. Отверстия в потокораспределителе могут быть по конфигурации двух-, трёхступенчатыми диффузорами. В первой ступени диффузора после поворота синусоидальные колебания потока суспензии стабилизируются. От трения о стенки отверстий и переходов в последующие ступени суспензия турбулизуется, что препятствует флокуляции волокон.

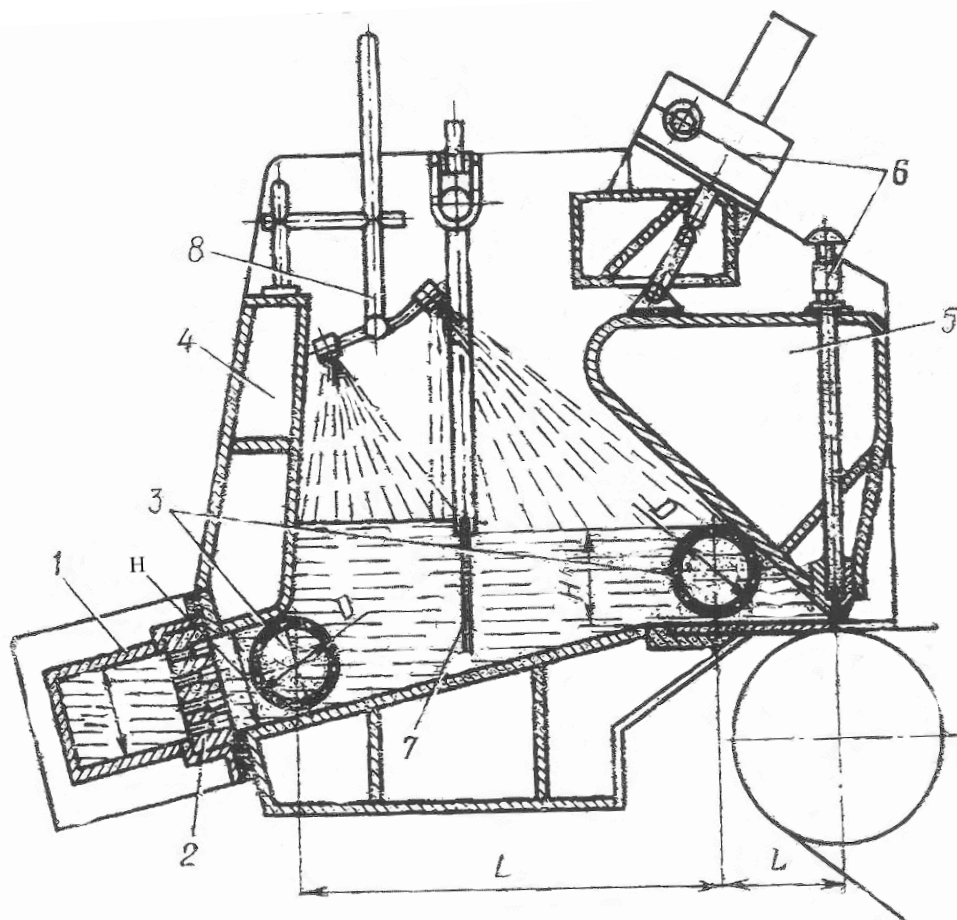


Рис. 6. Напорный ящик открытого типа для машин со скоростью до 180 м/мин (ЦНИИБУММАШ):

- 1 – коллектор; 2 – потокораспределитель – перфорированная плита;
- 3 – перфорированные валы; 4 – корпус ящика; 5 – передняя стенка;
- 6 – механизмы перемещения; 7 – щит регулируемый; 8 – спрыск-пеногаситель

Днище, боковые и задняя стенки создают корпус напорного ящика, во внутреннюю полость которого после потокораспределителя поступает волокнистая суспензия. В полости открытого напорного ящика устанавливаются перфорированные валы, щит регулируемый, спрыски-пеногасители, к боковым

стенкам напорного ящика крепится поперечная балка, к которой крепятся механизмы перемещения передней стенки, а в подвижных шарнирах, связанных с механизмами перемещения, на боковых стенках напорного ящика устанавливается передняя стенка.

Два перфорированных вала расположены в полости напорного ящика. Валы на входе в полость напорного ящика и на выходе выравнивают скорость движения суспензии по всему сечению потока и турбулизируют, предотвращая хлопьеобразование. В качестве опорных подшипников использованы подшипники качения. Для предотвращения попадания суспензии в уплотнения опор валов и в зазоры между стенками ящика и торцами валов к опорам подаётся свежая вода. Расход воды регулируется ротаметрами.

Передняя стенка напорного ящика является подвижной. Перемещая стенку, можно регулировать высоту выпускной щели и расположение верхней губы относительно нижней. При перемещении передней стенки в рабочих пределах зазор между корпусом и выходным перфорированным валом составит $5...+1$ или $5...-1$ мм. Смещение кромки верхней губы выпускной щели относительно нижней кромки нижней губы внутрь ящика – 30 мм.

Верхняя губа выполнена в виде пластины, прижатой к поверхности подвижной стенки упругой резиновой трубкой, в которую подается воздух под давлением 0,2–0,3 МПа.

Регулировка профиля выпускной щели производится механизмами точной регулировки, установленными на подвижной стенке с интервалом 120–130 мм по ширине ящика. Механизмы снабжены индикаторами, показывающими отклонение верхней губы от номинального положения. Диапазон регулирования $+3...-3$ мм, точность регулирования не ниже 0,03 мм. При регулировании во избежание выхода из строя верхней губы разница в показаниях соседних индикаторов не должна превышать 0,15 мм. Регулирование производится маховиками. Точность перемещения передней стенки и правильная настройка механизмов точной регулировки влияет на разброс массы 1 м^2 полотна бумаги или картона по ширине сетки.

Механизмы поворота и подъёма служат для перемещения передней стенки. Механизм поворота представляет собой конструкцию, состоящую из качающегося червячно-винтового редуктора, который шарнирно соединён с передней стенкой. Механизм подъёма представляет собой конструкцию, состоящую из двух спаренных червячно-винтовых редукторов, неподвижно закреплённых на боковых стенках напорного ящика, и с помощью специальных устройств, также шарнирно соединённых с передней стенкой. Управление механизмами (на открытых ящиках) – ручное, с помощью маховиков.

Водопровод служит для подачи свежей воды к уплотнениям перфорированных валов. Расход воды регулируется ротаметрами, установленными на боковых стенках напорного ящика. Одновременно подаётся вода к спрыску – пеногасителю.

Регулируемый щит расположен в полости напорного ящика и служит для изменения скорости движения суспензии и изменения степени турбулентности потока. Щит с помощью винтов может подниматься или опускаться. Щит также

можно передвигать по ходу потока волокнистой суспензии. Рекомендуемый зазор между линейкой и днищем – от 10 до 100 мм.

Привод предназначен для вращения перфорированных валов. Вращение осуществляется от мотор-редуктора через цепную передачу. Для изменения частоты вращения предусмотрены сменные звёздочки, устанавливаемые на перфорированных валах:

звёздочки $Z=28$28 об / мин;

звёздочки $Z=18$43 об / мин.

Все напорные ящики оснащаются спрысками грудного вала для предотвращения попадания воздуха между нижней стороной днища и сеткой, указателями перемещения передней стенки и окнами для наблюдения уровня суспензии в полости ящика. На одной из боковых стенок напорного ящика устанавливается также трубопровод от датчика уровня массы в напорном ящике.

3.3. Напорные ящики закрытого типа с перфорированными валами. Краткое описание конструкции и работы

Напорные ящики закрытого типа, несмотря на некоторую схожесть, в зависимости от типоразмера отличаются друг от друга. Напорные ящики начальных номеров типоразмеров (ЯЗ-01–ЯЗ-04 по градации ЦНИИБУММАШа) не имеют дополнительного перелива суспензии из внутренней полости напорного ящика из-за сравнительно небольшого расхода, а, следовательно, и низкого уровня суспензии в полости напорного ящика, не влекущего за собой интенсивное пенообразование. В напорных ящиках такого типа с пенообразованием справляются спрыски – пеногасители, установленные в его полости. Уровень суспензии в таких ящиках не должен превышать 260 мм и находиться ниже поверхности вала на 15–20 мм, чтобы большая часть потока проходила сквозь отверстия перфорации и при вращении вала суспензия перемешивалась и турбулизировалась.

Напорные ящики больших типоразмеров (ЯЗ-05–ЯЗ-08), где уровень суспензии в ящике ЯЗ-05 – 385 мм, а в ящике ЯЗ-08 достигает 655 мм, а диаметр перфорированного вала – 630 мм, возникает такое интенсивное пенообразование, что одних спрысков-пеногасителей становится недостаточно, и для слива пены в передней стенке напорного ящика предусмотрена полость, из которой через отверстия в боковых стенках пена удаляется. Давление воздушной подушки зависит от скорости сетки и уровня суспензии в полости напорного ящика. Для практических расчётов можно считать, что скорость напуска равна скорости сетки. Система автоматического регулирования может менять скорость напуска относительно скорости сетки в ту или другую стороны. Уровень суспензии в полости напорных ящиков поддерживается постоянным.

Коллектор крепится либо к пакету труб (в современных конструкциях), либо совместно с перфорированной плитой к корпусу напорного ящика.

Коллектор отдельно, либо с пакетом труб (потокораспределителем) может откидываться для просмотра и промывки. В ящиках с перфолентами коллектор откидывается вместе с перфоплитой. Внутренние отверстия перфоплит и отверстия в трубах представляют собою ступенчатые диффузоры.

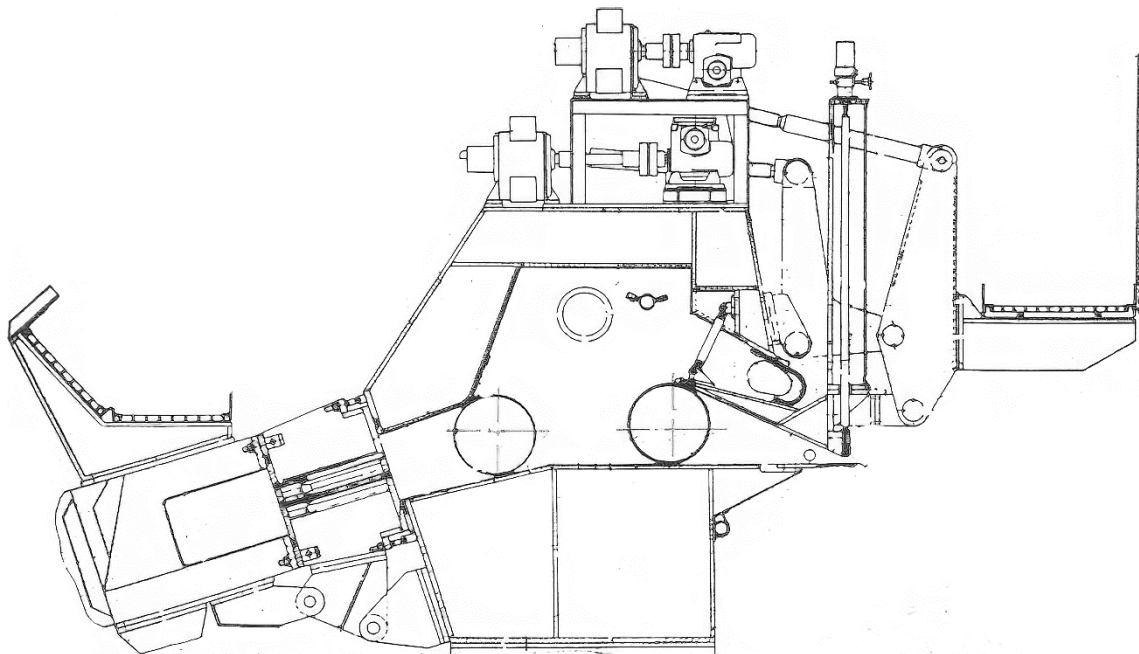


Рис. 7. Напорный ящик закрытого типа с перфорированными валами последнего поколения для машин со скоростью до 900 м/мин (для машин К-33, К-34 ЦНИИБУММАШ)

По концам коллектора сделаны отводы, к которым присоединяется трубка, выполненная частично прозрачной. При правильном режиме работы (давление по концам коллектора должно быть одинаковым) суспензия в трубке должна быть неподвижна. При движении массы в трубке вращением шиберной задвижки следует изменять расход отводимой массы на рециркуляцию (0–10 % – от общих расходов) до тех пор, пока не прекратится движение.

Днище, боковые стенки, задняя стенка, крыша составляют корпус напорного ящика. Во внутренней полости напорного ящика установлены два перфорированных вала, спрыски-пенегасители, крепления передней стенки с фартуком. В боковых стенках корпуса имеются отверстия для перелива массы, связанные с устройствами самовыравнивания для поддержания постоянного уровня в напорном ящике, отверстия для наблюдения положения уровня массы и подсветки прожектором. Наряду с устройством самовыравнивания уровень суспензии в напорном ящике поддерживается с помощью системы автоматического регулирования через датчик давления, а давление воздушной подушки поддерживается двумя клапанами – нормально открытым и нормально закрытым, также связанными с системой автоматики. Внутренняя полость напорного ящика облицовывается полированными листами из нержавеющей

стали марки 08Х22Н6Т или, что более часто в последнее время, из стали 12Х18Н9Т толщиной до 2 мм.

Выпускная щель напорного ящика регулируется перемещением передней стенки с помощью механизмов. Корпус передней стенки выполняется из углеродистой стали и облицовывается полированными листами нержавеющей стали. На передней стенке закреплены верхняя губа и механизмы точной регулировки. Верхняя часть передней стенки выполнена в виде камеры, служащей для перелива поверхностного слоя суспензии, содержащего воздух и разбавленного спрысковой водой. Открытие выпускной щели напорного ящика регулируется по высоте от 5 до 100 мм, а горизонтальное перемещение верхней губы относительно кромки нижней губы внутрь ящика – 60 мм. Передняя подвижная стенка внутри напорного ящика закреплена шарнирно с помощью трёх стяжек, а снаружи связана двумя парами рычагов, которые обеспечивают раздельное перемещение стенки в вертикальном или горизонтальном направлениях. Каждая пара рычагов через качающиеся червячно-винтовые редукторы и стационарные червячные редукторы связана с пневмомоторами.

Механизм точной регулировки верхней губы обеспечивает регулирование в пределах ± 3 мм. Разница в показаниях соседних указателей при регулировании не должна превышать 0,5 мм. Допускается свободный ход тяг за счёт зазоров в механизмах точной регулировки не более 0,03 мм.

Перфорированные валы $\varnothing 630$ мм установлены на подшипниках качения. Опоры валов эксцентрично закреплены в гнёздах боковых стенок, что позволяет поворачивать опоры в гнёздах и регулировать зазоры между поверхностью валов и дном напорного ящика. Для предотвращения попадания суспензии в уплотнения опор валов и в зазоры между стенками ящика и торцами валов к опорам подаётся свежая вода. Расход воды регулируется ротаметрами.

Привод валов осуществляется от индивидуальных электродвигателей через редукторы. Частота вращения плавно регулируется от 6 до 30 об/мин. Тихоходные валы редукторов соединены с приводными концами перфорированных валов карданными валами.

В современных конструкциях закрытых напорных ящиков (начиная с пятого типоразмера) с перфорированными валами предусмотрено перемещение передней стенки в рабочих диапазонах таким образом, чтобы зазор между поверхностью вала и поверхностью передней стенки не превышал допуск зазора между поверхностью вала и плоскостью дна (5 \pm 0,5 мм), что даёт возможность получать более равномерный поток суспензии с хорошей дисперсией волокон за счёт полного его прохождения через перфорированный вал (рис. 8).

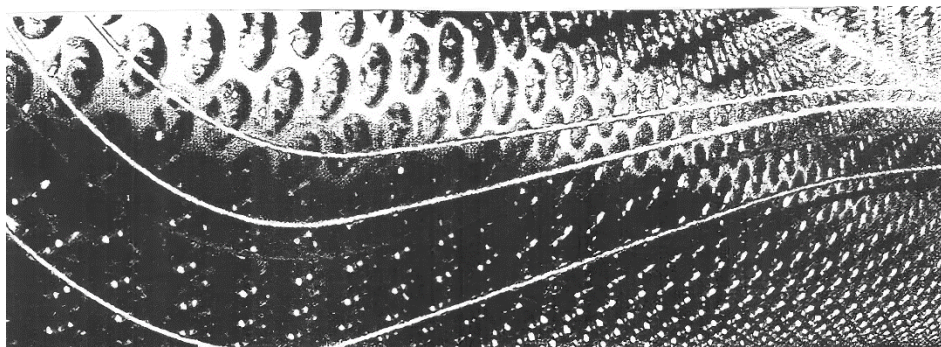


Рис. 8. Перфорированный вал фирмы «Allimand»

К преимуществам закрытых напорных ящиков можно отнести их меньшую чувствительность к изменению расходов при значительных изменениях ассортимента вырабатываемой продукции, более дешёвое изготовление по сравнению с турбулентными напорными ящиками, и при скоростях до 600 м/мин их можно успешно продолжать использовать.

3.4. Напорные ящики турбулентного типа

Напорные ящики турбулентного типа могут использоваться для напуска суспензии на плоские сеточные столы и подачи суспензии в клин между сетками при двухсеточном формовании. Турбулентные напорные ящики могут использоваться для напуска покровного слоя суспензии на плоский сеточный стол.

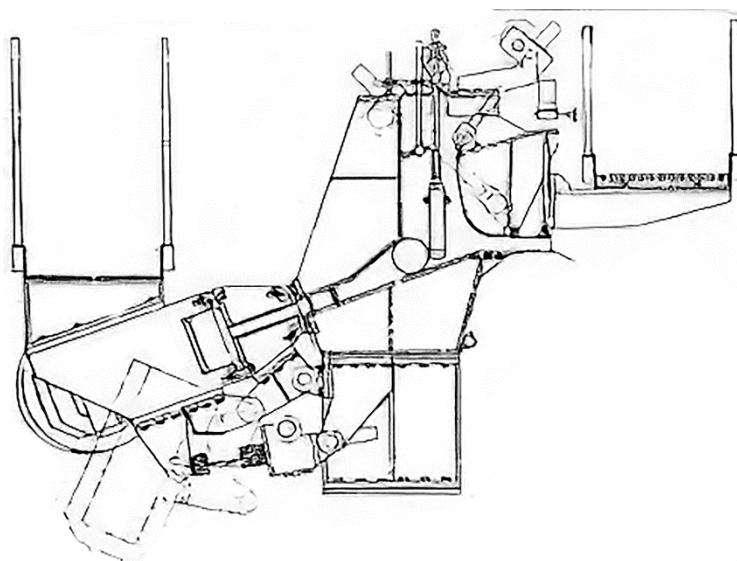


Рис. 9. Напорный ящик турбулентно-открытого типа для выработки продукции из длиноволокнистой суспензии массой до 600 г/м², с максимальной скоростью до 150 м/мин (ЦНИИБУММАШ)

Напорные ящики турбулентного типа могут оснащаться ёмкостями с воздушной подушкой (используется как гаситель пульсации) и переливом, соединёнными со смесительной камерой между потокораспределителем и турбулизирующим блоком, или с выносным гасителем пульсаций с ёмкостью для воздушной подушки (боковой подвод суспензии), соединённой трубопроводом с камерой коллектора.

Для регулирования концентрации суспензии по ширине напуска в современных ящиках используется дополнительный коллектор с осветлённой водой, соединённый трубками с дозирующими клапанами с отверстиями потокораспределителя. С помощью сканера, установленного между каландром и накатом, систем автоматического управления клапанами, осветлённая вода подаётся в разные зоны по ширине потока для выравнивания концентрации суспензии и тем самым равномерного распределения массы одного квадратного метра по ширине машины (рис. 10).

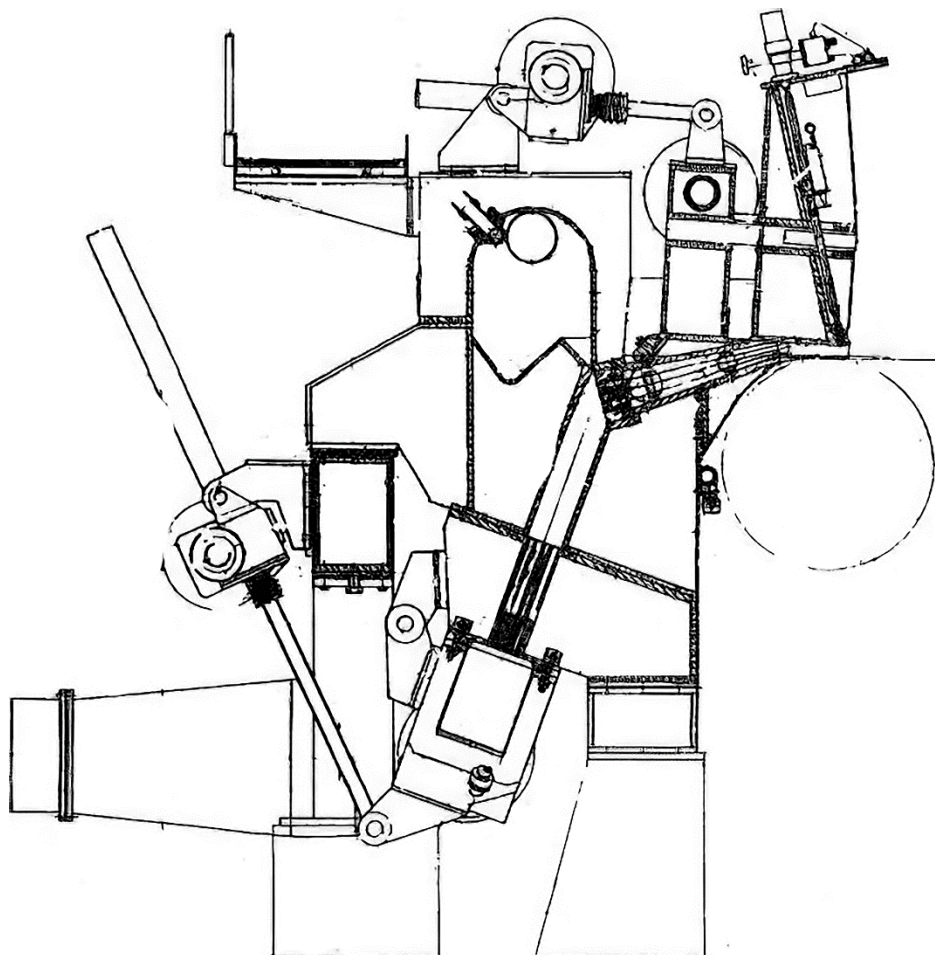


Рис. 10. Напорный ящик турбулентного типа для машин со скоростью до 800 м/мин (ЦНИИБУММАШ), вырабатывающих бумагу разных видов с большим содержанием наполнителя

Сравнительно новым направлением в разработке напускных устройств турбулентного типа является напорный ящик (рис. 11), где потокораспределитель, гаситель пульсации и система разбавления суспензии

были смонтированы в одном устройстве, стоящем отдельно от корпуса напорного ящика («кастрюля»). «Кастрюля» представляет собой ёмкость (рис. 12), нижняя часть которой – диффузор, а верхняя – цилиндр, внизу установлена перфорированная двухступенчатая плита. Постоянный уровень суспензии в ёмкости поддерживается автоматикой.



Рис. 11. Напорный ящик с выносным гасителем пульсаций («кастрюля») с встроенным в него потокораспределителем, наличием воздушной подушки, с системой разбавления и подачи суспензии в корпус напускного устройства.
Фирма «Allimand», Франция

Для гашения пульсации в верхней части ёмкости создаётся воздушная подушка, объём которой зависит от степени гашения амплитуд пульсации давления при определённых частотах (как правило, стараются снизить амплитуды пульсации давления при частотах от 2 до 8 Гц). Ёмкость также снабжена переливом. Отвод суспензии из ёмкости осуществляется трубками, расположенными на цилиндрической поверхности по периметру. Необходимое разбавление происходит при подаче осветлённой воды от кольцевого трубного коллектора через дозирующие клапаны в отводные трубки. От трубок шлангами суспензия подаётся в отдельные камеры, расположенные в корпусе напорного ящика, и далее – через турбулизирующий блок в полость напорного ящика (если ящик с перфорированными валами) или выпускной канал турбулентного напорного ящика.

Неоспоримым преимуществом напускных устройств турбулентного типа является отсутствие вращающихся валов, малый объём суспензии во внутренней полости, сравнительная компактность, возможность получить поток суспензии с высокой степенью диспергации волокон и достаточной изотропностью потока. При использовании таких напорных ящиков с современной системой регулирования, колебание массы 1 м^2 по ширине машины не превысит $\pm 1 \div \pm 2 \%$.

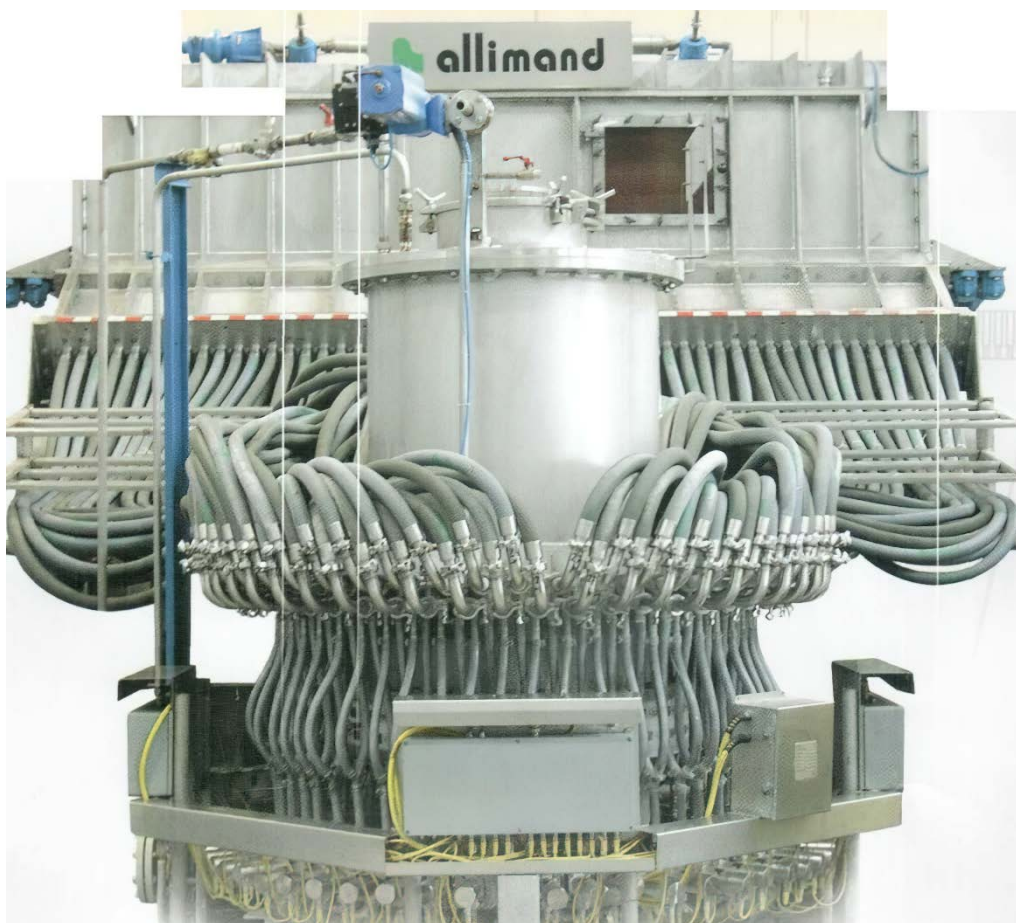


Рис. 12. Гаситель пульсации («кастрюля») фирмы «Allimand», Франция

К недостаткам турбулентных напорных ящиков можно отнести высокую чувствительность к изменению расходов, сложную технологию изготовления, высокую металлоёмкость и возможность использования только при скоростях свыше 400 м/мин.

На современных бумаго-картоноделательных машинах нашли применение напорные ящики, позволяющие осуществить напуск суспензии для выработки двухслойной или трёхслойной продукции. При этом композиции слоёв могут значительно отличаться друг от друга. Наружным слоям могут придаваться определённые свойства, связанные с прочностью материала, с его декоративной отделкой, на внутренние же слои могут использоваться более дешёвые материалы, в целом не снижающие качество вырабатываемой продукции. Заметное применение многослойная продукция нашла при выработке различных санитарно-гигиенических бумаг, многослойных тарных картонов, плоских слоёв гофрированного картона, упаковочных видов бумаги. Многоканальные напорные ящики турбулентного типа установлены на машинах для выработки многослойной продукции на современных машинах, как правило, в паре с сеточной частью двухсеточного формования.

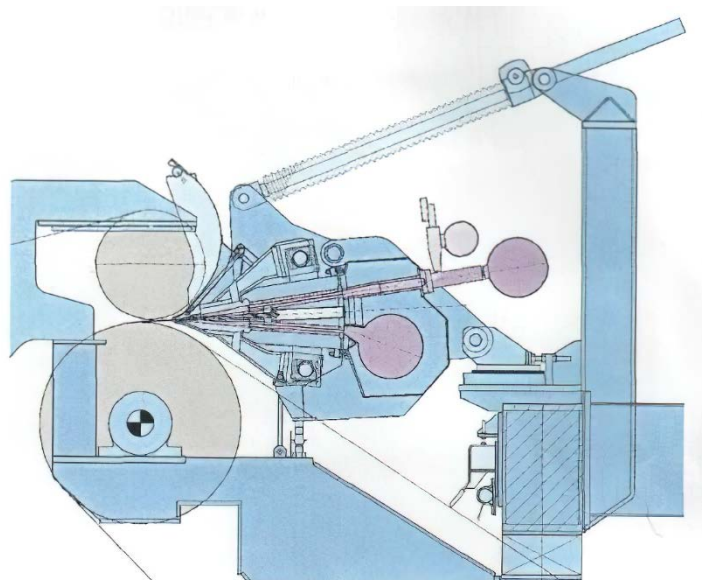


Рис. 13. Напорный ящик турбулентного типа, двухканальный с жёсткой разделительной пластиной; с системой отдельного регулирования напуска из каждого канала; с двумя коллекторами, верхний из которых оснащён собственным устройством для разбавления, предназначен для машин, вырабатывающих двухслойную санитарно-гигиеническую бумагу повышенной пухлости. Фирма «Andritz»

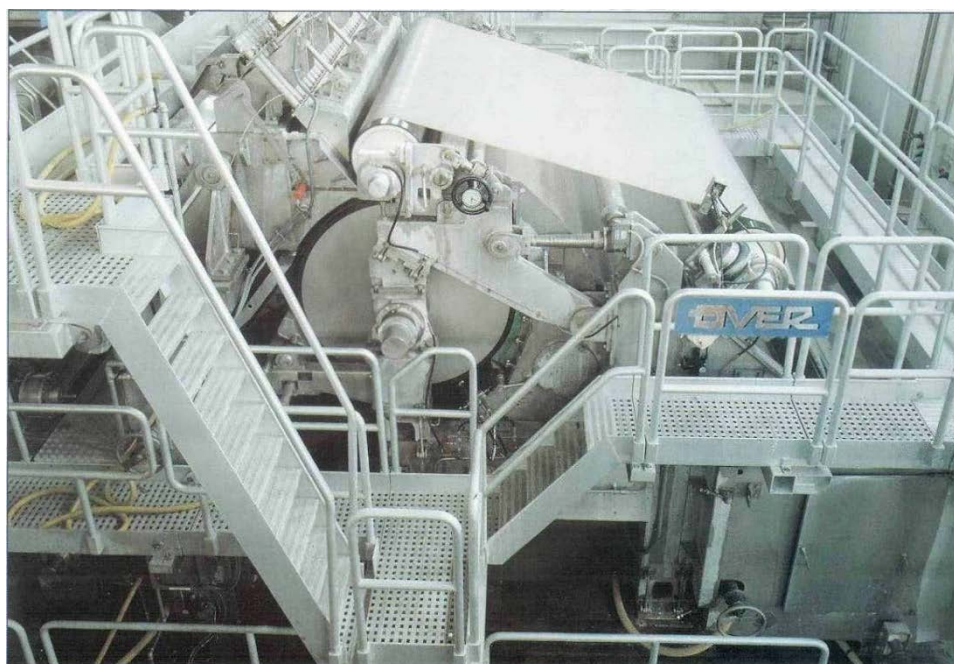


Рис. 14. Напорный ящик с формером для выработки санитарно-гигиенических бумаг

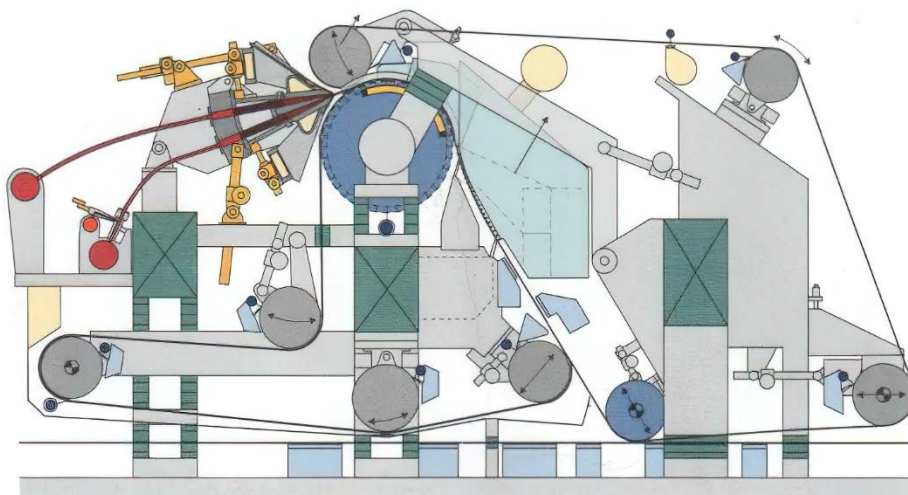


Рис. 15. Напорный ящик турбулентного типа в составе двухсеточного формующего устройства «Duo Former™ Top» фирмы «Voith», двухканальный с жёсткой разделительной пластиной; с системой раздельного регулирования скорости напуска из каждого канала; с двумя коллекторами, нижний из которых оснащён собственным устройством для разбавления, предназначен для машин, вырабатывающих двухслойный картон. При выработке двухслойного картона массой $1 \text{ м}^2 150 \text{ г}$ скорость машины достигла 1500 м/мин

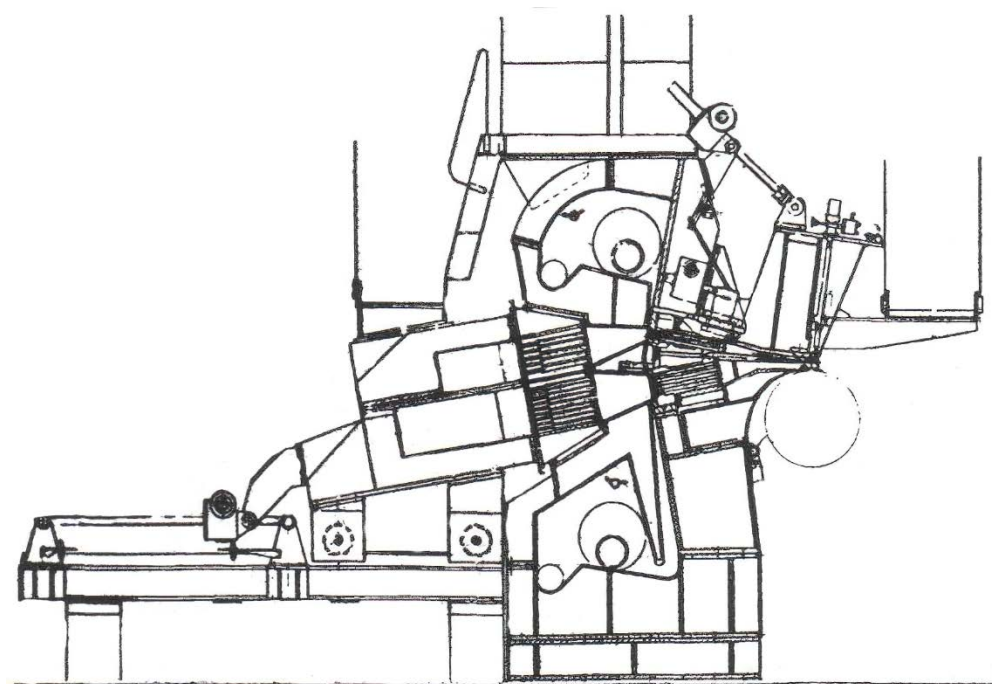


Рис. 16. Напорный ящик турбулентного типа, двухканальный с жёсткой регулируемой разделительной пластиной; с двумя коллекторами, потокораспределителями трубчатой конструкции; двумя воздушными колпаками, предназначен для машин, вырабатывающих многослойную продукцию со скоростью до 1400 м/мин , ЦНИИБУММАШ

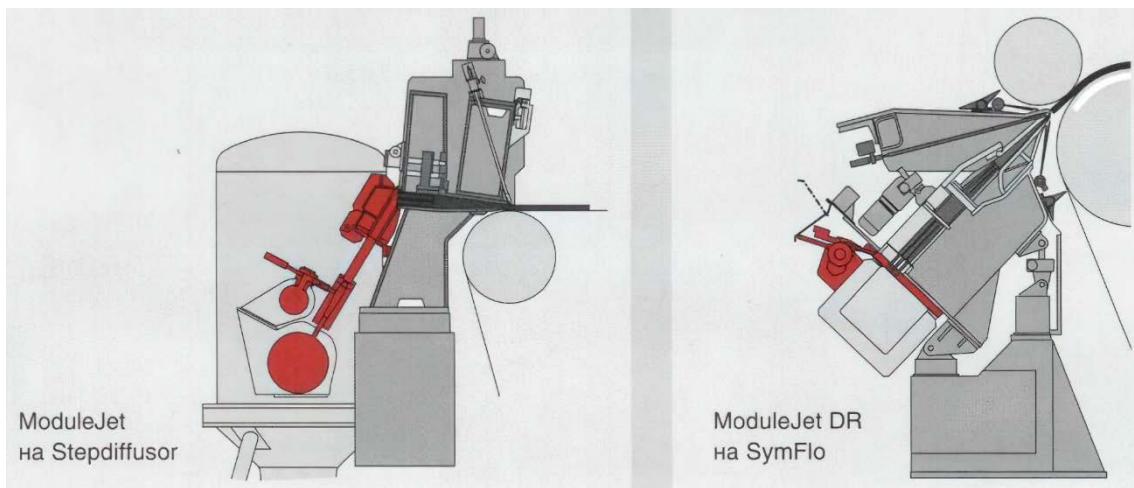


Рис. 17. Напорные ящики турбулентного типа фирмы «Voith»

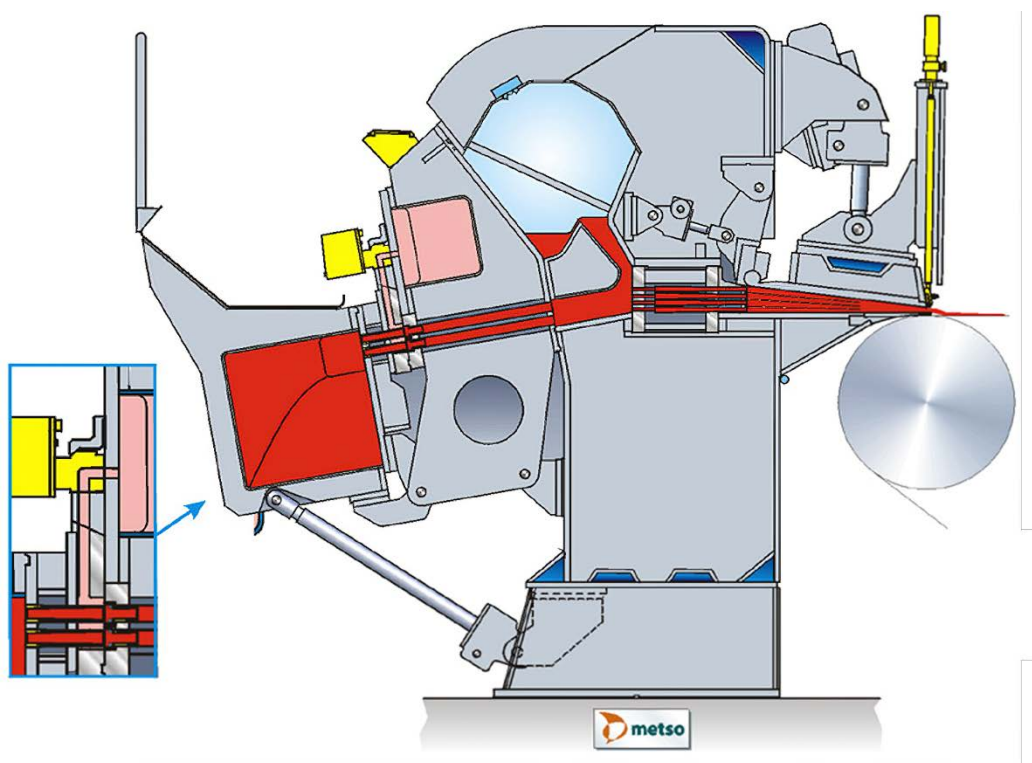


Рис. 18. Напорный ящик турбулентного типа для напуска волокнистой суспензии на плоский сеточный стол фирмы «Metso», Финляндия

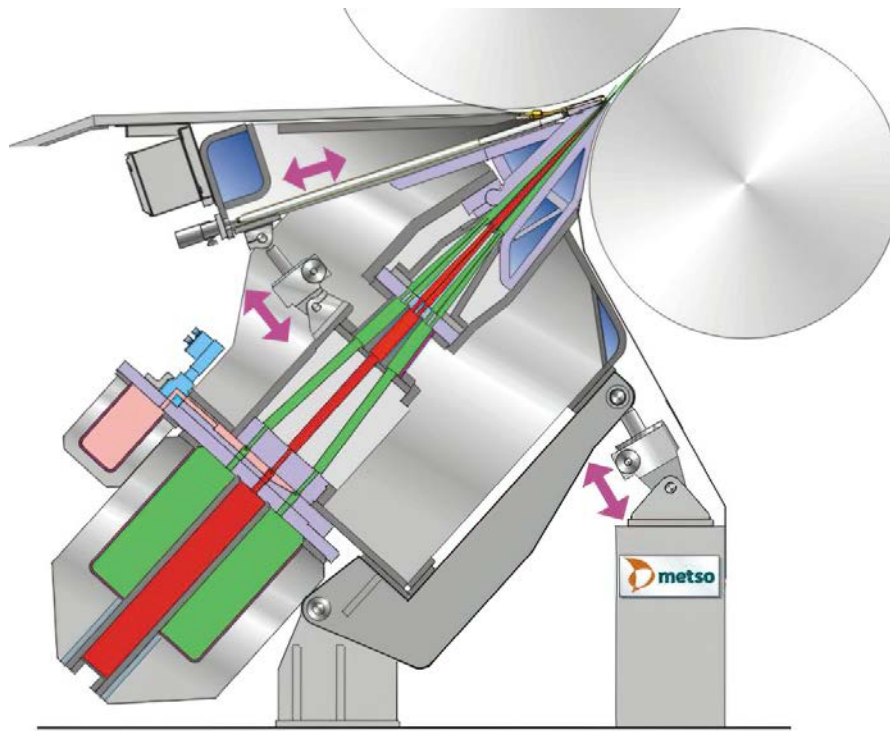


Рис. 19. Напорный ящик турбулентного типа для напуска волокнистой суспензии в сеточную часть двухсеточного формования фирмы «Metso», Финляндия

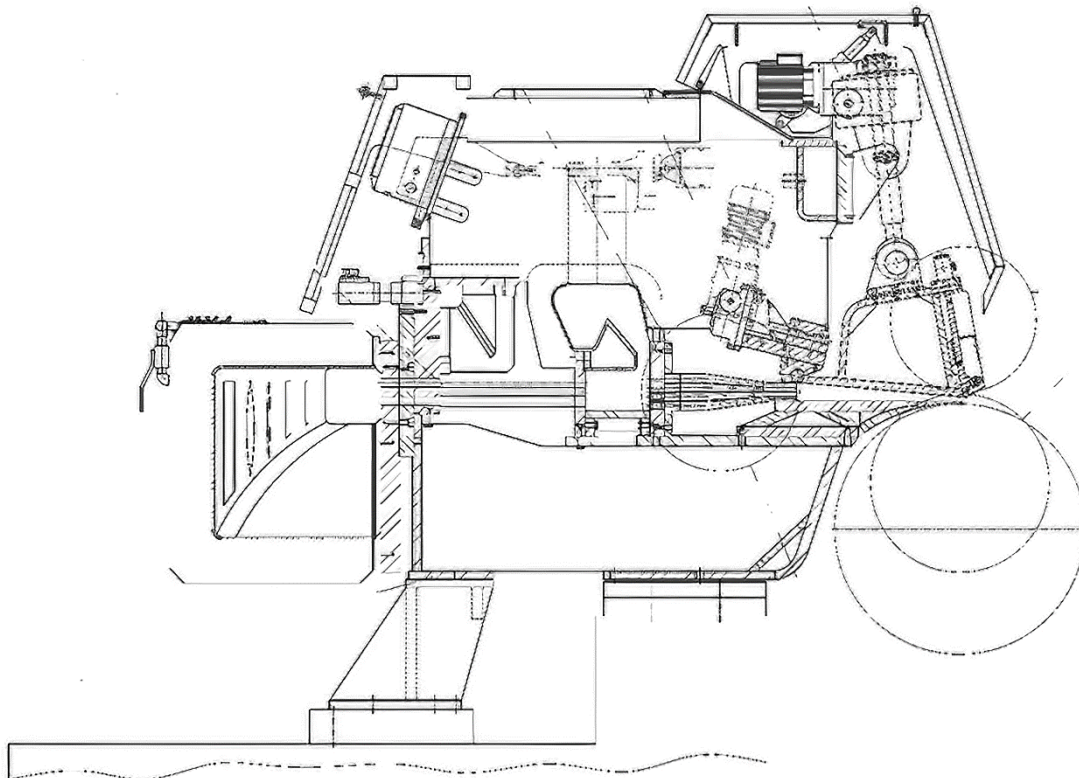


Рис. 20. Напорный ящик турбулентного типа фирмы «Valmet», Светогорский ЦБК

3.5. Конструкция напорных ящиков турбулентного типа

За десятилетия создания и эксплуатации напорных ящиков турбулентного типа состав элементов напорного ящика практически не изменился, но конструкции самих элементов претерпели значительные изменения.

Большая часть напорных ящиков турбулентного типа имеет коллектор с боковым подводом суспензии (за исключением упомянутых выше) или с дополнительным коллектором для разбавления концентрации в определённых зонах потокораспределителя. Так как коллектор служит для поддержания постоянного статического давления по всей своей длине при переменном расходе суспензии в отверстия потокораспределителя, то камера его имеет сложную конфигурацию и сужается к концу.

Камера коллектора может иметь (в основном) прямоугольное, круглое или квадратное сечение. В ЦНИИБУММАШе профили камер коллекторов в основном рассчитывались по методу д. т. н., профессора О. А. Терентьева. Наиболее простой профиль с точки зрения расчёта и изготовления – это прямоугольный профиль камеры. При одной точке перегиба и одной переменной стороне сечения ошибка при расчёте влияет на точность изготовления в линейной зависимости. При круглом сечении камеры коллектора при расчёте имеет место три точки перегиба, и неточность изготовления увеличивает ошибку профиля в квадрате, хотя течение суспензии в такой камере снижает гидравлическое сопротивление.

Основное назначение коллектора с потокораспределителем – повернуть поток суспензии и при одинаковом давлении в каждом сечении по длине камеры обеспечить одинаковые скорости во входных отверстиях потокораспределителя и этим обеспечить равномерное распределение массы 1 м^2 по ширине машины.

Коллекторы сварной конструкции с подребрением изготавливались в отечественной промышленности в основном из стали 12Х18Н9Т.

Для промывки отверстий потокораспределителя коллектор с помощью механизмов может откидываться, а в турбулентных ящиках с воздушной подушкой откидываются коллектор и потокораспределитель либо вместе, либо отдельно. Коллектор также снабжён люками для осмотра и промывки.

Из коллектора суспензия поступает в потокораспределитель, который в современных конструкциях напорных ящиков может играть роль и единственного турбулизирующего блока. Отверстия потокораспределителя чаще всего представляют собою ступенчатые диффузоры, и в сечении они круглые (двухступенчатые перфорированные плиты из органического стекла или из полиэтилена) или в виде трубок из нержавеющей стали. Если потокораспределитель играет роль единственного турбулизирующего блока, то второе отверстие переходит в трубку прямоугольного сечения (третья ступень, если изменяется площадь сечения).

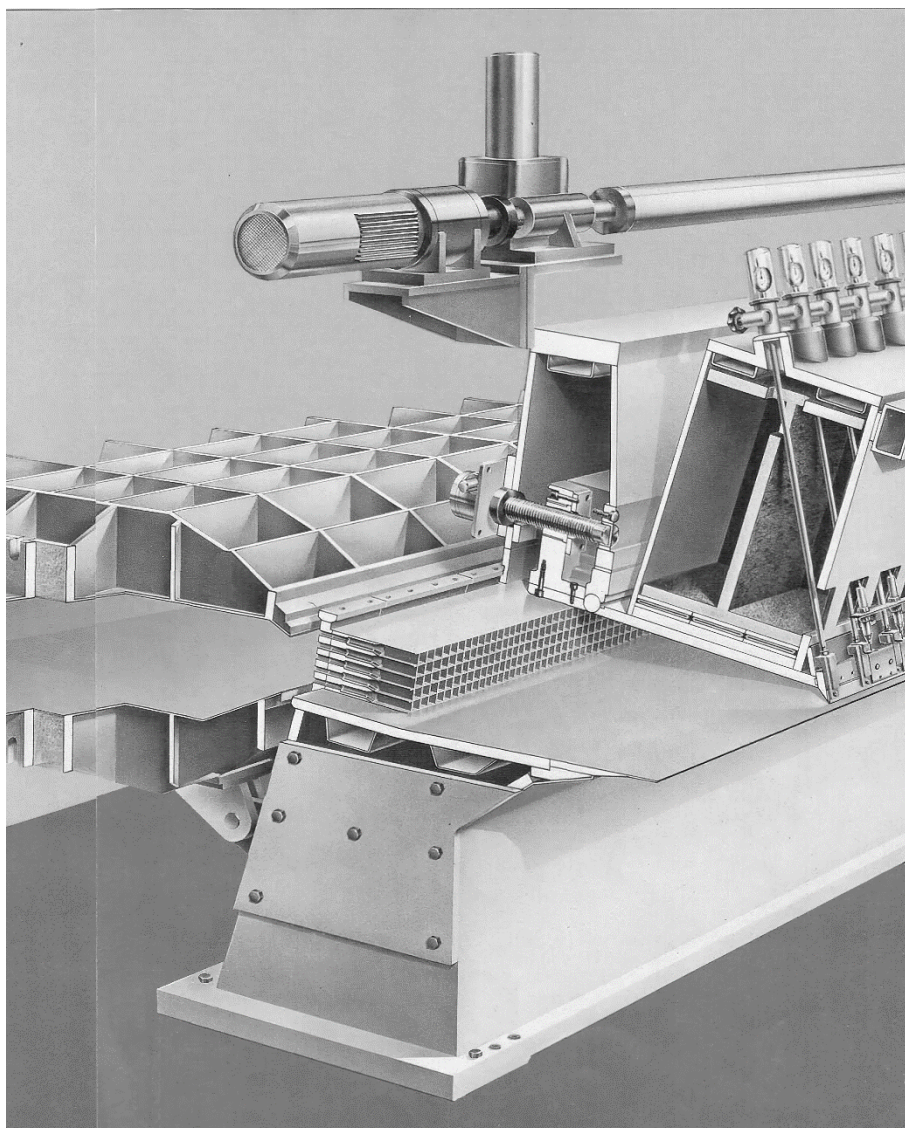


Рис. 21. Коллектор напорного ящика турбулентного типа фирмы «Эшер-Висс», Австрия

В первой ступени отверстий поток ускоряется, суспензия турбулизируется за счёт сопротивления при входе из коллектора в отверстия (сужение) и трения о стенки, гасятся синусоидальные колебания, возникшие при повороте, и поток, проходя все ступени, попадает либо в смесительную камеру, либо в выпускной канал напорного ящика. Суспензия турбулизуется. Маломасштабные вихри за счёт возникающего поля скоростей внутри них и градиентов скорости внутри поля препятствуют хлопьеобразованию, что значительно улучшает просвет картонно-бумажного полотна.

Днище напорного ящика, боковые стенки, задняя стенка, крыша напорного ящика с встроенной ёмкостью для воздушной подушки (или без неё) составляют корпус напорного ящика. В напорных ящиках с воздушной подушкой внутри корпуса между потокораспределителем и турбулизирующим блоком образуется смесительная камера, соединённая с воздушной подушкой. Ёмкость с воздушной подушкой имеет перелив с постоянным уровнем суспензии и оснащается

спрыском – пеногасителем. В корпусе напорного ящика над турбулизирующим блоком размещены кронштейны с ползунами, связанные с механизмами горизонтального перемещения передней стенки напорного ящика. На крыше с помощью кронштейнов закреплены механизмы вертикального перемещения передней стенки. Конфигурации корпусов, размещение коллекторов с потокораспределителями, ёмкостей для воздушной подушки (гасителей пульсаций), турбулизирующих блоков, и их конструкция у напорных ящиков различных фирм весьма отличаются друг от друга, хотя выполняют те же самые функции (см. рисунки напорных ящиков). Днища корпусов современных напорных ящиков и передние подвижные стенки снабжены системами обогрева для компенсации разницы температур нагретой суспензии и корпуса во избежание возникновения температурных напряжений. Боковые стенки корпусов напорных ящиков, имеющих воздушные подушки, снабжены отверстиями для перелива, смотровыми окнами. В напорных ящиках фирмы «Valmet» через отверстия в боковых стенках в зону расположения турбулизирующего блока из коллектора подаётся суспензия под более высоким давлением для снижения трения суспензии о боковые стенки выпускного канала (для спрямления эпюры скоростей в зоне напуска) и заполнения полостей между трубками и стенками канала. Корпус напорных ящиков чаще всего целиком изготавливается из нержавеющей стали.

Конструкции турбулизирующих блоков разнообразны, как и в целом конструкции напорных ящиков. В напорных ящиках с перфорированными валами и в некоторых современных турбулентных напорных ящиках потокораспределитель можно также считать турбулизирующим блоком. В напорных ящиках с воздушной подушкой турбулизирующий блок – это отдельное устройство, являющееся генератором маломасштабной турбулентности в потоке волокнистой суспензии. Маломасштабная турбулентность, как уже говорилось выше, препятствует хлопьеобразованию волокон, улучшает просвет картонно-бумажного полотна и увеличивает прочность вырабатываемой продукции.

Первые конструкции блоков состояли из планки с прорезями на входе, за которыми шли наклонные пластины. Из блока поток выходил в выпускной канал и далее на сетку. При такой конструкции скорость выхода струй суспензии из плоских каналов, образующихся наклонными пластинами, достаточно велика по сравнению со скоростью в выпускном канале напорного ящика. Из-за волокон, наполнителей, способствующих гашению маломасштабных вихрей, затопленные струи, не разрушаясь, попадали на сетку, образуя полосы на поверхности полотна. Этот дефект практически не оказывал влияния на выработку санитарно-гигиенической бумаги при напуске суспензии на сеточную часть бумагоделательной машины с отсасывающим грудным валом (напорный ящик турбулентного типа машины Б-82.18, ЦНИИБУММАШ).

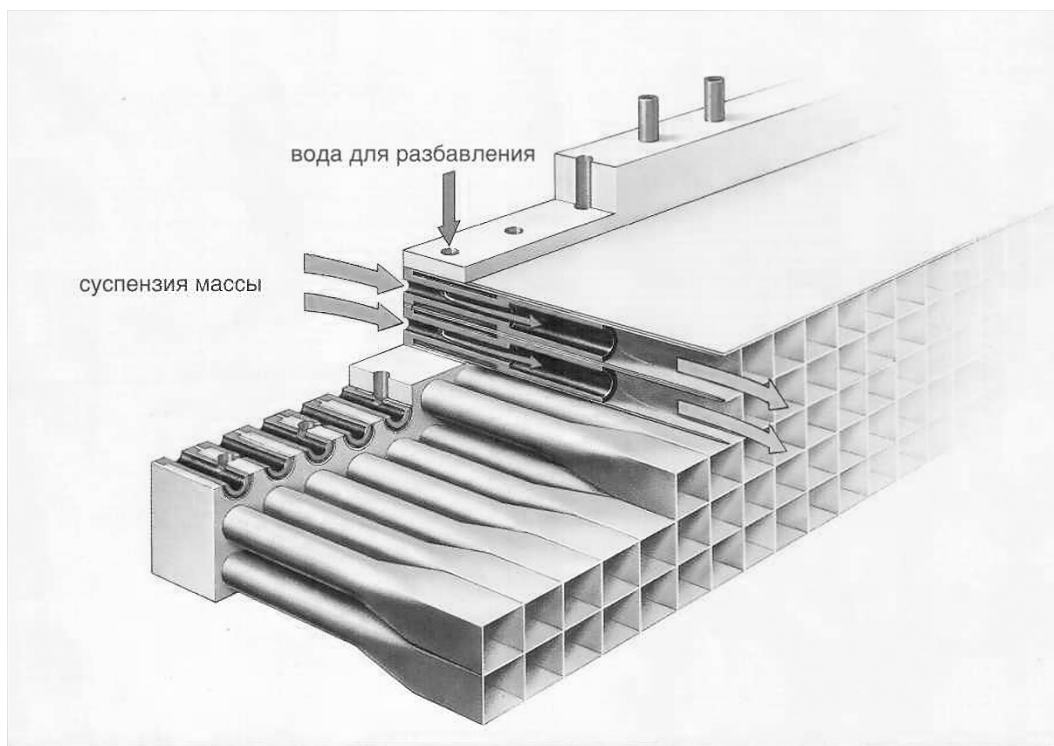


Рис. 22. Турбулизирующий блок напорного ящика фирмы «Allimand», Франция

Американская фирма «Veloit» разработала турбулизирующий блок, сочетающий в себе перфорированную плиту с закреплёнными к ней шарнирно плавающими в потоке суспензии гибкими тонкими пластинами, выполненными из гексана, несколько уже ширины напорного ящика. Пластины достаточно тонкие, ровные, имеющие небольшую шероховатость поверхности. Скорость суспензии при выходе из пространства между пластинами практически незначительно выше скорости потока в выпускном канале. Недостатком в применении гексановых пластин является их поверхностный износ и потеря со временем упругих свойств, что требует их замены.

В современных конструкциях напорных ящиков турбулентного типа, проектируемых в Европе фирмами «Voith Sulzer», «Andritz», «Metso» и др., используются трубчатые турбулизирующие блоки с отверстиями в виде ступенчатых диффузоров с переходом с круглого сечения на квадрат или прямоугольник. Трубки блоков и перфорированные пластины для их крепления изготавливаются из нержавеющей стали.

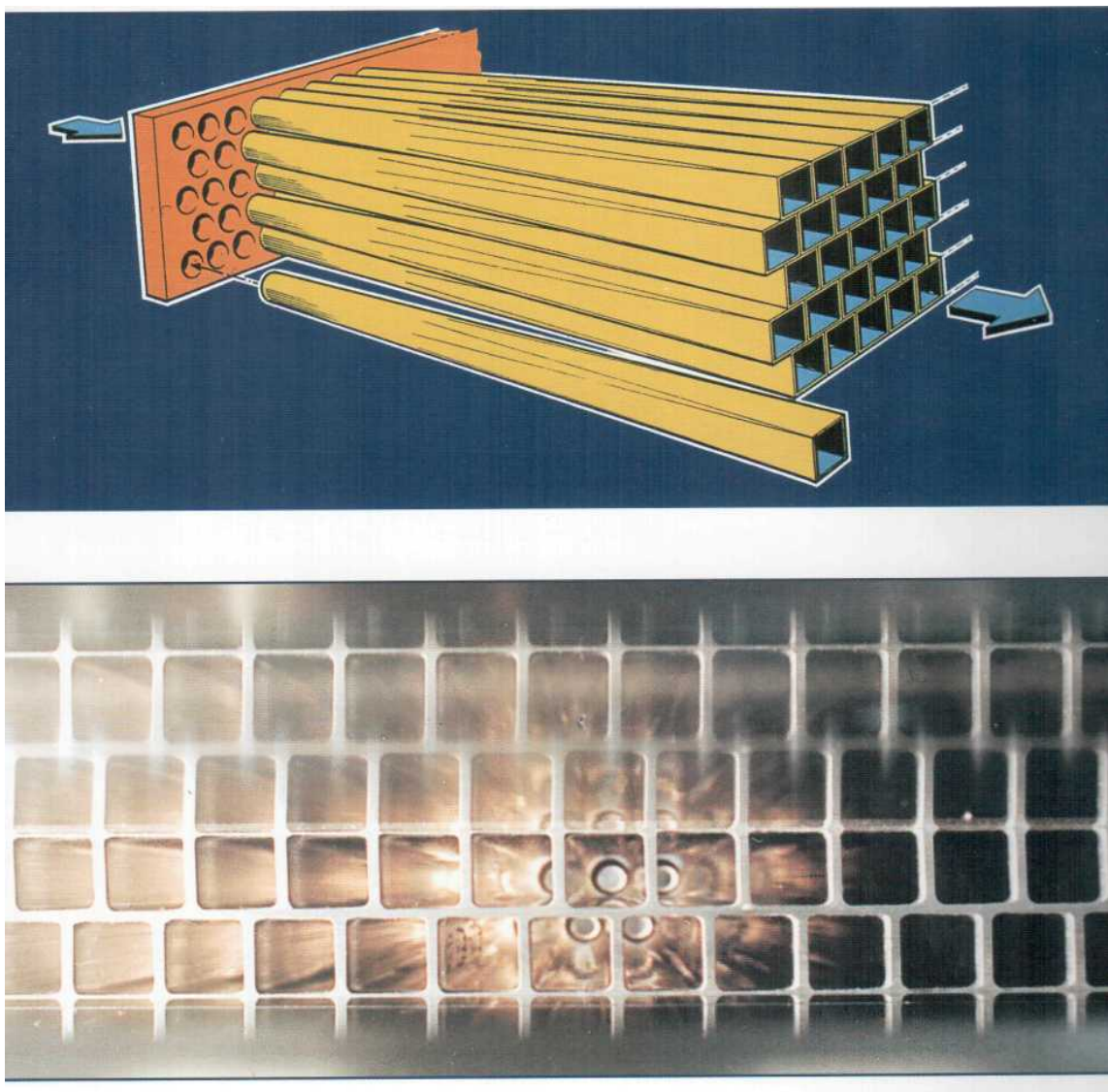


Рис. 23. Турбулизирующий блок для напорного ящика фирмы «Metso», характерный для многих современных конструкций напорных ящиков

Новые конструкции турбулизирующих блоков лишены многих выше перечисленных недостатков, и их отдельные модификации, как и в целом конструкции напорных ящиков, зависят от ассортимента вырабатываемой продукции, скорости машины, конструкции сеточной части.

Передние подвижные стенки турбулентных напорных ящиков в зависимости от конструкции сеточных частей имеют разную конфигурацию. При работе с сеточной частью для двухсеточного формования и при наличии систем разбавления напорные ящики могут не оснащаться механизмами точной регулировки. Но в большинстве случаев механизмы точной регулировки устанавливают на передних подвижных стенках напорных ящиков. Некоторые передние стенки не имеют возможности горизонтально перемещаться, и горизонтальное перемещение осуществляется только благодаря перемещению корпуса самого напорного ящика.

Корпуса передних стенок сварные. Корпус представляет собой балку коробчатого сечения, внутренняя часть которой подребрена. Кроме внутренних рёбер жёсткости, стенки изготавливаются из нержавеющей стали. В корпусе передней стенки предусмотрены полости для подачи горячей воды для подогрева. С корпусом напорного ящика подвижная передняя стенка связана шарнирно.

Открытие и закрытие выпускной щели осуществляется механизмами вертикального перемещения, состоящими из системы качающихся червячно-винтовых редукторов, связанных между собой трансмиссионными валами и через редуктор с электродвигателем. Величина открытия выпускной щели в зависимости от ассортимента выпускаемой продукции колеблется от 6 до 100 мм.

Механизмами горизонтального перемещения (если они имеются) передние подвижные стенки в основном могут перемещаться от кромки нижней губы внутрь до 25 мм.

3.6. Определение основных размеров конструкции напорных ящиков

Одним из основных размеров напорных ящиков является ширина щели для напуска волокнистой суспензии на сеточный стол.

Численно ширина щели напорного ящика равна ширине полотна в начале сеточного стола. Ширина щели напорного ящика определяется из выражения:

$$B = \frac{(B_{\text{обр}} + 2K)100}{100 - \varepsilon} + 2A + 2F \text{ мм,}$$

где $B_{\text{обр}}$ – ширина полотна на накате, мм;

F – ширина, занимаемая форматными линейками, мм (до 50 мм) – форматные линейки устанавливаются только в сеточных частях, имеющих плоские столы;

K – ширина обрезаемых кромок на продольно-резательном станке, мм (на отечественных бумаго-картоноделательных машинах ширина отрезаемых кромок на продольно-резательных станках составляет 25 мм);

A – ширина отсекаемой кромки перед гауч-валом, мм (ширина отсекаемых кромок перед гауч-валом колеблется от 30 до 100 мм);

ε – поперечная усадка картонно-бумажного полотна в сушильной части машины, % (в зависимости от состава суспензии поперечная усадка колеблется в пределах от 2 до 9 %).

Для определения размеров проточных частей напускных устройств необходимо определить расход суспензии на сеточный стол. Расход суспензии на сеточный стол определяется из расчёта баланса воды и волокна или из выражения:

$$Q = \frac{Q_{\text{час}} \cdot c_{\text{н}}}{(c_{\text{ящ}} - c_{\text{рег}}) \cdot 3600000} \text{ м}^3/\text{с},$$

где $Q_{\text{час}}$ – часовая производительность машины, кг/ч;

$c_{\text{н}}$ – концентрация полотна на накате, % (концентрация картонно-бумажного полотна на накате составляет $92 \div 96$ %);

$c_{\text{ящ}}$ – концентрация волокнистой суспензии в напорном ящике, % (в зависимости от вырабатываемых массовых видов продукции концентрация может колебаться от 0,05 до 1,2 %);

$c_{\text{рег}}$ – концентрация регистровой воды, % (в зависимости от вырабатываемых массовых видов продукции концентрация приближённо может колебаться от 0,05 до 0,3 %).

Необходимый расход суспензии, подаваемой в коллектор, определяется с учётом конструкции напорного ящика, т. е. наличием переливов и рециркуляции. При расчёте открытых (рис. 6) и закрытых напорных ящиков без переливов учитывается только расход на рециркуляцию. В закрытых напорных ящиках с перфорированными валами (рис. 7) учитывается перелив через карман в передней стенке и отверстия в боковых стенках и рециркуляция. В турбулентных напорных ящиках при наличии воздушного колпака учитываются перелив и отвод суспензии также через отверстия в боковых стенках (рис. 10) и расход суспензии на рециркуляцию.

Для открытых и закрытых напорных ящиков без переливов имеем:

$$Q_k = \frac{Q \cdot 100}{(100 - k_1)} \text{ м}^3/\text{с},$$

где k_1 – коэффициент рециркуляции, % (по данным ЦНИИБУММАШа коэффициент рециркуляции принимается до 10 %)

Для закрытых напорных ящиков с перфорированными валами и турбулентными напорными ящиками, имеющими перелив:

$$Q_k = \frac{Q \cdot 100 \cdot 100}{(100 - k_1) \cdot (100 - k_2)} \text{ м}^3/\text{с},$$

где k_2 – коэффициент расхода на перелив, % (по данным ЦНИИБУММАШа коэффициент расхода на перелив принимается до $1 \div 3$ %)

Следующим этапом является определение количества отверстий в потокораспределителе.

Рекомендации по поддержанию определённых скоростей волокнистой суспензии в проточных частях напорного ящика определяются из реологической характеристики, которая зависит от концентрации, градуса помола, состава по волокну, наполнителя в зависимости от ассортимента вырабатываемой продукции на данной бумагоделательной или картоноделательной машине.

На основании имеющихся научных данных, изучения работы эксплуатируемых как отечественных, так зарубежных напорных ящиков задаёмся скоростями в определённых диапазонах во входных и выходных отверстиях ступенчатого диффузора при определённых диаметрах. Определяем суммарную площадь входных отверстий из выражения:

$$F_{\Sigma} = \frac{Q_{\Pi}}{V_1} \text{ м}^2 ,$$

где Q_{Π} – расход суспензии через потокораспределитель в полость напорного ящика (если потокораспределитель одновременно является и турбулизирующим блоком или суспензия поступает в напорные ящики с перфорированными валами без перелива, то Q_{Π} – равен расходу суспензии на сеточный стол Q):

$$Q_{\Pi} = \frac{Q \cdot 100}{(100 - k_2)} \text{ м}^3/\text{с} ,$$

где V_1 – скорость суспензии во входном отверстии потокораспределителя, м/с (скорость во входных отверстиях потокораспределителя может составлять $5 \div 11$ м/с; меньшие скорости – для напорных ящиков с перфорированными валами, большие – для турбулентных).

Далее определяется ориентировочное количество отверстий:

$$n_{\Sigma} = \frac{F_{1\Sigma}}{F_1} ,$$

где F_1 – площадь сечения входного отверстия, м².

$$F_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} \text{ м}^2 ,$$

где d_1 – диаметр входного отверстия, м (диаметры входных отверстий колеблются в пределах $10 \div 15$ мм).

В потокораспределителях с перфорированными плитами и двухступенчатыми отверстиями толщиной $135 \div 250$ мм, изготовленных из органического стекла, либо из высокомолекулярного полиэтилена (Германия) диаметр выходных отверстий $18 \div 40$ мм, в трубчатых потокораспределителях, протяжённость которых может достигать $350 \div 500$ мм, диаметр выходных отверстий достигает 40 мм.

В напорных ящиках турбулентного типа, где потокораспределитель одновременно является и турбулизирующим блоком трубчатой конструкции, отверстия в основном представляют собою трёхступенчатые диффузоры с диаметрами входных отверстий $10 \div 20$ (мм) с переходом на квадрат 28×28 мм с протяжённостью $280 \div 500$ мм.

После получения количества входных отверстий необходимо их прорисовать совместно с выходными и стараться разбить по возможности таким образом, чтобы расстояния между их осями находились на одинаковом расстоянии друг от друга.

В напорных ящиках с перфорированными валами (рис. 7) и в турбулентных напорных ящиках (рис. 5) после потокораспределителей имеются зоны смешения: одна до перфорированного вала, другая до турбулизирующего блока. Затопленные струи из выходных отверстий, входящие в зоны смешения, из-за частичного подавления волокном маломасштабной турбулентности практически не распадаются и, ударяясь о поверхность перфорированного вала или турбулизирующего блока, могут дать обратные токи и крупные вихреобразования и, как следствие, продольные колебания 1 м² бумажного или картонного полотна. Во избежание этих явлений расстояние от выходных отверстий потокораспределителя до поверхности перфорированных валов или до турбулизирующего блока в конце камеры смешения должно определяться из соотношения $0,8x \div x$, где x – расстояние от среза сопла (выходное отверстие) до конца основного участка затопленной осесимметричной струи:

$$x = \frac{V_{\text{ВЫХ}} \cdot 12,4 \cdot b_0}{u_m} \text{ м,}$$

где $V_{\text{ВЫХ}}$ – скорость суспензии в выходных отверстиях потокораспределителей, м/с;

u_m – скорость суспензии в зоне смешения, м/с;

$$u_m = \frac{Q_{\text{п}}}{F_m} \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

где b_0 – характерный размер, численно равный половине гидравлического диаметра (для круглых отверстий гидравлический диаметр совпадает с диаметром), м

F_m – площадь поперечного сечения зоны смешения, м².

Турбулизирующий блок рассчитывается аналогично потокораспределителю с учётом того, что часть расхода идёт на перелив. В выходных отверстиях блока скорость мало отличается от скорости в выпускном канале напорного ящика.

Важнейшим параметром напорного ящика является величина рабочего открытия выпускной щели. Выпускная щель образована днищем напорного ящика, переходящим в нижнюю губу, и передней стенкой, к нижней части которой прижимается верхняя губа и соединяется с механизмами точной регулировки. Рабочая величина открытия выпускной щели определяется из выражения:

$$h = \frac{q}{10,9 \cdot (c_{\text{ящ.}} - c_{\text{рег.}}) \cdot \zeta} \text{ мм,}$$

где q – масса 1 м² бумажного (картонного) полотна), г;

$c_{\text{ящ.}}$; $c_{\text{рег.}}$ – соответственно концентрация суспензии в напорном ящике и концентрация регистровой воды;

ζ – коэффициент сжатия струи – 0,6 ÷ 0,92. Коэффициент зависит от конфигурации выпускного канала, при сходящихся губах коэффициент имеет наибольшее значение до 0,9 – в турбулентных ящиках, 0,8 – для напорных ящиков с перфорированными валами. Для напорных ящиков с вертикальной передней стенкой значение коэффициента можно принять равным – 0,6.

При разработке напорных ящиков для работы с плоскими сеточными столами на машинах, вырабатывающих продукцию массового ассортимента, выпускная щель напорного ящика должна располагаться на таком расстоянии, при котором струя волокнистой суспензии попадает на первую гидропланку формирующего ящика. Место встречи струи волокнистой суспензии с первой гидропланкой формирующего ящика определяется положением передней подвижной стенки напускного устройства. При движении передней стенки внутрь напускного устройства от кромки нижней губы зона встречи струи с первой гидропланкой формирующего ящика отдалается, при движении наружу, ближе к кромке нижней губы, место встречи струи приближается к кромке первой гидропланки.

Расстояние от кромки нижней губы до места встречи струи с сеткой определяется из выражения:

$$L = V_{\text{стр.}} \cdot t \cdot \cos \beta \text{ м,}$$

где $V_{\text{стр.}}$ – скорость струи из выпускной щели напорного ящика, м/с.

При расчётах скорость струи принимается равной скорости сеточной части машины (на практике скорость струи из выпускной щели может увеличиваться или уменьшаться по сравнению со скоростью сеточной части в зависимости от ассортимента вырабатываемой продукции).

Скорость сеточной части за счёт поперечной усадки полотна составляет приблизительно 93 % ÷ 95 % от скорости машины (можно вычислить более точно скорость сеточной части).

Скорость машины определяется по формуле:

$$V_{\text{м}} = \frac{Q_{\text{час}}}{0,06 \cdot B_{\text{н}} \cdot q} \text{ м/мин,}$$

где $B_{\text{н}}$ – необрезная ширина бумажного (картонного) полотна на накате, м;

t – время свободного движения струи, с.

Время свободного движения струи определяется из выражения:

$$t = \frac{\sqrt{(V_{\text{стр.}} \cdot \sin \beta)^2 + 2ga} - V_{\text{стр.}} \cdot \sin \beta}{g} \text{ с,}$$

где β – угол, под которым струя попадает на сеточный стол, град. (рис. 24);

a – расстояние от поверхности нижней губы до сетки, м (задаётся при проектировании);

$V_{\text{стр.}}$ – скорость струи приближённо можно принять равной скорости сетки, м/с или $0,93 \div 0,95 V_{\text{м.}}$

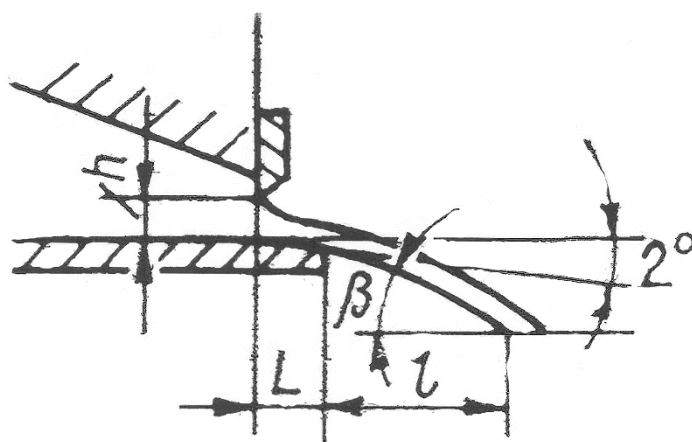


Рис. 24. Зона выпускной щели напорного ящика

При проектировании напорного ящика с подачей суспензии с лицевой, а чаще всего с приводной стороны, определение профиля коллектора – важная задача для обеспечения равномерного распределения массы 1 м^2 бумажного (картонного) полотна по ширине машины. Скорость во входном сечении коллектора, исходя из условий «незабивания» волокон входных отверстий потокораспределителя, связана со скоростью во входных отверстиях соотношением $V_1 / V_{\text{вх. к.}} \geq 2,5 \div 3,5$. По известному расходу волокнистой суспензии в коллектор, и исходя из скорости во входном сечении, определяем площадь входного сечения. Расчёт профиля ведётся по методике, разработанной д. т. н., профессором О. А. Терентьевым.

$$F = F_0 \times \left(\frac{Q_0}{Q_0 - q \cdot x} \right)^{\frac{0,25}{k} - 1} \times$$

$$\times e^{\frac{0,25}{k} - \frac{0,25x}{L}} \left\{ e^{-\frac{0,125}{k}} + \frac{\lambda}{4,5148 \cdot q \cdot \alpha_0} \cdot \frac{Q_0}{\sqrt{F_0}} \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\left(-\frac{0,125}{k} \right)^i \cdot \left[1 - \left(\frac{Q_0 - q \cdot x}{Q_0} \right)^{i + \frac{0,125}{k} + \frac{1}{2}} \right]^2}{i! \cdot \left(i + \frac{0,125}{k} + \frac{1}{2} \right)} \right\}^2, \quad (6)$$

где F – расчётная площадь сечения, м²;

F_0 – площадь входного сечения коллектора, м²;

Q_0 – расход суспензии во входном сечении коллектора, м³/с;

q – расход суспензии на метр ширины, м³/с·м;

λ – гидравлический коэффициент трения (по данным ЦНИИБУММАШа, коэффициент принимается равным – 0,02);

α_0 – коэффициент неравномерности равен 1,1;

k – коэффициент, учитывающий рециркуляцию (при рециркуляции 10 % коэффициент равен 0,9);

L – длина коллектора, м;

x – расстояние от входа до расчётного сечения, м.

Расчёты коллекторов производятся при $i = 0$, т. е. из суммы используется только первый член ряда, что даёт ошибку при расчётах, не превышающую 0,6 %. При расчёте прямоугольного коллектора, в связи с выше сказанным, преобразуем формулу (6), считая, что:

$$Q_0 = \frac{q \cdot L}{k}; \quad \frac{Q_0}{Q_0 - q \cdot x} = \frac{L}{L - k \cdot x}; \quad F_0 = b_0 \cdot H_0; \quad F = b \cdot H_0,$$

где b_0 – ширина коллектора во входном сечении, м;

H_0 – высота коллектора (постоянная величина), м;

b – ширина коллектора в расчётном сечении, м.

$$b = b_0 \cdot \left(\frac{L}{L - k \cdot x} \right)^{\frac{0,25}{k} - 1} \cdot e^{0,25 \cdot \left(\frac{1}{k} - \frac{x}{L} \right)} \times$$

$$\times \left\{ e^{-\frac{0,125}{k}} + \frac{\lambda}{4,5148 \cdot \alpha_0 \cdot k} \cdot \frac{L}{\sqrt{F_0}} \cdot \frac{\left[1 - \left(\frac{L - k \cdot x}{L} \right)^{\frac{0,125}{k} + \frac{1}{2}} \right]^2}{\frac{0,125}{k} + \frac{1}{2}} \right\}^2$$

Для упрощения изготовления коллектора криволинейный контур задней стенки заменяем двумя прямолинейными участками с перегибом в точке при $x = 0,8L$ (см. рис. 25). При проектировании коллекторов круглого сечения имеются две точки перегиба при $x = 0,6L$ и при $x = 0,9L$.

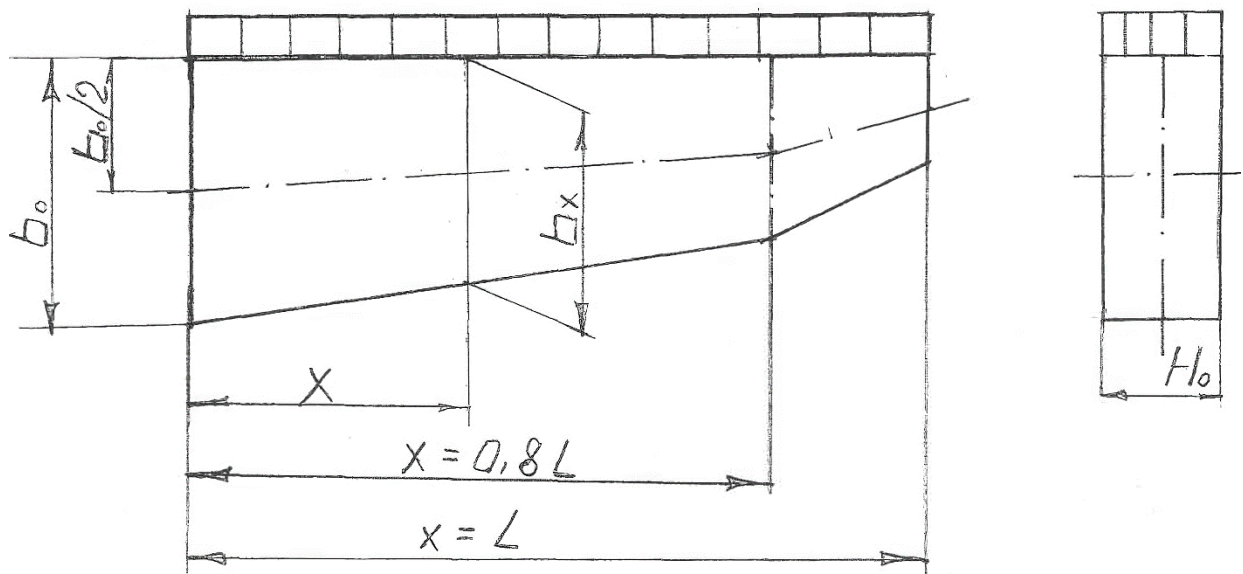


Рис. 25. Расчётная схема коллектора прямоугольного сечения с потокораспределителем

3.7. Определение необходимого давления волокнистой суспензии на входе в коллектор напорного ящика

Давление на входе в коллектор должно обеспечить нормальную работу напорного ящика и напуск волокнистой суспензии с заданной скоростью на сеточный стол или в клин между двумя сетками для сеточных частей с двухсеточным формованием бумажного (картонного) полотна. Для напорного ящика турбулентного типа суммарное давление на входе в коллектор можно определить из выражения:

$$H_{\Sigma} = H_{\Pi} + H_{\Gamma} + H_{\text{с}} + H_{\Pi, \text{в}} + H_{\Pi, \text{п}},$$

где H_{Π} – потеря давления в потокораспределителе напорного ящика;

H_{Γ} – потеря давления в турбулизирующем блоке (если потокораспределитель не является одновременно и турбулизирующим блоком);

$H_{\text{с}}$ – давление, необходимое для обеспечения скоростного напора;

$H_{\Pi, \text{в}}$ – высота, на которую необходимо поднять суспензию от оси коллектора до поверхности нижней губы при напуске на плоский стол или до выпускной щели при подаче суспензии в клин на сеточную часть с двухсеточным формованием;

$H_{\Pi, \text{п}}$ – неучтённые потери давления, которые могут достигать 1 м. вод. ст.

Примечание: все расчёты для упрощения формул приводятся в м. вод. ст. (10 м. вод. ст. \approx 100 кПа \approx 0,1 МПа \approx 1 кг/см² \approx 760 мм. рт. ст.)

Потери давления в потокораспределителе определяются из выражения:

$$H_{\Pi} = \xi_{\Sigma} \cdot \frac{V_1}{2g},$$

где V_1 – скорость во входных отверстиях потокораспределителя, м/сек;

ξ_{Σ} – суммарный коэффициент потерь, приведённый к скорости во входных отверстиях потокораспределителя;

$$\xi_{\Sigma} = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4,$$

где ξ_1 – коэффициент потерь давления при входе суспензии из коллектора во входные отверстия потокораспределителя;

$$\xi_1 = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{F_{1\Sigma}}{F_{\text{п.о.}}}\right),$$

где $F_{\text{п.о.}}$ – площадь соприкосновения поверхности потокораспределителя с волокнистой суспензией со стороны коллектора, м²;

$F_{1\Sigma}$ – суммарная площадь входных отверстий при входе в потокораспределитель, м².

ξ_2 – коэффициент потерь при переходе суспензии из отверстий первой ступени (с меньшего сечения в большее) в отверстия второй ступени:

$$\xi_2 = \left(1 - \frac{F_{1\Sigma}}{F_{2\Sigma}}\right)^2,$$

где $F_{2\Sigma}$ – суммарная площадь отверстий с большим сечением, м²;

ξ_3 – аналогичен предыдущему коэффициенту;

$$\xi_3 = \frac{d_1^4}{d_2^4} \cdot \left(1 - \frac{F_{2\Sigma}}{F_{3\Sigma}}\right)^2,$$

где $F_{3\Sigma}$ – суммарная площадь отверстий следующей ступени потокораспределителя, м²;

d_1, d_2 – диаметры отверстий первой и второй ступени, м.

Если отверстия не круглые, то в формуле необходимо использовать гидравлический диаметр:

$$d_{\Gamma} = \frac{4F}{\chi},$$

где χ – смоченный периметр отверстия, м;

F – площадь сечения отверстия, м²;

ξ_4 – коэффициент потери давления при выходе суспензии из отверстий последней ступени потокораспределителя в смесительную камеру напорного ящика или в выпускной канал;

$$\xi_3 = \frac{d_1^4}{d_3^4} \cdot \left(1 - \frac{F_{3\Sigma}}{F_4}\right)^2,$$

где F_4 – площадь соприкосновения поверхности потокораспределителя с волокнистой суспензией со стороны смесительной камеры или выпускного канала, м².

Давление, обеспечивающее скоростной напор для напуска волокнистой суспензии определяется из формулы:

$$H_c = \frac{V_{\text{стр}}^2}{2g}, \text{ м вод. ст.}$$

Для напорного ящика с перфорированными валами закрытого типа давление на входе в коллектор – суммарное давление, которое можно определить из выражения:

$$H_{\Sigma} = H_{\Pi} + H_{\text{п.в.}} + H_{\text{н.п}},$$

где H_{Π} – потеря давления в потокораспределителе напорного ящика;

$H_{\text{п.в.}}$ – высота, на которую необходимо поднять суспензию от оси коллектора приближённо до поверхности нижней губы (более точно до оси потока, проходящего через выпускную щель) при напуске на плоский стол, определяется из чертежа;

$H_{\text{н.п}}$ – неучтённые потери давления, которые могут достигать до 1 м. вод. ст.

Скорость напуска (скорость струи) в закрытых напорных ящиках с перфорированными валами обеспечивается высотой уровня суспензии и давлением воздушной подушки.

$$\frac{V_{\text{стр.}}^2}{2g} = H_{\text{сусп}} + H_{\text{в.под}},$$

где $H_{\text{сусп}}$ – высота уровня суспензии в полости напорного ящика, м;

$H_{в.под}$ – давление воздушной подушки, м. вод. ст.

Так как уровень суспензии в напорных ящиках с перфорированными валами постоянен, то обычно определяется давление воздушной подушки по известной скорости напуска.

4. СЕТОЧНАЯ ЧАСТЬ

Сеточная часть предназначена для формирования и обезвоживания волокнистой суспензии и превращения её во влажное бумажное полотно концентрацией от 18 % до 22 % (в зависимости от вырабатываемой продукции).

По конструкции сеточные части можно разделить на:

- круглосеточные, с ваннами и погружёнными в них сеточными цилиндрами, прямоточного и противоточного типов;
- с вакуумформирующими цилиндрами и индивидуальными напорными ящиками, как правило, турбулентного типа;

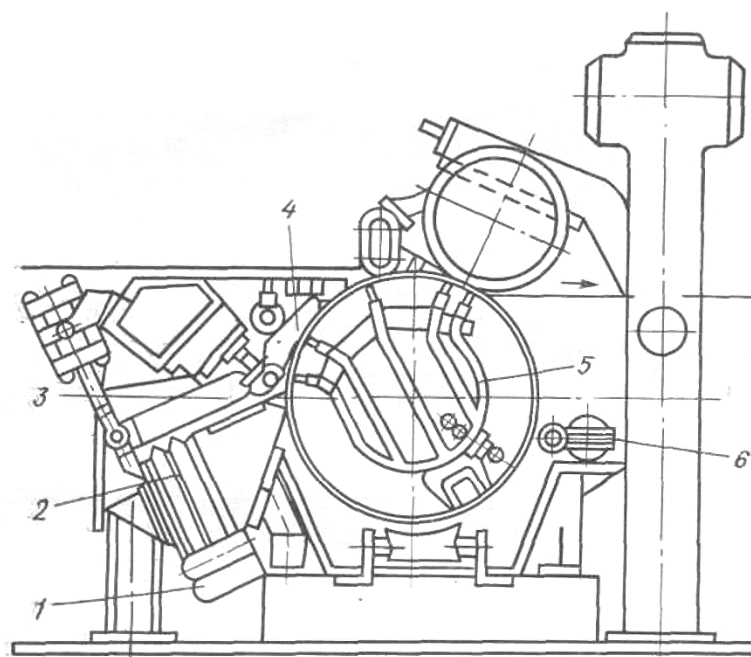


Рис. 26. Вакуумформер фирмы «Эшер-Висс», Австрия:

- 1 – коллектор подвода массы; 2 – распределительная трубка; 3 – камера рассеивания; 4 – регулируемая верхняя горловина напускного устройства; 5 – формирующий цилиндр с четырьмя камерами; 6 – опорный ролик

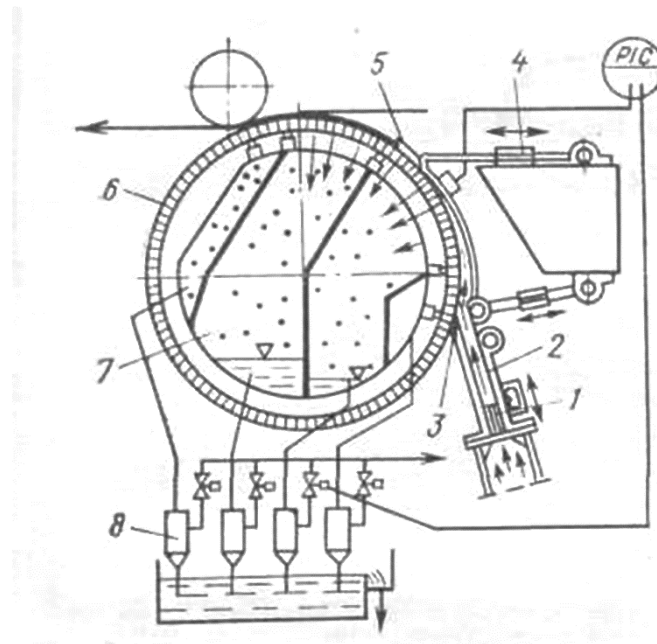


Рис. 27. Схема работы вакуумформера фирмы «Эшер-Висс», Австрия:
 1 – перфорированная плита со ступенчатыми диффузорами; 2 – подводной канал; 3 – нижняя губа; 4 – регулировочный механизм; 5 – верхняя губа; 6 – перфорированный цилиндр; 7 – отсасывающая камера; 8 – водоотделители

– с плоскими сеточными столами (самые распространённые в РФ);

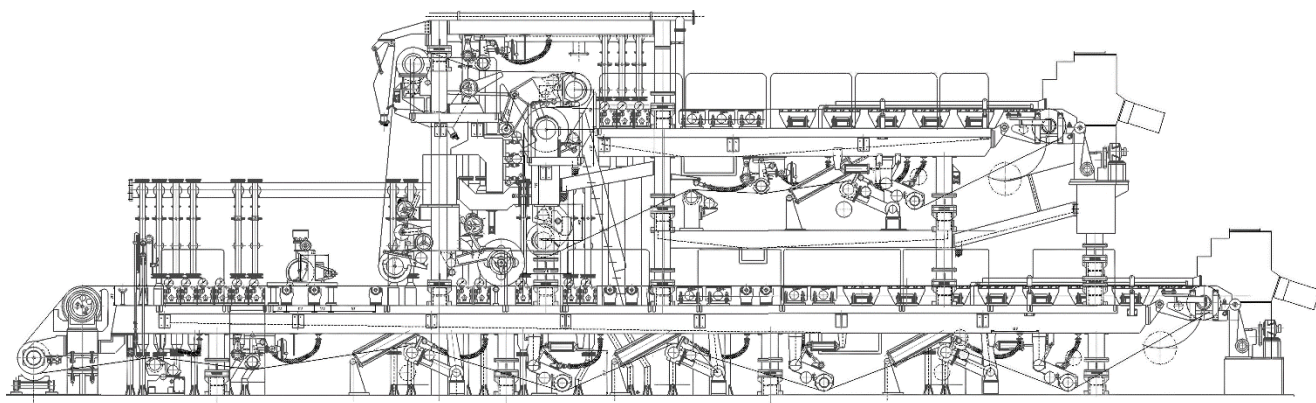


Рис. 28. Сеточная часть бумагоделательной машины с двумя плоскими столами и передающим устройством для выработки многослойных бумаг, ЦНИИБУММАШ

– с комбинированными сеточными частями, сочетающими плоский сеточный стол и верхнее формующее устройство (двухсеточное формование), например, «симформер», машина Б-92 ЦНИИБУММАШ;

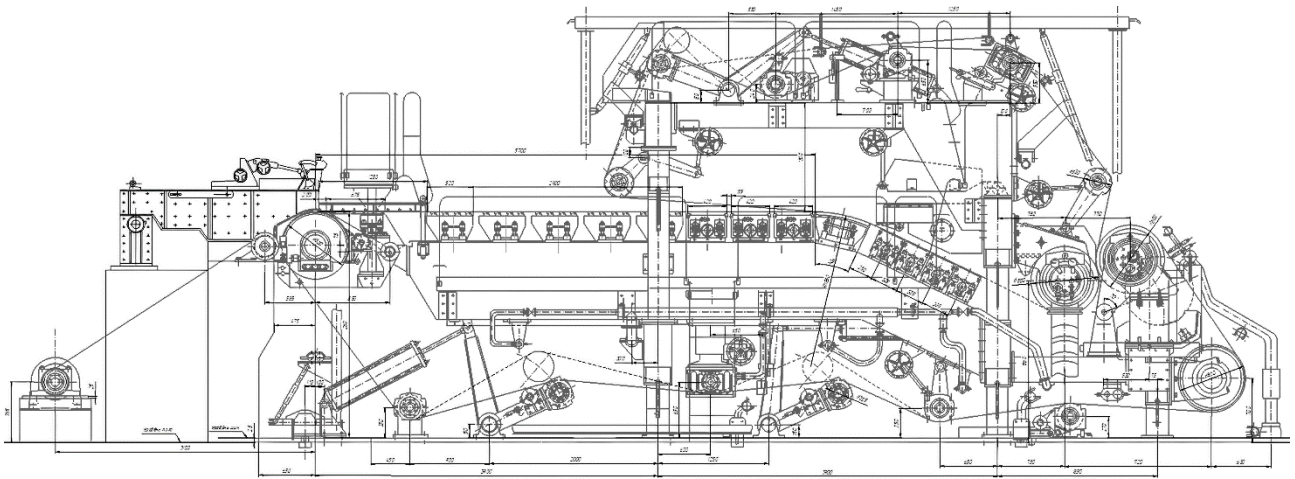


Рис. 29. Сеточная часть машины Б-92 ЦНИИБУММАШ, Троицкая бумажная фабрика, Калужская область

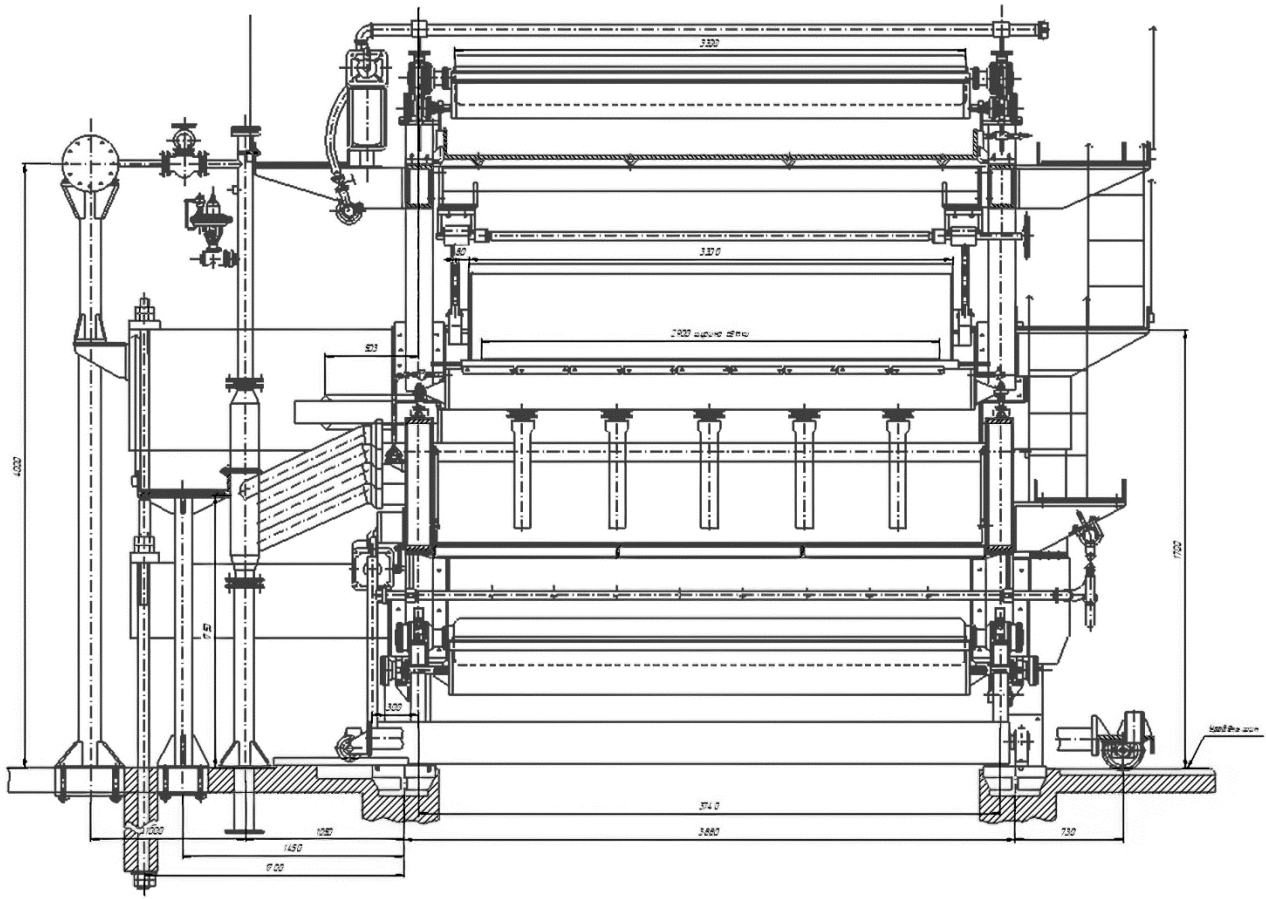


Рис. 30. Сеточная часть машины Б-92 ЦНИИБУММАШ, вид «слева», Троицкая бумажная фабрика, Калужская область

— с несколькими плоскими сеточными столами для выработки многослойной продукции;

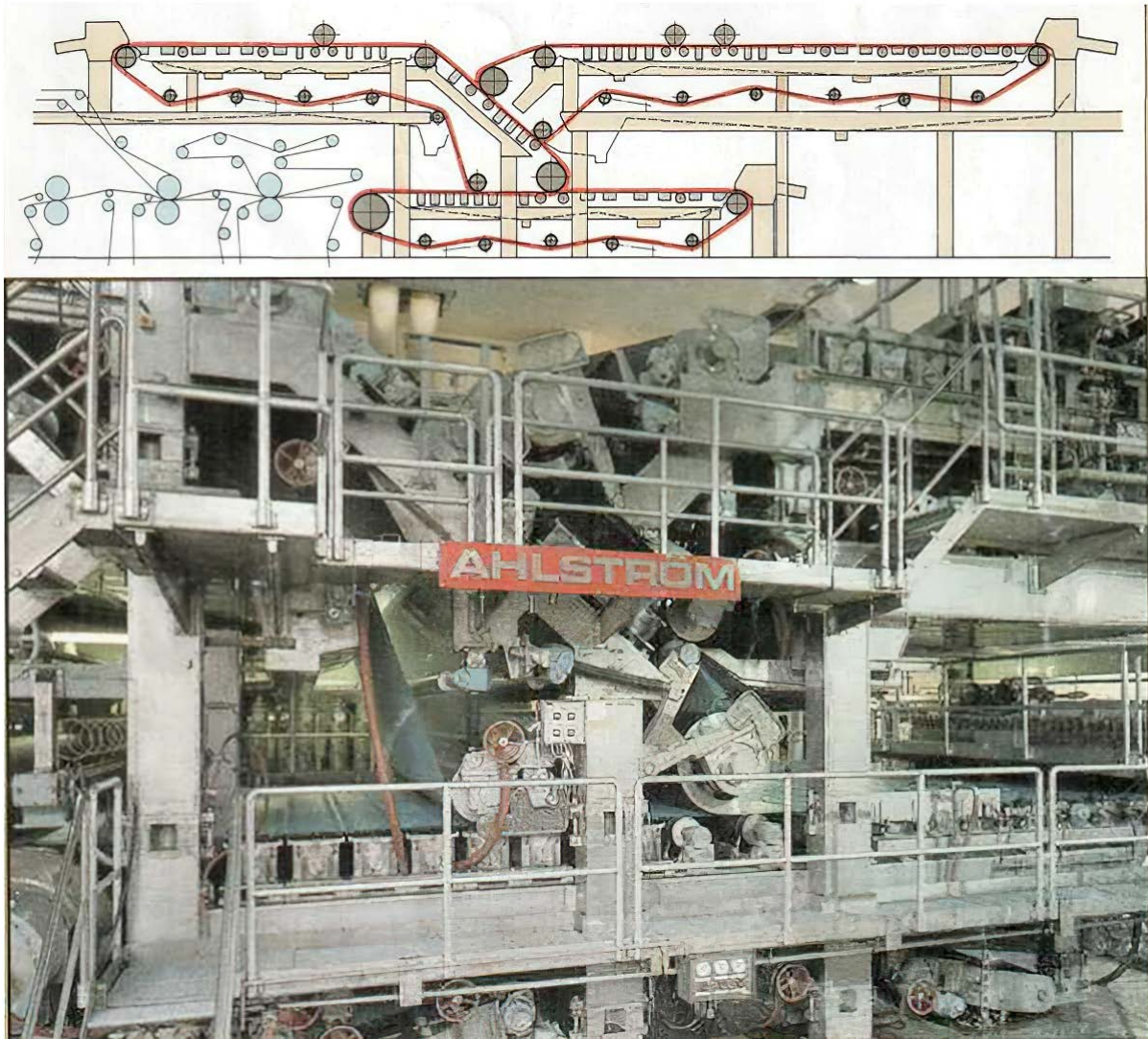


Рис. 31. Сеточная часть с тремя сеточными столами фирмы «Ahlstrom»,
Финляндия

- с комбинированными сеточными частями, сочетающими плоский стол и ванну с сеточным цилиндром для нанесения верхнего слоя (такая конструкция используется для выработки госзнаковской бумаги для документов и банкнотной бумаги);
- сеточные части для формования и обезвоживания полотна между двумя сетками (двухсеточного формования).

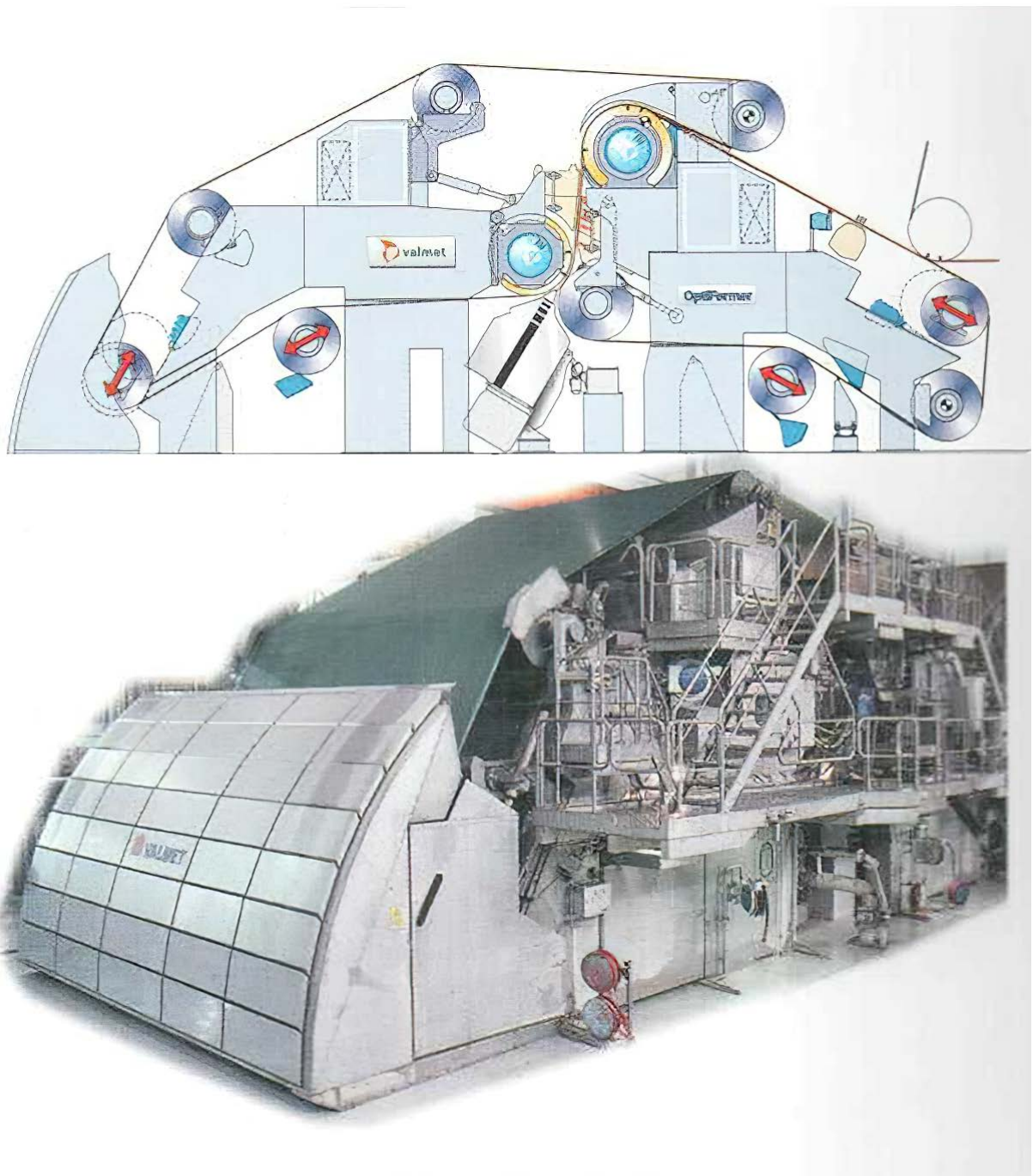


Рис. 32. Сеточная часть двухсеточного формования фирмы «Valmet»,
Финляндия

Для выработки специальных видов бумаг используются сеточные части с наклонными сеточными столами и началом формования полотна в полости напорного ящика. Такие сеточные части оснащаются обезвоживающими элементами в виде «мокрых» отсасывающих ящичков и «сухих» отсасывающих ящичков. Вдоль зоны формования такой сеточный стол оснащается гидрозатворами.

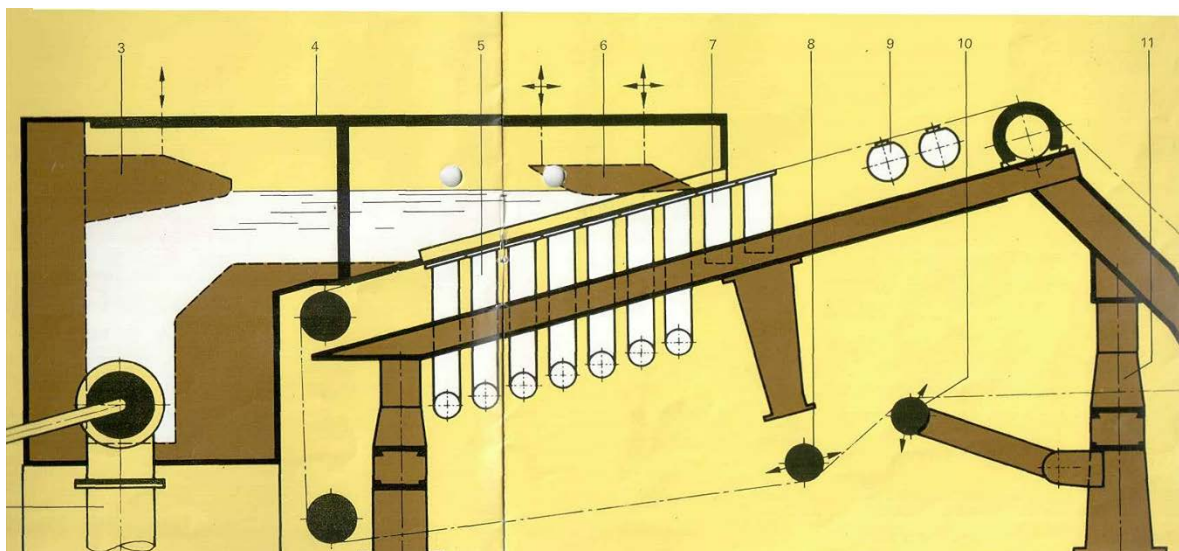


Рис. 33. Сеточная часть для выработки фильтровальных бумаг фирмы «Брудер-Хаус», ФРГ

Конструкция сеточной части представляет собой систему стоек, поперечных и продольных балок, образующих сеточный стол (столы) или секций (при двухсеточном формовании), на которых устанавливаются обезвоживающие элементы, крепятся грудной вал или входные валы (при двухсеточном формовании), поворотный вал, спрыски кромочных и заправочных отсеков. Сеточные части, имеющие сеточные столы или секции, оснащаются устройствами для измерения натяжения сетки, для натяжения и правки сетки.

Для обслуживания нижней ветви сетки устанавливаются спрыски высокого давления периодического или постоянного действия, моющие спрыски постоянного действия. Все сетководущие валы оснащены шаберами, а внутренние валы – шаберами с корытами.

Сеточные части также оснащаются отбойными спрысками для смыва брака в гауч-мешалку при обрывах и отбойными кромочными спрысками постоянного действия.

Для обезвоживания или для нанесения водяных знаков сеточные части с плоскими столами могут оснащаться ровнителями.

Для снижения анизотропии и улучшения просвета бумажного полотна сеточные части могут оснащаться механизмом тряски – однозональным, двухзональным или обеспечивающим тряску одного грудного вала. Фирмой «Фойт» разработана высокочастотная тряска, дающая возможность её использования при высоких скоростях работы машин.

Сеточные части любого типа оснащаются корытами, или сборниками для отводимой от полотна воды. Вода из сборников поступает в подсеточную ванну, расположенную под сеточной частью, если машина двухэтажная, или в рядом стоящий сборник в одноэтажных машинах. Чтобы предотвратить растекание суспензии после напуска, на плоских сеточных столах устанавливаются

форматные линейки, которые крепятся к фланцам боковых стенок напорного ящика.

Для удобства надевания синтетических сеток на современных машинах как двухэтажных, так и одноэтажных (при модернизации старых сеточных частей), используются консольные сеточные столы или агрегаты при сеточных частях двухсеточного формования. Модернизация сеточных столов одноэтажных машин сводится к установке S-образных балок, которые превращают старые разборные столы в консольные, тем самым значительно облегчая смену сетки.

Наряду с очень старыми разборными столами (которые в настоящее время в основном сносятся), на старых машинах имеют место выкатные столы, которые также доживают свой век и редко модернизируются.

Все консольные и выкатные столы для удобства надевания сетки имеют механизмы для опускания грудного вала, оснащаются тележками и скалками.

Стойки и балки сеточного стола (в отечественной промышленности) сварной конструкции изготавливаются из стали марки Ст3 и облицовываются нержавеющей сталью марок – 12Х18Н9Т или 08Х22Н6Т.

Сеточные части также оснащаются мостками обслуживания, изготовленными из нержавеющей стали и крепящимися к продольным балкам сеточного стола.

Согласно рекомендациям ЦНИИБУММАШ, для машин, вырабатывающих массовые виды продукции, приняты длины сеточных столов 13; 17; 19; 22; 24; 30 м.

Для современных машин, имеющих в сеточной части несколько столов или укомплектованных плоским сеточным столом и верхним формующим устройством, длины столов окончательно определяются после расчёта обезвоживания и конструкторской проработки.

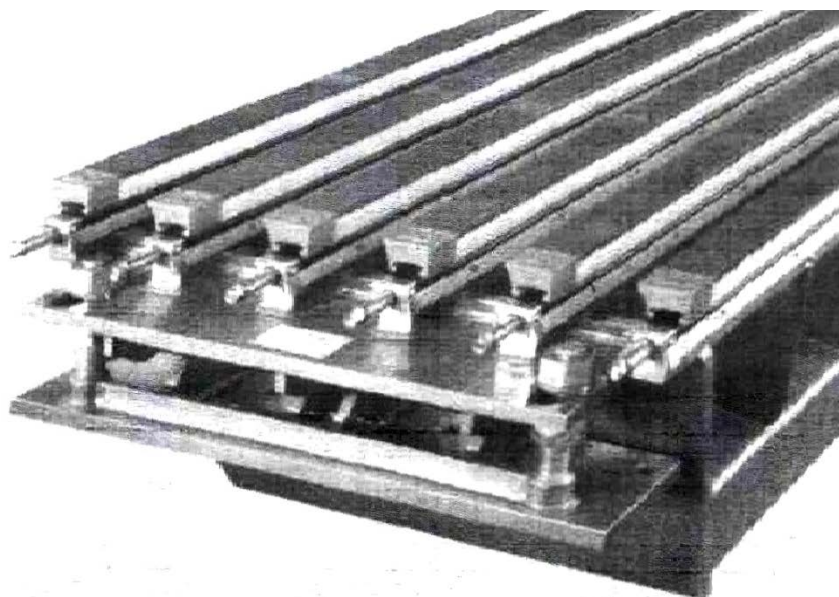


Рис. 34. Гидропланочный ящик с регулируемым углом наклона фирмы «Voith», Австрия



Рис. 35. Обезвоживающие элементы:

1 – формующий ящик; 2 – «мокрый» отсасывающий ящик; 3 – «сухой» отсасывающий ящик с двумя зонами отсоса; 4 – криволинейный отсасывающий «башмак»; 5 – «сухой» отсасывающий ящик с одной зоной отсоса

Обезвоживающие элементы и их количество с достаточной точностью при разработке проекта можно выбрать, исходя из предложенных на рис. 36 и в таблице 2 для массовых видов продукции.

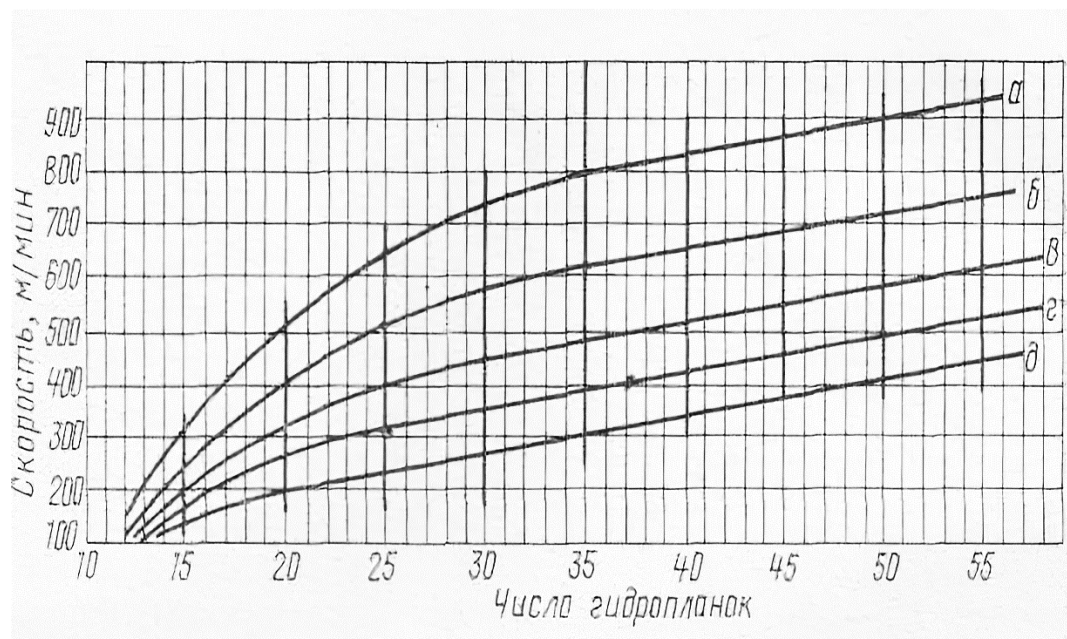


Рис. 36. Зависимости между скоростью машины и числом гидропланок:
 а – бумага газетная; б – бумага писчая, типографская № 3; в – бумага мешочная;
 г – бумага типографская писчая (№ 1 и № 2), бумага – основа для покрытий,
 бумага для гофрирования, картон; д – бумага тонкая, высокосортные виды
 бумаг

Таблица 2 – Количество обезвоживающих элементов

Основной вид бумаги	Рабочая скорость, м/мин	Длина сеточного стола, м	Форму- ющий ящик		Ящик гидропланок				Общее количество планок	Мокрые отсасы- вающие ящики		Отсасы- вающие ящики	
			количество, шт.	ширина, мм	ширина, мм	количество	количество	шаг, мм		ширина, мм	количество, шт	ширина, мм	количество, шт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1. Бумага газетная 51 г/м ² (ГОСТ 6445-74)	800	19	1	675	750	5	3	375	40	420	4	305	9

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2. Бумага писчая № 1 45-80 г/м ² (ГОСТ 18510-87)	500	22	1	675	750	7	4	250	52	420	4	305	9
3. Бумага писчая № 2 60-70 г/м ² (ГОСТ 18510-87)	700	22	1	675	1000	4	4	333	46	420	4	305	9
4. Бумага для гофрирования 100-150 г/м ² (ГОСТ 7377-85)	550	24	1	675	750	6	4	250	50	420	6	305	11
5. Бумага мешочная 70-105 г/м ² (ГОСТ 2228-81)	600	24	1	675	600	9	3	300	55	420	6	305	11
6. Бумага обёрточная односторонней гладкости 20-60 г/м ² (ГОСТ 8273-75)	450	13	1	675	1000	3	5	250	27	420	2	305	5
7. Картон тарный 125-400 г/м ² (ГОСТ 7933-89)	550	24	1	675	750	6	4	250	60	420	6	305	11
	400	17	1	675	400	7	3	200	41	420	4	305	11

На рис. 37 показан график зависимости шага гидропланок в начале сеточного стола в зависимости от скорости машины.

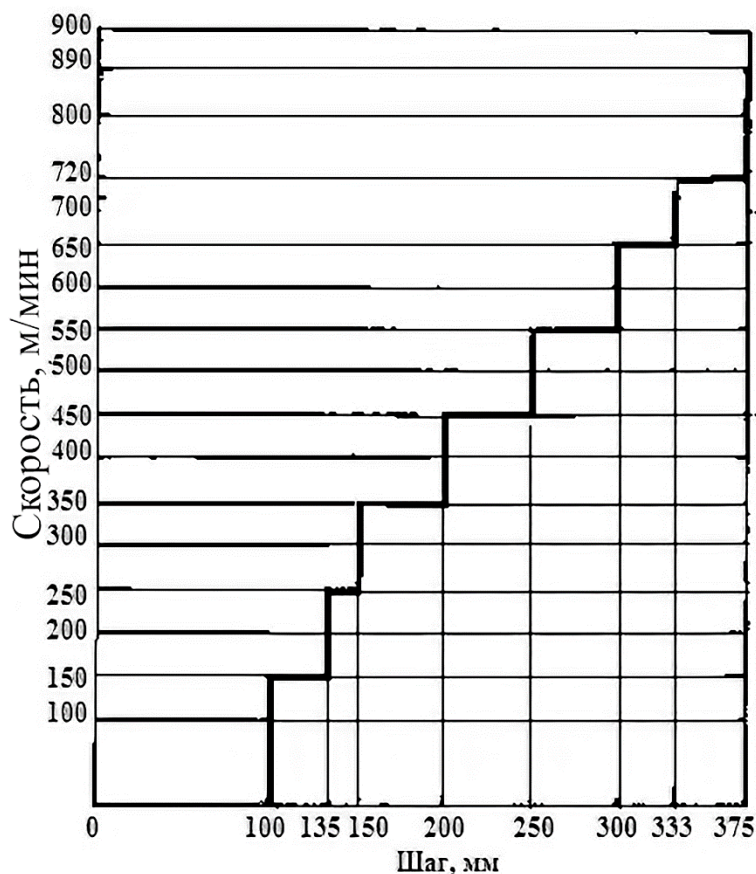


Рис. 37. График зависимости шага гидропланок от скорости машины

4.1. Сетки бумагоделательных и картоноделательных машин

Сетки должны обладать значительной водопроницаемостью, чтобы не задерживать обезвоживание волокнистой суспензии и в то же время обеспечить хорошее удержание волокна и наполнителя, не оставляя маркировки на формуемом полотне бумаги и картона, быть достаточно износостойкими, не требовать больших затрат мощности при скольжении по отсасывающим ящикам и другим обезвоживающими элементами, выдерживать необходимые условия натяжения.

Сетки отличаются своим плетением в зависимости от изготовления бумаги:

- одинарного простого плетения – для производства обёрточной и салфеточной бумаг, медицинского алигнина, бумаги основы для пергамента и фибры;
- одинарного полусаржевого плетения для выработки писчей газетной, картографической, типографской, кабельной и т. п.;

- трёхслойные – для конденсаторной, электролитической, конденсаторной и других тонких сортов бумаги, при выработке плоских слоёв тарного картона, газетной, книжно-журнальной и т. д.;

- кручёные – для кровельного картона, бумаги для гофрирования, товарной целлюлозы.

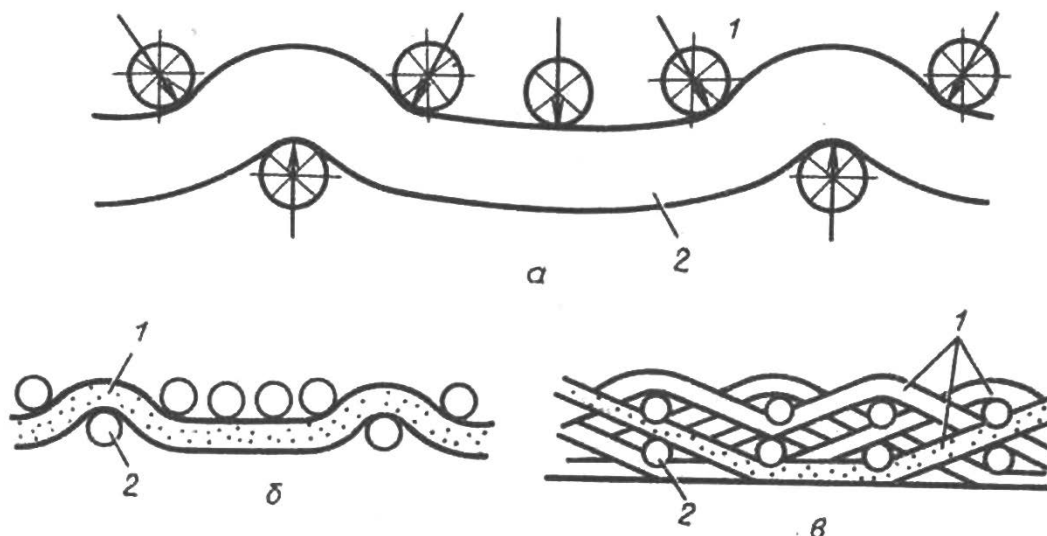


Рис. 38. Структура однослойных и двухслойных сеток различного плетения:
a – однослойная сетка саржа 3:1; *б* – однослойная сетка саржа 4:1;
в – двухслойная сетка саржа 5:1; 1 – нити основы; 2 – нити утка

Благодаря использованию трёхслойных синтетических сеток улучшается обезвоживание, качество формования, повысилась удержание волокна, гладкость и другие показатели качества.

Продольные нити сеток называются основой, а поперечные – утком.

Вид сетки, размеры нитей обуславливают рельеф поверхности и фильтрующую способность сеток. Поэтому в зависимости от числа нитей основы в 1 см по ширине, сетки имеют соответствующий номер равный этому числу.

Материалом для бронзовых сеток служит БрОФ 6,5-0,4 – для основы, полутомпак Л-80 – для утка, монельметалл марки НМЖМц 28 2,5 – 1,5, сталь 12Х18Н9Т.

Основным современным материалом для изготовления сеток служат полиэфирное волокно.

Полиэфирная нить устойчива в течение длительного периода времени к действию температуры 120 °С, при температуре 150 °С происходит незначительное уменьшение её прочности. Полиэфирные нити не токсичны. Основным преимуществом полиэфирных нитей является их высокая износостойкость, а главное, сравнительно малое удлинение.

В таблице 3 приведены показатели свойств пяти номеров полиэфирных нитей, изготавливаемых фирмой «Хехст», применяемых для производства сеток различного назначения в целлюлозно-бумажной промышленности.

Таблица 3 – Показатели свойств полиэфирных нитей, изготавливаемых фирмой «Хехст»

Показатель	Номер нити				
	1	2	3	4	5
Диаметр нити, мм	0,3–0,550	0,15–2,0	0,15–2,0	0,3–0,5	0,4–1,05
Разрывное училие, Н/мм ²	560–545	595–370	535–450	495–460	460–435
Удлинение при разрыве, %	(12–11,5)±1,5	(16,5–19,0)±2,0	(28,0–20,0)±3,0	(36,5–34,0)±3,0	(37,0–34,5)±4,0
Усадка при температуре кипения, %	(12,5–11,5)±1,0	(2,0–5,5)±1,5	(4,5–18,0)±2,0	(2,5–6,5)±1,5	(7,0–10,0)±2,0

При всех прочих равных условиях нити основы для синтетических сеток применяют те, которые обладают наибольшей прочностью на разрыв (см. табл. 3, нить номер 2), а для сеток формирующих цилиндров, обладающих наибольшей усадкой при температуре кипения воды (см. табл. 3, нить номер 1). Прочность одиночной сетки достигает 800 Н/см, прочность двухслойной сетки в зависимости от структуры 1250–2150 Н/см.

Для современных машин используют двухслойные и трёхслойные синтетические сетки. При этом нижний слой самый износостойкий, верхний имеет самый большой номер, так как используется для улучшения формования листа, средний слой обеспечивает прочность сетки при натяжении.

В результате гидравлических испытаний была установлена зависимость между потерями напора и скоростью фильтрации:

$$h_c = \xi_0 \cdot V^m,$$

где h_c – напор теряемый в сетке, м. вод. ст.;

V – скорость притока воды к сетке, м/с;

m, ξ – постоянные коэффициенты.

Между гидравлическими сопротивлениями и характеристиками сеток (номер – число нитей в 1 см по ширине сетки) существует сложная зависимость.

Ф. П. Товстолес установил основной геометрический параметр сетки:

$$T = \frac{n_1 \cdot n_2}{\varphi^2} \cdot 10^{-4},$$

где n_1 – число ниток основы в 1 см по ширине сетки;

n_2 – число ниток утка в 1 см по длине;

ϕ – коэффициент стеснения как отношение площади живого сечения к общей площади сетки.

При замене бронзовых сеток на синтетические потребляемая мощность сеточной части возрастает на 20–40 %, натяжение сеток достигает от 5 до 10 кН/м.

Вытяжка синтетических сеток может составлять 1–1,2 %.

Таблица 4 – Фильтрационные характеристики сеток

Сетки металлические	Номер сетки	Коэффициент ξ_0	Показатель степени m	Основной геометрический параметр T
Полусаржевое плетение	24	0,200	1,256	0,816
	26	0,240	1,460	0,956
	28	0,363	1,790	1,044
Крученные	8	0,138	1,720	0,075
	10	0,390	2,100	0,117
	11	0,390	2,100	0,171
	16	0,500	1,550	0,432
Тройные	24/72	0,690	1,430	2,685
	28/84	2,090	1,780	6,915
	30/90	1,480	1,550	5,384
	32/96	0,725	1,250	2,592
	34/202	1,900	1,560	5,321
	40/120	1,990	1,730	5,793
Одинарные простого плетения	12	0,0138	1,950	0,047
	16	0,195	1,930	0,104
	20	0,403	1,830	0,391
	24	0,537	1,710	0,775
	26	0,472	1,770	0,572
	28	0,504	1,720	0,678
	32	0,617	1,570	1,137
	36	0,565	1,650	0,922
	40	0,550	1,680	0,833

4.2. Гауч-вал

По конструкции гауч-валы могут быть ячейковые (на очень старых одноэтажных машинах), однокамерные (на старых машинах с одной зоной отсоса) и двухкамерные (с двумя зонами отсоса).

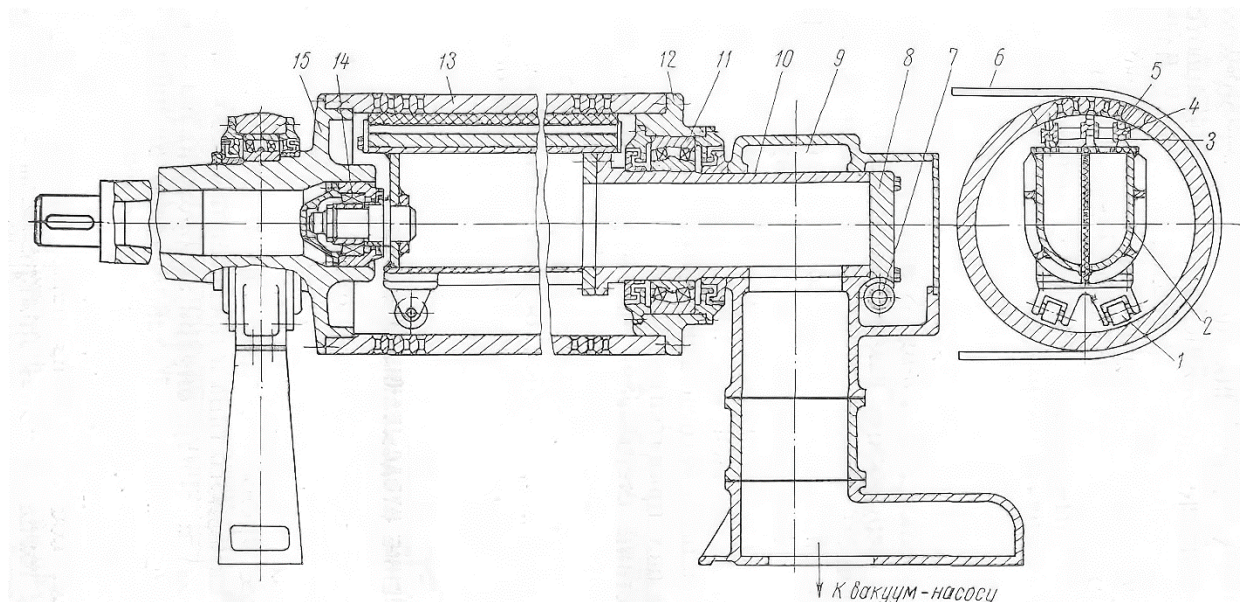


Рис. 39. Двухкамерный гауч-вал:

1 – обрешиненные ролики; 2 – вакуумная камера; 3 – резиновая пневмокамера для прижима уплотнений к рубашке; 4 – стальная рамка для установки уплотнений; 5 – графитовые уплотнения; 6 – сетка; 7 – червяк; 8 – сектор червячной пары; 9 – канал для удаления мокровоздушной смеси; 10 – полая цапфа; 11 – подшипник; 12 – крышка; 13 – перфорированная вращающаяся рубашка; 14 – подшипник, удерживающий отсасывающую камеру в приводной цапфе; 15 – приводная цапфа

Применение однокамерных и двухкамерных валов в основном зависит от наличия в конструкции сеточной части поворотного вала. При наличии в конструкции поворотного вала всегда используются двухкамерные валы, а при отсутствии – используются однокамерные валы. Однокамерные валы и ячейковые валы используются на очень старых машинах со скоростями до 160 м/мин, как правило, с ручной заправкой полотна бумаги или картона. У большинства современных гауч-валов перфорированные рубашки изготавливаются из нержавеющей стали путём центробежного литья (сталь 08Х12НДЛ). Не редко используются для изготовления трубы из нержавеющей стали. Бронзу можно встретить только на старых низкоскоростных машинах.

Многие зарубежные фирмы облицовывают перфорированные рубашки гауч-валов.

На современных БДМ и КДМ, как правило, подшипниковые опоры гауч-вала соединены с продольной балкой лицевой стороны сеточного стола и при смене сетки вывешивается вместе с консольной частью.

4.3. Шаберы валов бумагоделательных машин

Основные требования, предъявляемые к шаберам:

- обеспечение равномерности прилегания лезвия к поверхности вала при заданном линейном давлении;
- ограничение износа поверхности вала;
- износостойкость лезвия.

Шаберы валов и цилиндров БДМ и КДМ включают следующие основные детали и узлы: корпус, держатель, лезвие, устройство для подвода и отвода шабера, опоры и механизм возвратно-поступательного движения. Когда механизм подвода шабера выполнен с пневмоприводом, последний служит для регулирования давления шабера на вал.

Корпус шабера обеспечивает необходимую конструктивную прочность и жёсткость всего устройства. Обычно корпус сварной конструкции из стального проката. В сушильной части используют шабера с корпусом каплевидной формы в поперечном сечении.

В мокрой части машины шаберы облицованы коррозионностойким покрытием. По концам корпуса шабера установлены цапфы, которые закреплены в самоустанавливающихся опорах, обеспечивающих свободный поворот шабера и возвратно-поступательное перемещение.

Практически всегда соблюдается условие, чтобы сила тяжести шабера, приложенная в центре тяжести его поперечного сечения, образовывала момент относительно оси поворота шабера.

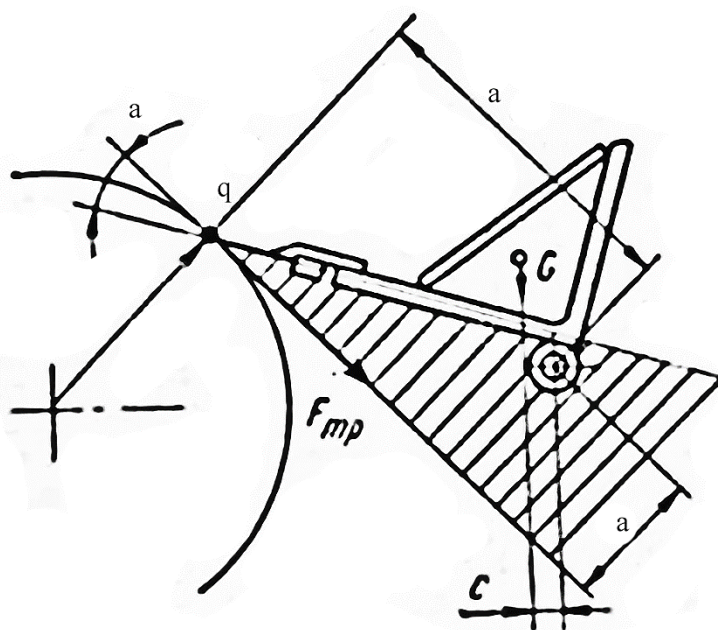


Рис. 40. Схема силового взаимодействия между шабером и валом

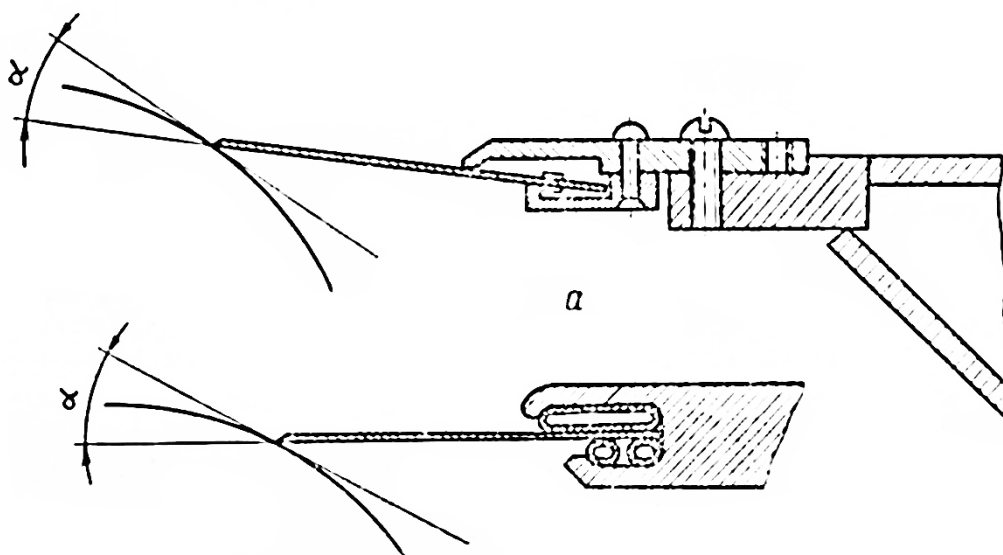


Рис. 41. Держатели лезвия шаберов:
a – держатель с жёсткими пластинами и регулировкой микрометрическими винтами; *б* – держатель с эластичными трубками

4.4. Краткая теория обезвоживания в сеточной части

Сеточная часть предназначена для формирования и обезвоживания мокрого бумажного или картонного полотна.

Волокна, составляющие основную долю в строении бумаги, имеют форму гибких подвижных нитей, легко увлекаемых даже незначительными по интенсивности потоками воды.

В зоне напускных устройств развиваются градиентные течения, приводящие к ориентации волокон вдоль сетки и к образованию слоистой структуры, сохранение которой обуславливает наиболее тесные контакты между волокнами и тем самым обеспечивает высокую прочность при отливе бумажного полотна.

При поступлении массы на сеточный стол из неё через сетку начинает удаляться вода. При этом на сетке задерживается слой осевших волокон с концентрацией, которую можно считать постоянной. Некоторое количество проходит сквозь сетку и слой осевших волокон вместе с удаляемой водой. Поэтому подсеточная вода называется регистровой и также является суспензией только более низкой концентрации.

Большая часть выделившихся пузырьков воздуха (из-за снижения давления при напуске) под действием сил поверхностного натяжения «прилипает» к волокнам и задерживается в осевшем слое (здесь влияние многофазности приведено по данным проф. Кокушина Н. Н.).

Плотность образующегося многофазного осадка в отсутствии давления фильтрации устанавливается в соответствии с принципом минимума поверхностной энергии на границе раздела фаз.

Сжимающее воздействие на осадок оказывают силы поверхностного натяжения воды. При постоянных характеристиках массы и содержания воздуха плотность образующегося осадка также будет величиной постоянной. По сравнению с обычной промышленной фильтрацией дополнительным фактором, влияющим на сжатие осадка, является поверхностное натяжение воды на границе раздела фаз.

Образующийся на сетке многофазный волокнистый осадок обладает определённой несущей способностью, т. е. он сопротивляется дополнительному сжатию за счёт перепада давления фильтрации, пока величина не превысит определённого критического значения.

При обезвоживании на плоском столе сеточной части БДМ и КДМ, стол можно условно разделить на две зоны: зону формования и отсасывающую зону. В зоне формования после напуска обезвоживание на формирующем ящике (грудной доске) начинается под действием гидростатического давления, на гидропланках под действием разрежения, возникающим между наклонной плоскостью гидропланки и движущейся сеткой с небольшим слоем повисшей под сеткой воды. Дальнейшее обезвоживание происходит от разрежения на «мокрых» отсасывающих ящиках и частично на «сухих» до окончания зоны формования. Если на формирующем ящике фильтрационный напор обеспечивается гидростатическим давлением от слоя волокнистой суспензии, то при разрежении фильтрационный напор возникает из-за разности атмосферного давления и давления в зоне разрежения на обезвоживающем элементе.

На представленной схеме (рис. 42) рассмотрен участок обезвоживания, где не учитывается конструкция обезвоживающего элемента. При инженерном расчёте обезвоживания на плоском сеточном столе приближённо пренебрегаем фильтрацией воды на свободных участках. При расчётах обезвоживания на сеточном столе определяется изменение высоты слоя суспензии после прохождения рассматриваемого участка обезвоживания.

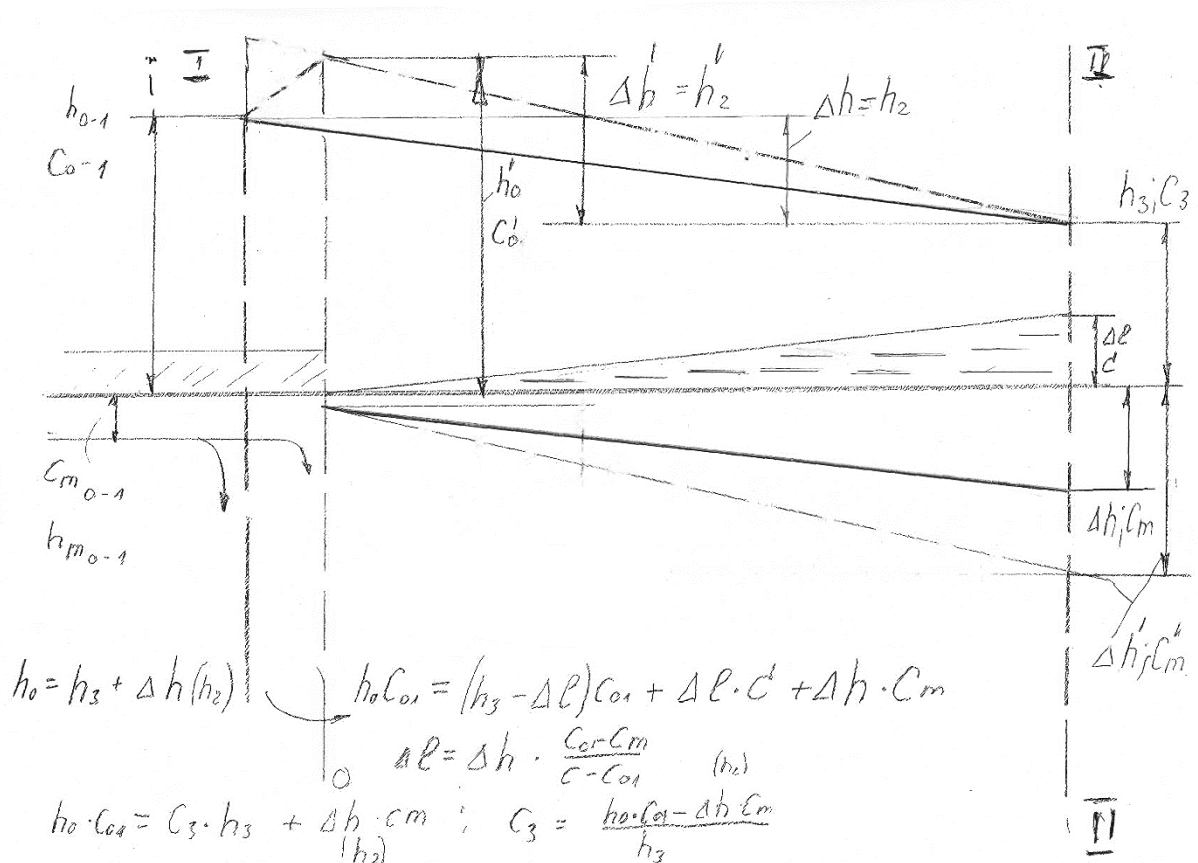


Рис. 42. Изменение высоты слоя суспензии

Общее уравнение баланса над сеткой запишется следующим образом:

$$h_0 \cdot c_0 = (h_3 - \Delta l) \cdot c_0 + \Delta l \cdot c + \Delta h \cdot c_m, \text{ м,}$$

где h_0 – высота слоя суспензии в начале участка обезвоживания, м;

c_0 – концентрация суспензии в начале участка обезвоживания, %;

h_3 – высота слоя суспензии в конце участка обезвоживания, м;

Δl (l) – величина слоя осевших волокон на участке обезвоживания, м;
(впоследствии эту величину будем обозначать – l), %;

c – концентрация слоя осевших волокон, %.

В дальнейшем для инженерных расчётов приближённо считаем, что для каждого ассортимента вырабатываемой продукции в пределах зоны формирования эту величину будем считать постоянной.

Δh (h_2) – высота слоя отведённой воды на участке обезвоживания, м;

c_m – концентрация регистровой воды, %.

В дальнейшем для инженерных расчётов приближённо считаем, что для каждого ассортимента вырабатываемой продукции в пределах зоны формирования эту величину будем считать постоянной.

Величину слоя осевших волокон можно определить из следующего выражения:

$$\Delta l = \Delta h \cdot \frac{c_0 - c_m}{c - c_0}, \text{ м.}$$

Преобразуя уравнение баланса с учётом значения величины слоя осевших волокон, получим:

$$h_0 \cdot c_0 = h_3 \cdot c_3 + \Delta h \cdot c_m, \text{ м.}$$

Так как окончательно необходимо определить концентрацию «сухость» волокнистой суспензии после рассматриваемого участка обезвоживания, то необходимо ещё одно выражение:

$$h_0 = h_3 + \Delta h,$$

откуда

$$h_3 = h_0 - \Delta h,$$

или

$$c_3 = \frac{h_0 \cdot c_0 - \Delta h \cdot c_m}{h_3}, \text{ \%}.$$

Внутри расчётных участков, где имеется слой волокнистой суспензии и слой осевших волокон, вводится понятие осреднённой концентрации C_0 . Эта концентрация средняя между слоем осевших волокон и остальной составляющей суспензии. Приблизённо в расчётах используется именно эта концентрация. Считается приближённо, что эта концентрация равномерно распределена по высоте слоя суспензии на данном участке обезвоживания.

При напуске на сетку осреднённая концентрация и концентрация суспензии совпадают.

Как уже говорилось выше, зона формирования заканчивается, когда высота слоя суспензии h_3 станет равной высоте слоя осевших волокон – Δh , а концентрация суспензии станет равной концентрации слоя осевших волокон – C .

Образующийся после обезвоживания слой осевших волокон является малосжимаемым осадком вследствие малых сил гидростатического давления.

Пренебрегая сопротивлением сетки, запишем уравнение Дарси при обезвоживании в формирующей зоне сеточного стола:

$$v_\phi = -k \cdot \frac{H}{l + \Delta l}, \text{ м/с.}$$

Формула Дарси позволяет связать скорость фильтрации с фильтрационным напором и слоем осевших и оседающих волокон.

H – фильтрационный напор, м. вод. ст.;

$l + \Delta l$ – высота слоя осевших и оседающих волокон, м;

k – коэффициент фильтрации, м/с.

В дальнейшем для инженерных расчётов приближённо считаем, что для каждого ассортимента вырабатываемой продукции в пределах зоны формирования эту величину будем считать постоянной. Коэффициент фильтрации характеризует способность волокнистой суспензии в зависимости от ассортимента вырабатываемой продукции, т. е. от композиции к обезвоживанию. Если принять числитель и знаменатель формулы за 1, то коэффициент фильтрации будет равен численно скорости фильтрации через сетку. Для определения высоты слоя воды удаляемого из суспензии на участке обезвоживания воспользуемся соотношением:

$$\Delta h = \int_0^t v_{\phi} \cdot dt,$$

где t – время, за которое суспензия обезвоживается на определённом участке,

или

$$v_{\phi} = -\frac{d(\Delta h)}{dt} = -k \frac{H(t)}{l \cdot \frac{c_0 - c_m}{c - c_0} \cdot \Delta h(t)} = -k \frac{h_1 - \Delta h + s}{l \cdot \frac{c_0 - c_m}{c - c_0} \cdot \Delta h}, \text{ м/с},$$

где s – величина разрежения, м. вод. ст.

Это дифференциальное уравнение должно интегрироваться в пределах:

при $t = 0$; $\Delta h = 0$;

при $t = t_1$; $\Delta h = h_2$;

t – время прохождения суспензией эффективной длины обезвоживания расчётного участка;

$$t = \frac{L}{v}, \text{ с},$$

где L – эффективная зона обезвоживания, м (ширина щелей в формирующем ящике);

v – скорость сеточной части БДМ или КДМ.

Так как $h_2 \ll s + h_0$, то решение дифференциального уравнения для определения h_2 приобретает вид:

$$h_2 = \frac{s+h_1}{s+h_1+l_1 \cdot \frac{c-c_0}{c_0-c_m}} \cdot \left\{ -l_1 \cdot \frac{c-c_0}{c_0-c_m} + \left[\left(l_1 \cdot \frac{c-c_0}{c_0-c_m} \right)^2 + \left(s+h_1 + l_1 \cdot \frac{c-c_0}{c_0-c_m} \right) \cdot \frac{2 \cdot k \cdot L}{v} \cdot \frac{c-c_0}{c_0-c_m} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}, \text{ м.}$$

Можно показать, что если n подряд расположенных участков длиной L_i с одинаковым разрежением, то при отсутствии размыва осевших волокон получим:

$$h_2 = \sum_{i=1}^n h_{2i},$$

где $L = \sum_{i=1}^n L_i$, m – эффективная длина обезвоживания равная сумме длин (например в формулирующем ящике суммарная эффективная длина обезвоживания равна суммарной ширине всех щелей).

Для расчётных участков, формулирующий ящик, открытая сетка при $l = 0$, $s = 0$, универсальная формула примет вид:

$$h_2 = \left(\frac{2 \cdot k \cdot L \cdot h_1}{v} \cdot \frac{c-c_0}{c_0-c_m} \right)^{\frac{1}{2}}, \text{ м.}$$

При наличии разрежения при незначительном слое осевших волокон, которым можно пренебречь ($l = 0$, $s \neq 0$) выражение для удаляемого слоя воды запишется следующим образом:

$$h_2 = \left[\frac{2 \cdot k \cdot L \cdot (s+h_1)}{v} \cdot \frac{c-c_0}{c_0-c_m} \right]^{\frac{1}{2}}, \text{ м.}$$

Этой формулой можно воспользоваться при определении обезвоживания на гидропланках и в начальной зоне обезвоживания при двухсеточном формовании.

Начиная с гидропланок с углом фойлирования 3° и «МОЯ», расчёт обезвоживания следует вести по универсальной формуле, где учитывается слой волокон, осевший на предыдущем участке обезвоживания.

Коэффициент перфорации в мокрых отсасывающих ящиках $50 \div 55 \%$.

Обезвоживание в отсасывающей зоне

Дальнейшее обезвоживание в сеточной части проходит на отсасывающих ящиках, где коэффициент перфорации составляет $30 \div 36 \%$. Максимальное разрежение в «сухих» отсасывающих ящиках может достигать 6 м. вод. ст. (60 кПа).

После достижения волокнистой суспензии состояния осевшего слоя волокон удаление воды происходит за счёт сжатия осевшего слоя под воздействием разрежения.

Процесс обезвоживания распадается на четыре стадии.

1-я стадия – происходит отжимание воды, деформация слоя происходит пропорционально количеству удалённой воды.

2-я стадия – наблюдается изменение толщины слоя, вода под сеткой сдувается воздухом и вытесняется из пор сжатого слоя суспензии. Нагрузка воспринимается как скелетом волокон, так и водой.

3-я стадия – прекращается фильтрация воды из пор сжатого слоя суспензии и продолжается фильтрация воздуха.

4-я стадия – происходит частичное обратное увлажнение, при котором благодаря упругой деформации волокнистой суспензии после снятия разрежения слой суспензии вбирает в себя ранее не сдутую под сеткой воду, и его толщина увеличивается.

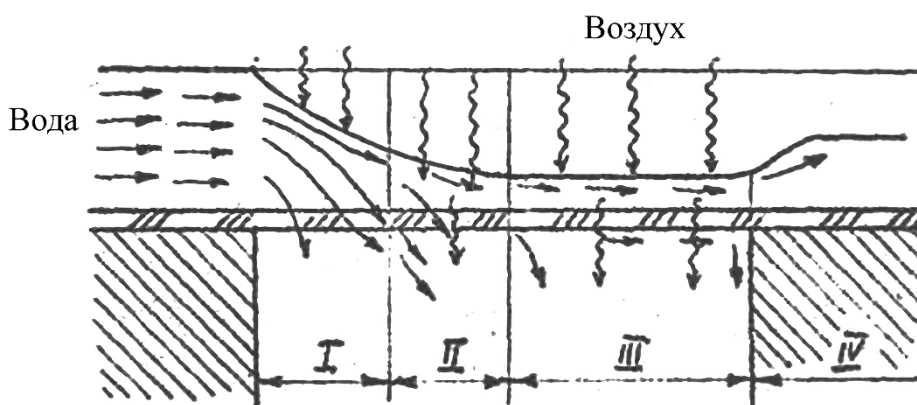


Рис. 43. Стадии обезвоживания в отсасывающей зоне

Процесс фильтрации воды и одновременного уплотнения волокон описывается уравнением Дарси–Герсиванова:

$$U - \xi \cdot v = -k \frac{\partial H}{\partial y}, \text{ м/с,}$$

где U – скорость жидкой фазы, м/с;

V – скорость твёрдой фазы, м/с;

ξ – коэффициент пористости.

Коэффициент пористости – это отношение объёма пор к объёму твёрдой фазы:

$$\xi = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{T}}},$$

$\frac{\partial H}{\partial y}$ – градиент, определяющий изменение фильтрационного напора по толщине слоя суспензии.

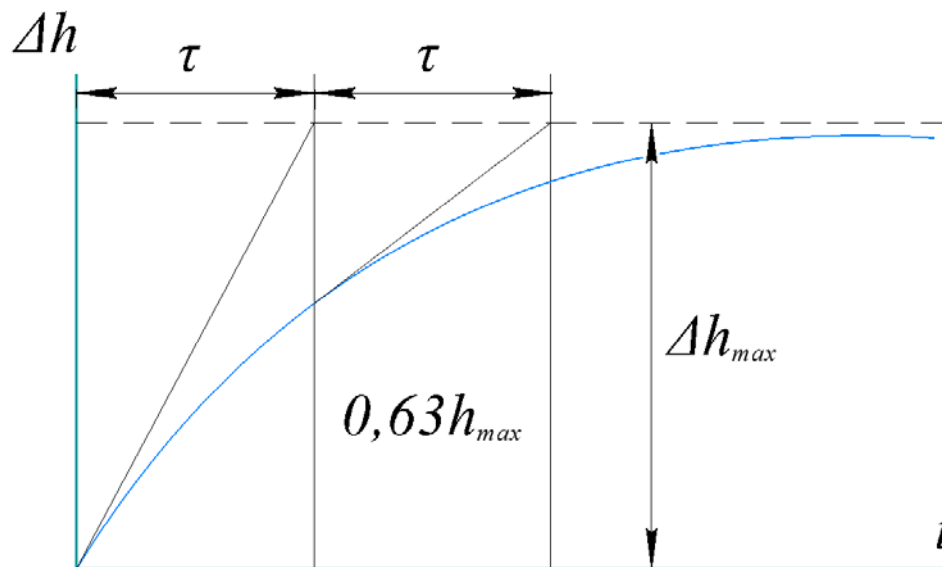


Рис. 44. График изменения толщины слоя удаленной воды от времени

Максимальный слой воды, удаляемый на участке обезвоживания в отсасывающей зоне, определяется из следующего выражения:

$$\Delta h = \frac{4 \cdot H_0 \cdot h \cdot \gamma \cdot a_{\text{ср.}}}{\pi^2 \cdot (1 + \xi_{\text{ср.}})}, \text{ м,}$$

где H_0 – действующий напор при стабилизации процесса обезвоживания, м;

h – толщина слоя в начале участка обезвоживания при отсутствии разрежения, когда H_0 равно 0, м;

$a_{\text{ср.}}$ – первая производная среднего значения коэффициента пористости по приложенному давлению.

$$a_{\text{ср.}} = \frac{d\xi_{\text{ср.}}}{dP}, \frac{1}{\frac{H}{\text{м}^2}}$$

График $\Delta h = f(t)$ показывает изменения толщины слоя удаляемой воды на единице площади во времени при переходе от первоначального состояния к конечному вследствие деформации под действием мгновенно приложенной постоянной нагрузки. Время этого переходного процесса $(3 \div 5)\tau$.

Методика расчёта заключается в определении длины зоны обезвоживания, необходимой для завершения 3-х стадий.

$$L = \{(3 \div 5) \cdot \tau - t\} \cdot v, \text{ м},$$

где v – скорость сетки, м/с;

τ – время протекания 1-й и 2-й стадий;

$$\tau = \frac{h_n^2 \cdot a_{\text{ср.}} \cdot \gamma}{\pi^2 \cdot k \cdot (1 + \xi_{\text{ср.}})}, \text{ с}$$

или постоянная времени обезвоживания;

h_n – толщина слоя суспензии перед отсасывающей зоной.

Время, необходимое на третью стадию обезвоживания, определяется из формулы:

$$t = \frac{h_n^2}{2 \cdot k \cdot H}, \text{ с.}$$

Окончательная длина зоны обезвоживания для завершения всех 3-х стадий определится из выражения:

$$L = (3 \div 5) \cdot v \cdot \tau \cdot \left[1 + \frac{1 + \xi_{\text{ср.}}}{a_{\text{ср.}}} \left(\frac{T_n}{T_k} \right)^2 \right], \text{ м},$$

где T_n, T_k – сухость полотна до и после зоны отсоса, %.

Количество отсасывающих ящиков можно определить по формуле:

$$n = \frac{L}{b_{\text{ящ.}} \cdot k_{\text{пер.}}},$$

где $b_{\text{ящ.}}$ – ширина «сухого» отсасывающего ящика, м;

$k_{\text{пер.}}$ – коэффициент перфорации, 30 ÷ 36 %.

Для обеспечения скорости фильтрации на всех отсасывающих ящиках изменение разрежения должно подчиняться зависимости:

$$H_i = H_{\text{max}} \cdot e^{-\chi(z-1)}, \text{ м вод. ст.},$$

где H_{max} – максимальное разрежение в последнем отсасывающем ящике, м. вод. ст.;

χ – постоянный коэффициент зависящий от ассортимента вырабатываемой продукции;

z – порядковый номер ящика.

5. ПРЕССОВАЯ ЧАСТЬ

К концу сеточной части в бумаге (картоне) удерживается значительный объём воды. Кроме воды, удерживаемой капиллярными силами, в бумажном (картонном) полотне присутствует большой объём свободной воды, которую не смогли удалить в сеточной части из-за недостаточного разрежения и из-за малого времени действия вакуума. В сеточной части машины происходит взаимное переплетение волокон, которое придает бумажному полотну достаточную прочность для переноса его с сетки в прессовую часть. Однако более значительную роль в обеспечении прочности полотна играют силы поверхностного натяжения воды, находящейся между волокнами. Для большинства видов бумаги и картона сухость после сеточной части составляет $18 \div 22$ %. Дальнейшее обезвоживание полотна, называемое прессованием, происходит в прессовой части машины. Во время прессования полотно уплотняется под действием внешней нагрузки. При этом удаляется в основном свободная вода, и в результате возрастания действия капиллярных сил происходит значительное увеличение числа контактов между волокнами. Как следствие, повышается прочность полотна, так как поверхностное натяжение препятствует увеличению поверхности раздела вода-воздух и обеспечивает прочную связь волокон друг с другом. Таким образом, основное назначение прессовой части состоит в обезвоживании полотна, обеспечении качественных показателей вырабатываемой продукции и надежности работы машины. При прессовании возрастают сухость, прочность и плотность бумаги (картона). Прессование играет важную роль при выработке многослойных видов бумаги и картона. От эффективности работы прессовой части зависят затраты на сушку бумаги и производительность машины. В целях сокращения расхода пара на сушку стремятся получить после прессовой части максимально возможную сухость. Однако повышение сухости за счёт увеличения давления между прессовыми валами приводит к увеличению затрат энергии на привод валов, что может и не компенсироваться снижением затрат на сушку. Кроме того, чрезмерное прессование приводит к ухудшению потребительских свойств вырабатываемой на машине продукции.



Рис. 45. Прессовая часть фирмы «Valmet», Финляндия

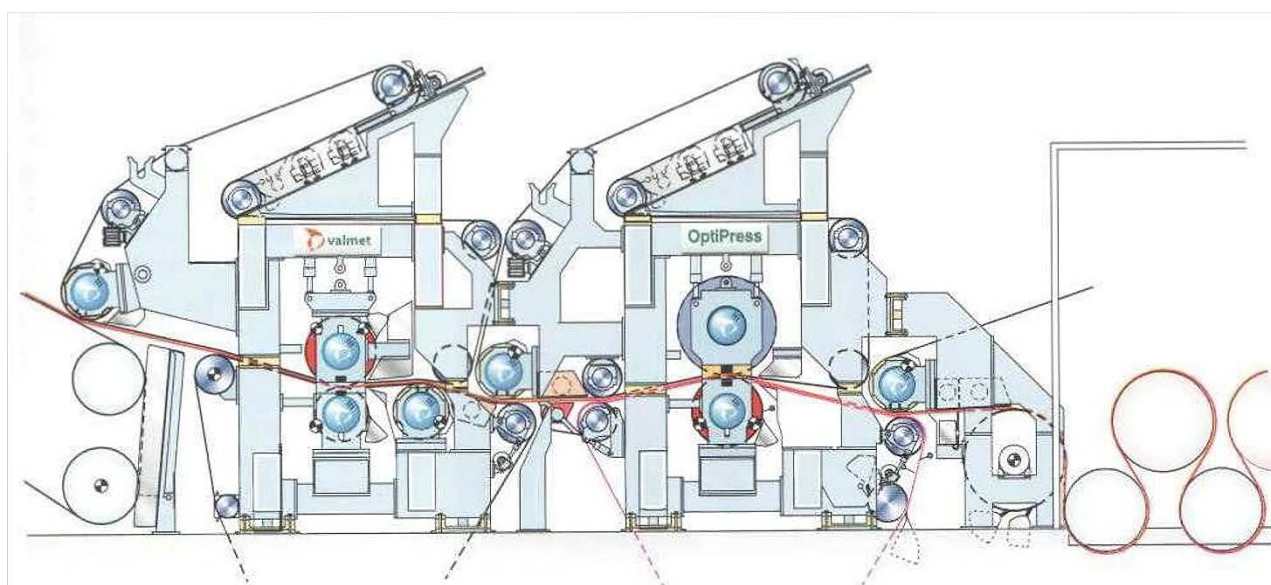


Рис. 46. Схема прессовой части фирмы «Valmet», Финляндия

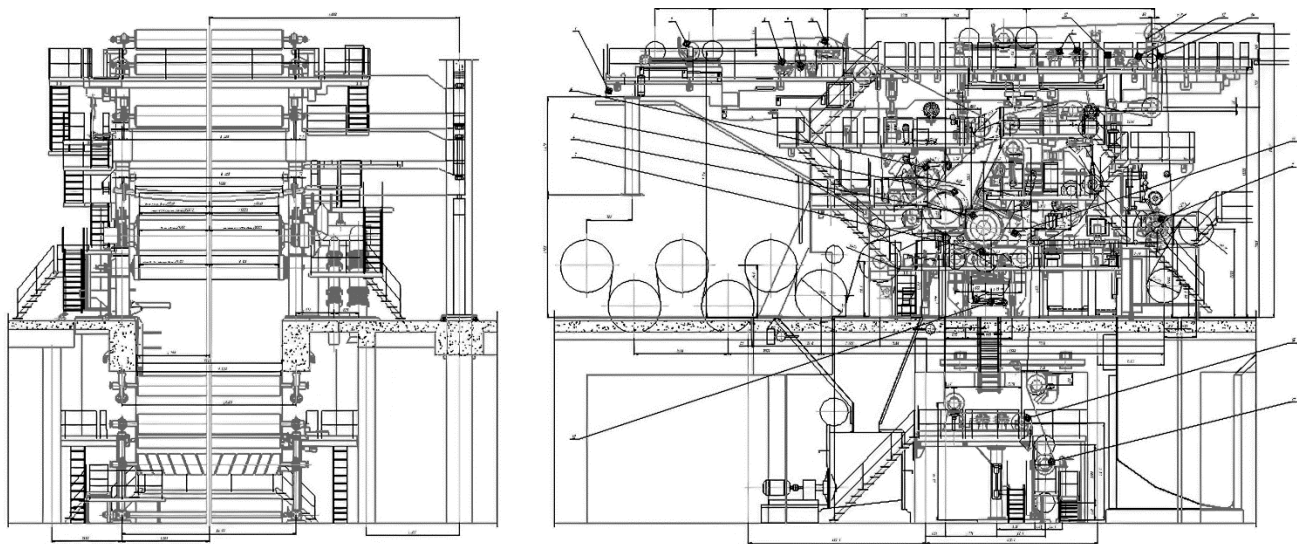


Рис. 47. Прессовая часть с валами «башмачного» типа Светогорского целлюлозно-бумажного комбината фирмы «Valmet», Финляндия

Прессовая часть включает: станины и стойки, поперечные и продольные балки, на которых шарнирно закреплены рычаги механизмов перемещения, на которых в свою очередь установлены прессовые валы. Неподвижные прессовые валы устанавливаются на кронштейнах, закреплённых к станинам прессовой части.

К станинам также крепятся устройства для обслуживания прессовых сукон, сукноправки, сукнонатяжки, сукноведущие валики, сукноразгонные валики, в том числе типа «Маунт-Хоуп», вакуумные сукномойки, спрыски, орошающие перед ними и спрыски высокого давления. Все установленные спрыски как правило осциллирующие. В прессовых частях высокоскоростных машин может устанавливаться сукносушильный пресс.

Большинство прессовых валов оснащено осциллирующими шаберами. В связи с применением тяжёлых иглопробивных сукон станины прессовой части стали изготавливаться консольного типа, причём концы поперечных консольных балок закрепляются стяжками к «якорям» (тяжёлым бетонным отливкам на первом этаже).

Все прессовые части оснащены системами подачи сжатого воздуха для пневматических механизмов перемещения (мембранные механизмы, пневмобаллоны), приводов осциллирующих спрысков и шаберов. Очищенный сжатый воздух поступает в систему автоматики.

Подача воды на спрыски осуществляется специальной системой трубопроводов.

Система подачи масла обеспечивает работу гидравлических механизмов перемещения прессовых валов (гидроцилиндров) и подачу масла в поршни башмаков валов башмачного типа пресса. При наличии прессовых валов башмачного типа масло перед подачей в башмаки подвергается специальной очистке.

Для обеспечения разрежения отсасывающие валы и вакуумные сукномойки связаны с вакуумной системой машины.

В основном все прессовые валы приводные. В некоторых случаях не приводятся гранитные и стонитовые валы прессовой части.

Прессовые валы также имеют несколько типов: обычные – с гладким покрытием, желобчатым покрытием, с глухосверлёнными отверстиями и отсасывающие валы с одной, с двумя или с тремя зонами отсоса.

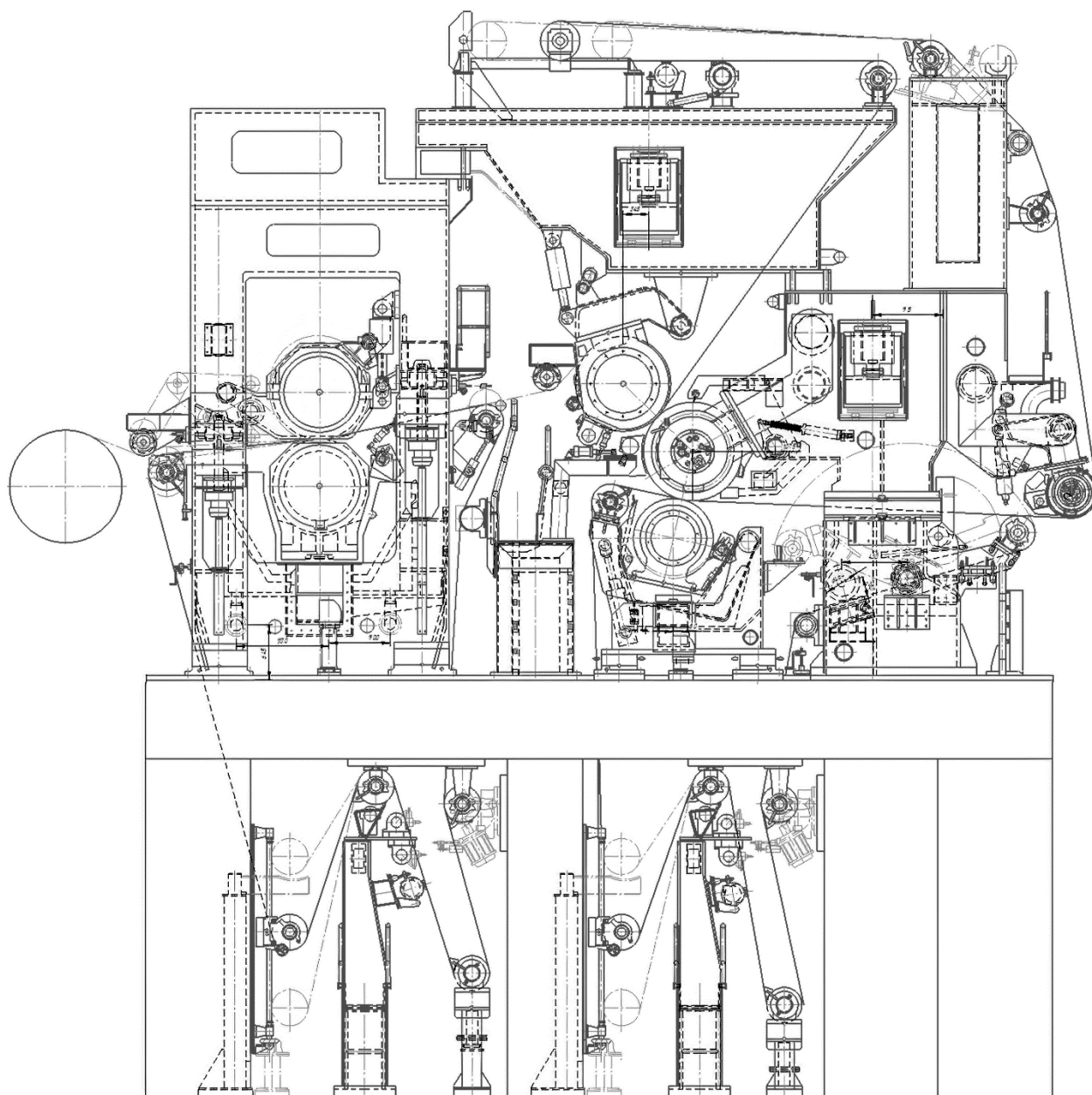


Рис. 48. Прессовая часть с валами обычной конструкции, Сыктывкарский ЦБК

В картоноделательных машинах нашли применение валы большого диаметра с удлинённой зоной прессования и системой охлаждения внутренней поверхности рубашек валов.

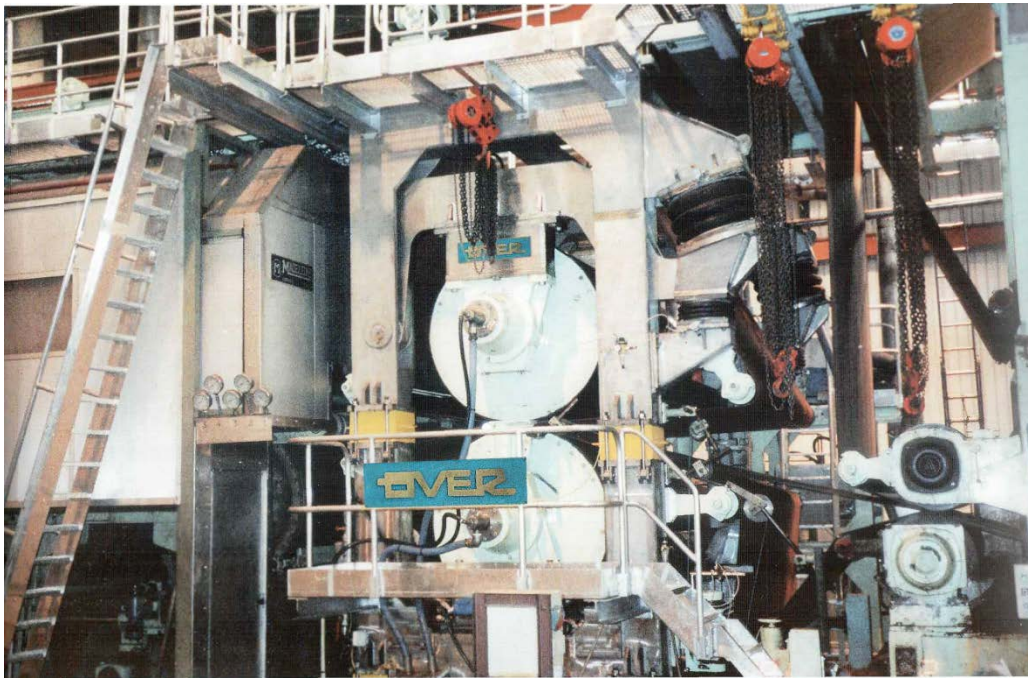


Рис. 49. Пресс с валами большого диаметра фирмы «Over», Италия

Такие прессы могут работать отдельно или в паре с комбинированным (многовальным) прессом.

В быстроходных машинах для выработки продукции массового ассортимента используются валы башмачного типа. Современные валы «башмачного» типа могут иметь гибкую рубашку или металлическую и работать друг с другом или в паре с обычными и отсасывающими валами. Большинство прессовых частей оснащены гранитными валами (кроме машин, имеющих скорость свыше 1000 м/мин и паровой ящик).

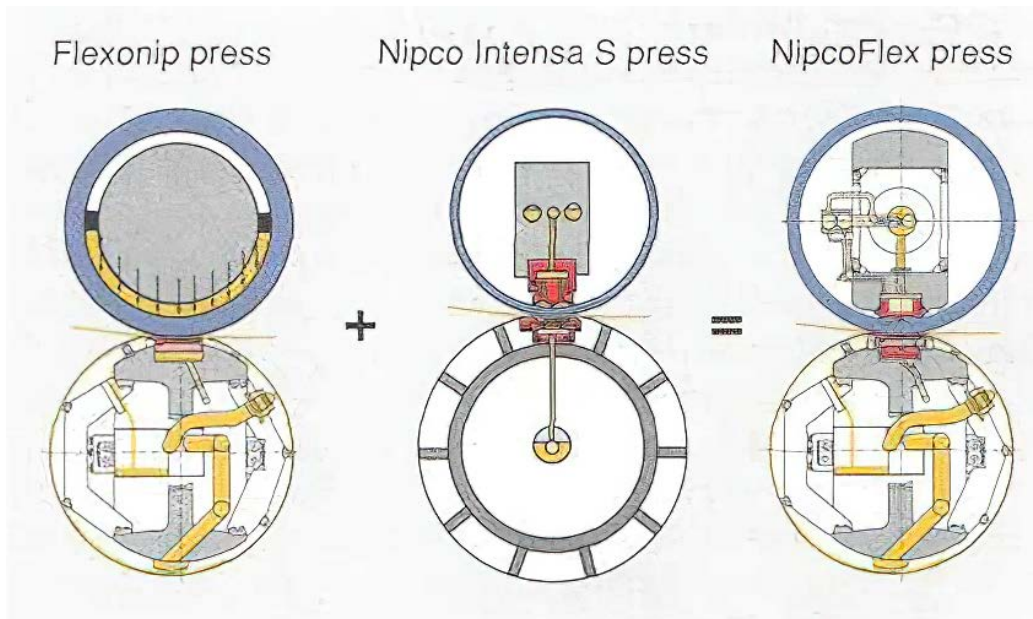


Рис. 50. Схема развития прессов с валами башмачного типа, фирма «Voith», Австрия

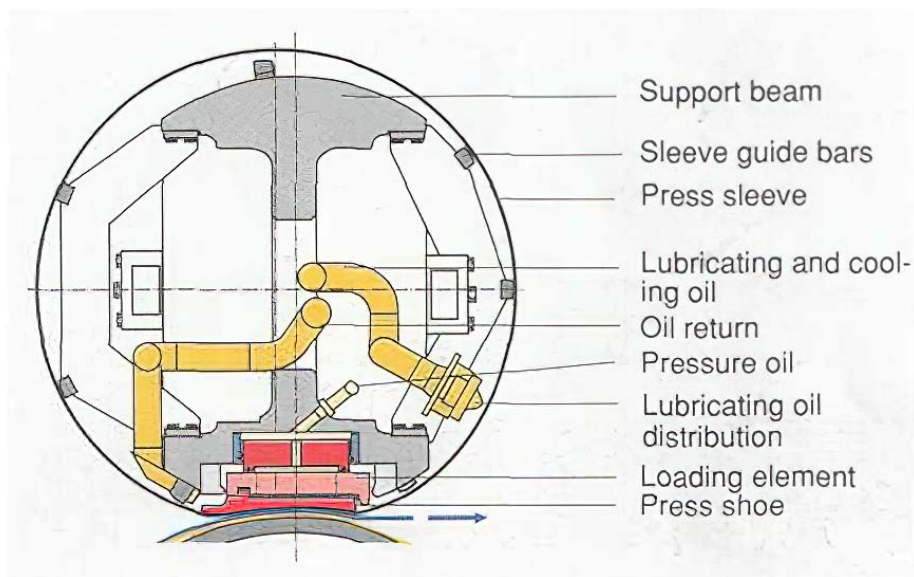


Рис. 51. Прессовый вал с гибкой рубашкой

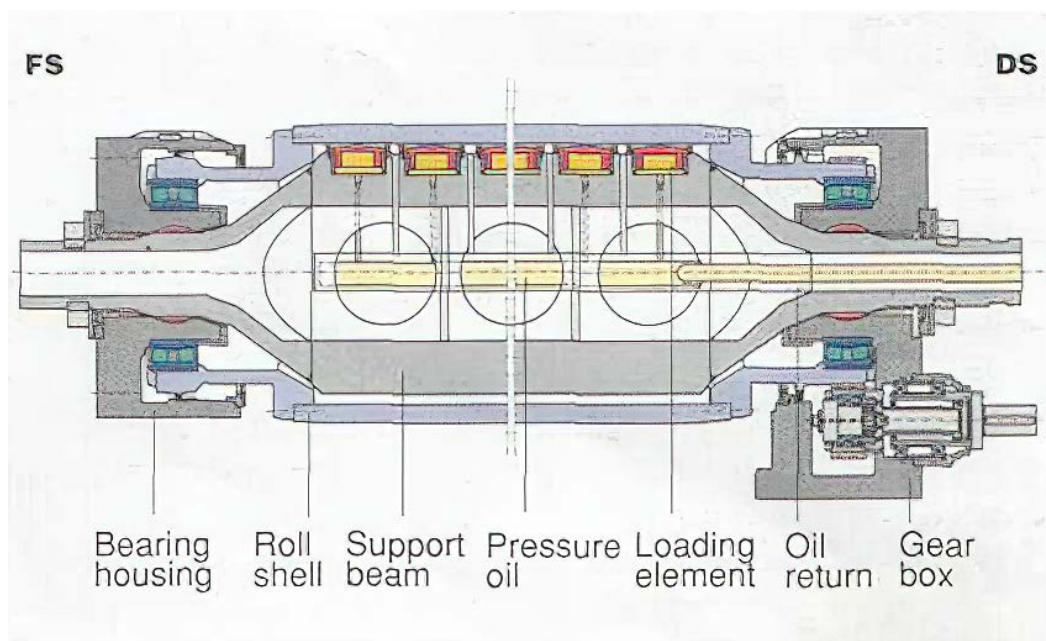


Рис. 52. Схема распределения башмаков вдоль вала пресса

Гранитный вал непосредственно может соприкасаться с бумагой при прессовании, и бумага из-за определённой структуры гранита никогда не прилипает к поверхности гранитной рубашки вала. Аналогично используется станитовые валы и самые современные валы с керамическим покрытием или с покрытием из полиуретана с керамическим наполнителем.

В основном современные прессовые части оснащены вакуум-пересасывающими валами с одной или двумя зонами отсоса (типа «Пикап»).

В некоторых конструкциях пересасывающий вал в сочетании с одним или двумя прессовыми валами образуют так называемый «Uni» пресс. Из-за сложности эксплуатации подобные конструкции практически мало применяются в новых машинах. Для смены валов прессовые части оснащены подъёмными механизмами «кошками», которые иногда выполняются подвижными и крепятся к верхней продольной балке станин.

Значительно отличаются прессовые части машин для выработки санитарно-гигиенических видов бумаг.

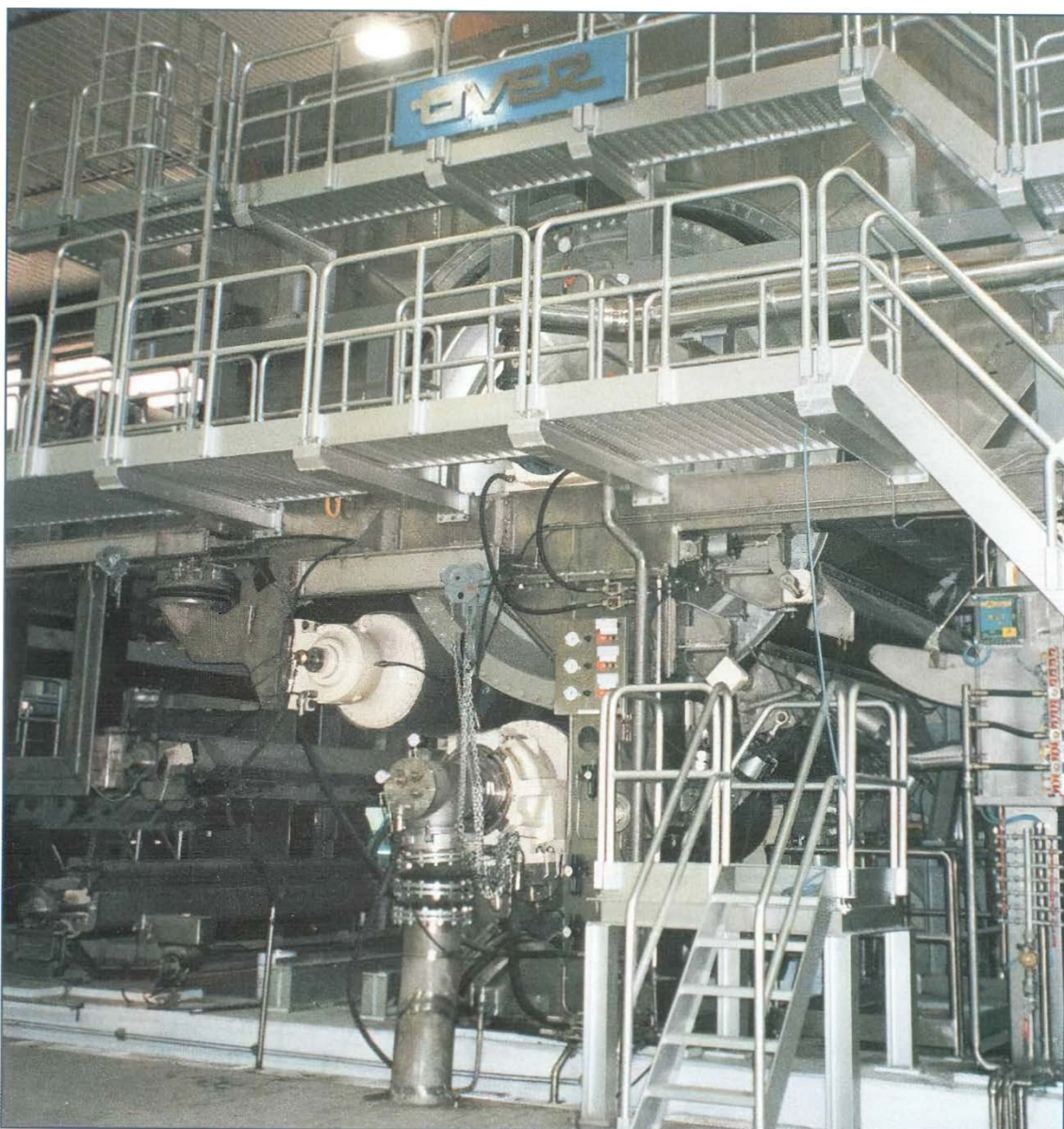


Рис. 53. Пресс для выработки санитарно-гигиенических бумаг фирмы «Over», Италия

Прессование в таких машинах осуществляется за счёт прижима бумажного полотна прессовыми валами через сукно к сушильному цилиндру большого диаметра (янки-цилиндру). В зависимости от скорости машины количество прессовых валов может колебаться от одного до двух. Двумя прессовыми валами оснащаются машины со скоростью, превышающей 2000 м/мин. Покрытия прессовых валов состоит из температуростойких материалов. По конструкции валы могут быть обычного типа и башмачные.

Перемещение башмака относительно машинного направления в прессе TissueFlex™

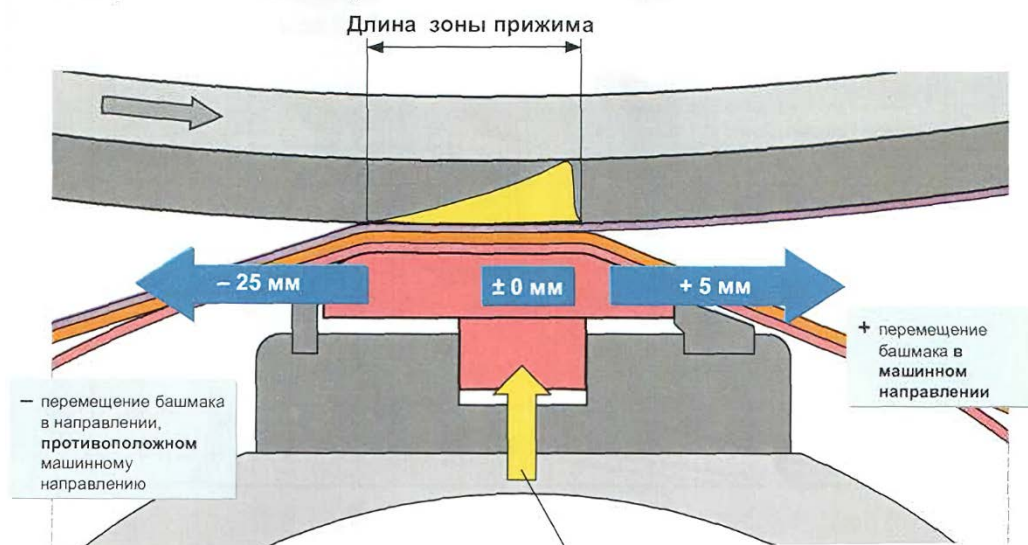


Рис. 54. Современная конструкция прессового вала для выработки санитарно-гигиенических бумаг фирмы «Andritz», Австрия

Прессовые части также оснащаются мостками обслуживания, изготовленными из нержавеющей стали и крепящимися к станинам.

5.1. Классификация прессов бумаго- и картоноделательных машин

Прессовая часть машины состоит обычно из нескольких прессов, через которые последовательно проходит полотно. Прессы можно классифицировать по различным признакам. Так, по конструкции прессы разделяют на два типа: валковые прессы, в которых обезвоживание бумажного полотна происходит в зоне контакта прижимаемых друг к другу вращающихся валов и башмачные прессы, в которых зона прессования образуется в результате прижима к вращающемуся прессовому валу стационарного элемента «башмака».

В зависимости от количества прессовых валов валковые прессы бывают двухвальными и многовальными (комбинированными). В зависимости от преимущественного направления потока воды в сукне двухвальные прессы можно разделить на прессы с продольной фильтрацией воды и прессы с поперечной фильтрацией воды. В прессах с продольной фильтрацией воды выжимаемая из бумажного полотна в сукно вода течёт в сукне в основном в машинном направлении по ходу или против хода сукна. Такие прессы, как правило, имеют два гладких вала и называются обычными простыми прессами. В прессах второго типа один из прессовых валов имеет отверстия или канавки, в которые из сукна в зоне прессования поступает вода, поэтому в таких прессах

вода в сукне движется в основном в направлении от поверхности бумажного полотна к отверстиям или канавкам на поверхности вала, охватываемого сукном, или, как говорят, в z-направлении. Благодаря более короткому пути фильтрации воды в сукне в прессах этого типа гидравлическое сопротивление потоку воды, вытесняемому из бумажного полотна, оказывается значительно более низким, чем в прессах первого типа, что позволяет при прочих равных условиях удалить из полотна больший объём воды. К прессам с поперечной фильтрацией воды относятся прессы, имеющие отсасывающие, желобчатые, валы с глухосверлёнными отверстиями и прессы с удлиненной зоной прессования. Обычные простые прессы применяют в основном на тихоходных машинах.

5.2. Шабера прессовой части

В процессе работы на поверхности прессовых валов откладываются частицы волокон, наполнителя и т. д. Если их своевременно не удалять, то качество вырабатываемой бумаги будет ухудшаться, а количество обрывов бумажного полотна увеличиваться. Для очистки поверхности вала, а также для предотвращения наматывания бумажного полотна на вал при обрывах и заправке устанавливают шабера. Шабер (рис. 55) состоит из лезвия 1, держателя лезвия 2 и балки 3, на которой устанавливается держатель. Современные шабера оснащают механизмом прижима лезвия к поверхности вала и устройством для продольного возвратно-поступательного перемещения (осцилляции) шабера. Механизмы осцилляции имеют пневматический, гидравлический или механический привод.

Лезвия шаберов представляют собой ленты шириной от 30 до 300 мм и толщиной от 0,5 до 15 мм в зависимости от материала, из которого они выполняются. Для изготовления лезвий используют сталь, полимерные материалы, бронзу. Материал лезвий должен быть прочным, износостойким, обладать высокой упругостью, необходимой для плотного прилегания лезвия шабера к поверхности вала. При этом лезвия не должны повреждать очищаемую поверхность вала.

Эффективность работы шабера зависит от правильного выбора угла между лезвием шабера и касательной к поверхности вала в месте установки, а также от усилия прижима лезвия к поверхности вала, а угол установки лезвия от конструкции шабера, материала покрытия вала и типа вала (гладкий, желобчатый, отсасывающий, глухосверлённый) и колеблется в пределах $15 \div 30^\circ$. Усилие прижима лезвия изменяется в широких пределах. Так, например, для желобчатых валов с полиуретановым покрытием линейное усилие прижима составляет $40 \div 80$ Н/м, а для гранитных валов – $220 \div 350$ Н/м.

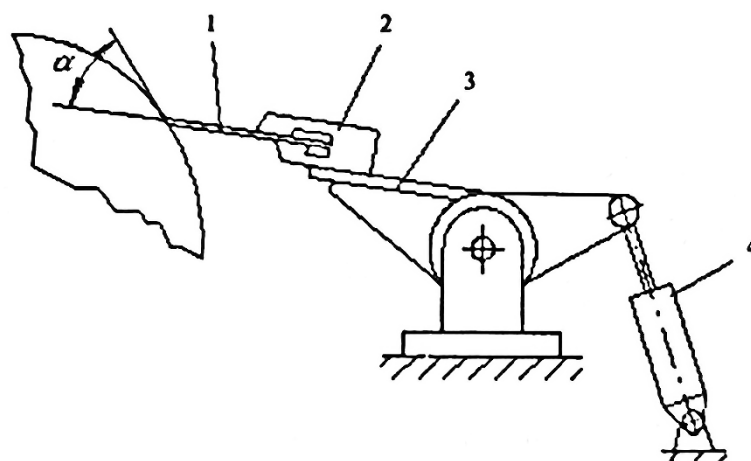


Рис. 55. Шабер:

1 – лезвие; 2 – держатель; 3 – балка; 4 – механизм прижима шабера

5.3. Обезвоживание бумаги в прессовой части

По направлению фильтрации воды в сукне все существующие прессы разделены на два типа: прессы с продольной фильтрацией и прессы с поперечной фильтрацией.

Характер процессов, происходящих при прессовании, зависит от положения бумажного полотна в зоне прессования. При прессовании с поперечной фильтрацией воды в настоящее время принято делить зоны прессования на шесть участков (фаз) (рис. 56).

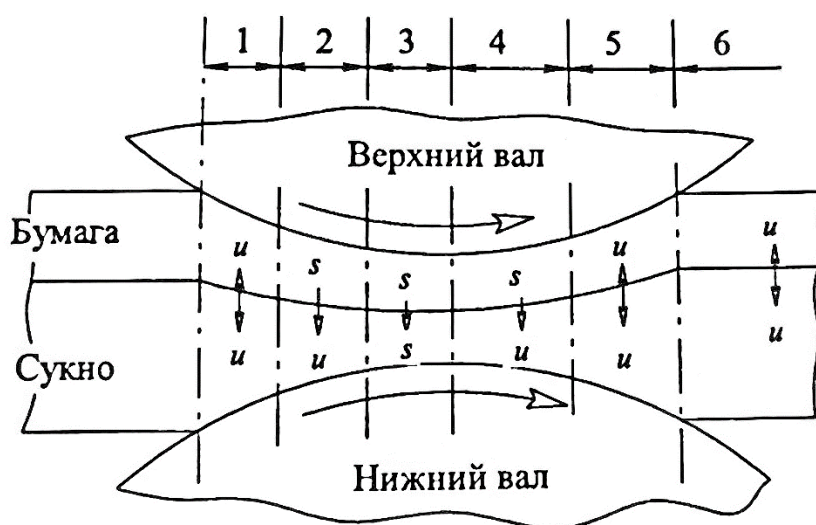


Рис. 56. Шестифазная модель зоны прессования:

u – ненасыщенный водой материал; *s* – водонасыщенный материал

Фаза 1. Она начинается с момента приложения внешней нагрузки. Бумажное полотно и прессовое сукно неводонасыщенны. Фаза заканчивается, когда или полотно, или сукно становится водонасыщенным. Перенос воды из бумаги в сукно или наоборот обусловлен впитыванием поверхностной пленочной воды, находящейся на соприкасающихся поверхностях бумаги и сукна. Некоторую роль в этом играют капиллярные эффекты. Причем направление потока зависит от множества факторов, например, от размеров пор соприкасающихся слоёв бумаги и сукна, поверхностного натяжения и т. д. Какой поверхностный слой – бумаги или сукна станет первым водонасыщенным, зависит от их начальной влажности, сжимаемости, капиллярного строения соприкасающихся слоев бумаги и сукна.

Фаза 2. Она начинается с момента насыщения бумажного полотна или сукна водой и заканчивается, когда оба материала становятся водонасыщенными. Если в первой фазе поверхностный слой сукна, соприкасающийся с бумажным полотном, становится водонасыщенным раньше бумаги, то имеет место поток воды из сукна в бумагу, если поверхностный слой бумаги, то наоборот. По мнению многих исследователей, факторами, определяющими течение воды, являются поверхностная адсорбция и капиллярные явления.

Фаза 3. Она начинается с момента насыщения обоих материалов водой и заканчивается, когда внешняя нагрузка достигает максимума.

Фаза 4. Она начинается с момента достижения внешней нагрузкой максимума и заканчивается, когда давление в порах на нижней поверхности бумажного полотна, соприкасающейся с прессовым сукном, становится отрицательным.

Фаза 5. Она начинается с момента восстановления бумажного полотна и заканчивается в момент снятия внешней нагрузки, т. е. в момент выхода бумажного полотна и прессового сукна из зоны прессования.

Фаза 6. Она начинается с момента выхода бумажного полотна и прессового сукна из зоны прессования и заканчивается в момент отделения бумажного полотна от прессового сукна.

В прессах с продольной фильтрацией вода проходит путь равный половине зоны контакта прессовых валов и движется вдоль нитей основы сукна против хода сукна.

В прессах с поперечным потоком вода проходит значительно меньшее расстояние – $5 \div 9$ мм. На прессах, отсасывающих и с глухими отверстиями, расстояние составляет $1,5 \div 2,5$ мм – расстояние практически равное толщине сукна.

На двухвальных прессах с гладкими валами верхний вал пресса смещён в противоположную сторону по ходу машины на 150–200 мм.

При наличии нижнего отсасывающего вала, верхний вал (гранитный) смещается по ходу бумаги относительно нижнего на 50–200 мм.

На обычных прессах линейное давление между валами может достигать $60 \div 130$ кН/м. При использовании более высоких давлений используются и более твёрдые покрытия.

5.4. Основные факторы, определяющие эффективность прессования

При проектировании прессовой части основные факторы, определяющие эффективность прессования, можно разделить на две группы: конструктивные и технологические. Конструктивные факторы зависят от параметров, определяющих конструкцию пресса, а технологические – от особенностей технологического процесса, композиции волокнистой суспензии и требований, предъявляемых к вырабатываемой продукции.

К конструктивным факторам относятся:

- тип пресса (валковый или башмачный);
- диаметр прессовых валов;
- механические свойства покрытий прессовых валов;
- конструкция прессовых валов (отсасывающие, желобчатые, валы с глухими отверстиями, гладкие);
- конструкция прессового сукна и его «сухость» перед прессом;
- количество прессовых сукон (одно или больше).

К технологическим факторам относятся:

- композиция бумажного или картонного полотна и технология подготовки волокнистой суспензии, которые определяют так называемые фильтрационно-компрессионные свойства;
- скорость машины;
- линейное давление в зоне прессования;
- начальная сухость бумажного или картонного полотна;
- масса 1 м² бумажного или картонного полотна;
- температура бумажного или картонного полотна.

Влияние конструктивных факторов на обезвоживающую способность пресса сводится в основном к изменению продолжительности прессования и распределения давления по ширине зоны прессования при прочих равных условиях. Так, например, высокая сухость бумажного или картонного полотна после прессов башмачного типа с удлиненной зоной прессования обусловлена не только значительным увеличением продолжительности прессования, но и возможностью регулирования распределения давления по ширине зоны прессования. Увеличение диаметра валов и снижение скорости машины также приводит к повышению продолжительности прессования. Однако в данном случае необходимо учитывать отрицательное влияние обратного впитывания на сухость после пресса.

При работе с современными сукнами конструкция вала оказывает меньшее влияние на достигаемую сухость при прочих равных параметрах (диаметр валов, твердость покрытия и т. д.), чем при работе с шерстяными сукнами. Выбор конструкции вала определяется в основном местом пресса в прессовой части и видом вырабатываемой продукции. Так, например, для валов с глухими

отверстиями можно применять более мягкие покрытия, чем для желобчатых валов, что увеличивает ширину зоны прессования. Поэтому эти валы целесообразно использовать при прессовании с контролируемым потоком. Кроме того, при одинаковой твердости покрытия для пресса с глухосверлённым валом можно увеличить усилие прижима без опасности захлопывания отверстий. Однако стоимость глухосверлённого вала значительно выше стоимости желобчатого.

Установка дополнительных сукон аналогична эффекту уменьшения массы 1 м^2 бумажного или картонного полотна и, следовательно, при одинаковых прочих условиях позволяет повысить сухость полотна после прессования. В то же время при выработке видов бумаги с малой массой 1 м^2 и при работе на низких скоростях установка дополнительно сукна может привести к падению сухости после пресса из-за обратного впитывания.

Наиболее важным технологическим фактором является композиция волокнистой суспензии и история её подготовки. Известно, что способность к обезвоживанию зависит от степени помола волокнистой суспензии. В то же время установлено, что виды бумаги и картона, изготавливаемые из разной суспензии одной и той же степени помола, обезвоживаются по-разному. Поэтому более важной характеристикой, определяющей способность бумажного или картонного полотна отдавать воду при прессовании, является коэффициент водоудержания.

Для определения этого коэффициента используют различные методы. Одним из наиболее известных является метод центробежного обезвоживания. Коэффициент водоудержания WRV определяется как отношение массы воды, оставшейся в материале после его обезвоживания, к массе сухого волокна. Используя этот коэффициент, можно найти значение предельной сухости C_L , которую достигают при прессовании данного материала:

$$C_L = \frac{100}{1 + WRV}, \%$$

На величину предельной сухости наибольшее влияние оказывает вид целлюлозы, степень её помола и выход.

5.5. Определение сухости бумажного, картонного полотна после каждой зоны прессования

$$C_k = \frac{A \alpha_0 m_0 \rho_{\text{ср.}}^\gamma C_c^\theta C_H^\omega g_6^\beta}{V \varepsilon \text{ШР}^\psi}, \%$$

где C_k – сухость бумаги после зоны прессования, %;

A – коэффициент характеризующий конструкцию пресса;

α_0 – коэффициент, учитывающий вид бумаги;
 m_0 – коэффициент, зависящий от марки сукна, веса бумаги и скорости машины;
 $p_{cp.}$ – среднее удельное давление между валами, кг/см²;
 C_n – сухость бумаги перед прессом, %;
 C_c – сухость сукна перед прессом, %;
 g_b – масса бумаги или картона, г/м²;
 β – коэффициент, учитывающий вес бумаги;
 V – скорость машины, м/мин;
 ШР° – градус помола массы;
 $\gamma, \theta, \omega, \varepsilon, \psi$ – опытные коэффициенты.

Среднее удельное давление определяется из выражения:

$$P_{cp.} = q/a, \text{ кг/см}^2,$$

где q – линейное давление, кг/см (кН/м);
 a – ширина площадки контакта, см.

$$a = 0,46D^{0,4}(k_t T)^{0,275}k_\sigma, \text{ мм},$$

где D – диаметр нижнего вала прессы, мм;
 k_t – температурный коэффициент;
 k_σ – коэффициент уменьшения толщины облицовки;
 T – показатель твердости в единицах ТШМ при температуре 20 °С.

5.6. Прессовые сукна

На производительность бумаго- или картоноделательной машины, себестоимость и качество вырабатываемой продукции существенное влияние оказывает правильный выбор одежды машины, в частности прессовых сукон. Выбор того или иного сукна в основном определяется типом прессы и его местом в прессовой части, композицией волокнистой суспензии, требованиями к готовой продукции. Для удовлетворения различным условиям работы фирмы-производители прессовых сукон постоянно совершенствуют их конструкции. К прессовому сукну предъявляются следующие требования:

- высокая проницаемость, обеспечивающая низкое сопротивление течению воды в сукне;
- большой объём порового пространства, обеспечивающий способность сукна переносить значительное количество воды;
- низкая сжимаемость, обеспечивающая сохранение достаточной проницаемости и порового объёма даже в середине зоны прессования;

- равномерность распределения давления, передаваемого на бумагу;
- стабильность в процессе работы и равномерность свойств по ширине сукна;
- обезвоживание и кондиционирование прессового сукна не должно вызывать затруднений;
- способность гасить вибрации, возникающие при работе пресса;
- высокая износостойкость и способность сопротивляться разрушающему действию химикатов и микроорганизмов;
- быстрая приработка (обкатка);
- легкость установки и замены.

Для правильного выбора сукна надо знать, как влияют конструктивные особенности сукон на эффективность обезвоживания и качество вырабатываемой продукции. Современные нетканые прессовые сукна, как правило, изготавливают из синтетических волокон. Сукна состоят из двух компонентов: основа (сетчатый каркас) и поверхностные слои ватки, соединенные с основой иглопробивным способом (рис. 57). В настоящее время тканые шерстяные сукна применяют лишь на старых тихоходных машинах.

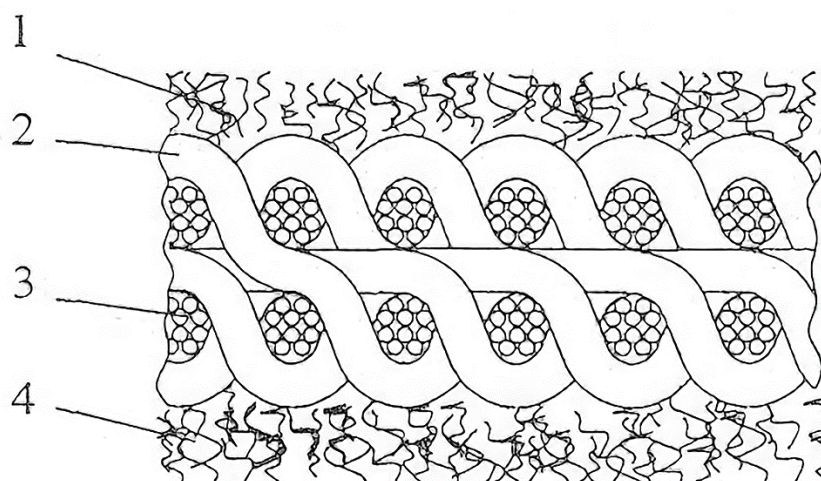


Рис. 57. Поперечное сечение иглопробивного сукна:

- 1 – верхняя ватка; 2 – поперечные нити основы; 3 – продольные нити основы;
4 – нижняя ватка

Иглопробивная машина имеет большое количество иголок с зубринами, по форме напоминающие вязальные крючки. Иголки совершают возвратно-поступательное движение, пронизывая основу и ватку, которые движутся вместе с небольшой скоростью. Прокалывая каждый квадратный сантиметр сукна до 300 и более раз, иголки надежно соединяют ватку с основой сукна. Основа сукна может выполняться в виде одно-, двух- или трехслойной сетки или состоять из двух сеток, соединённых иглопробивным способом (ламинатные сукна – рис. 58).

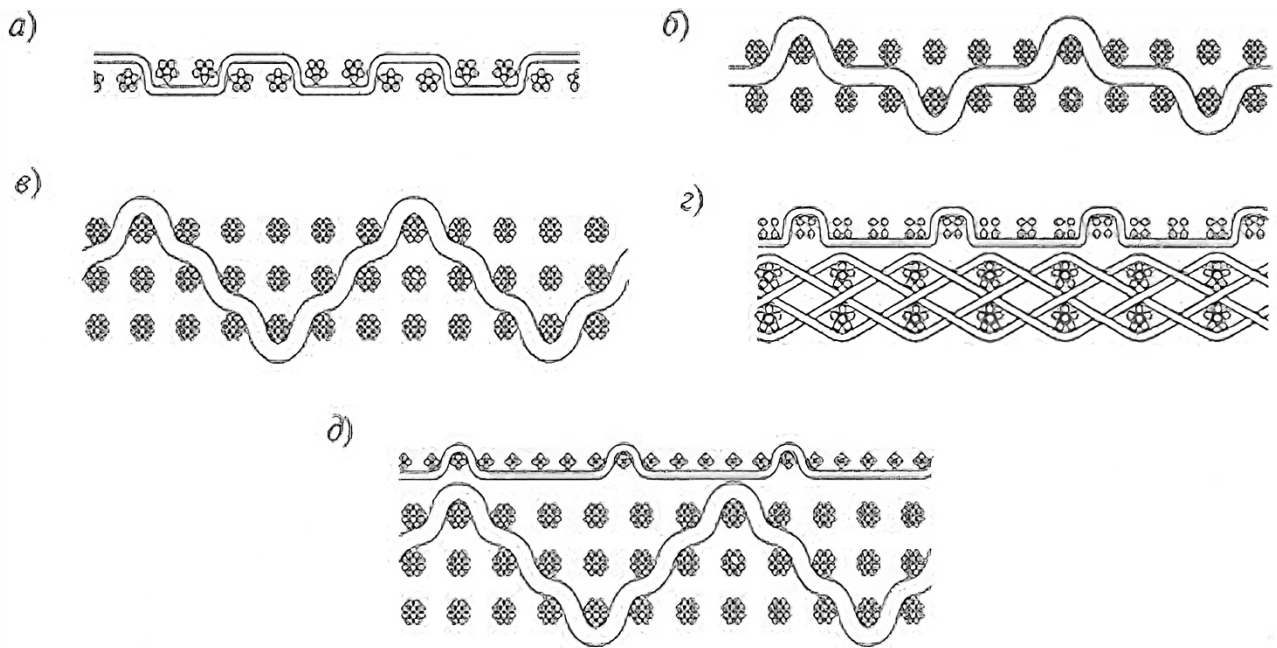


Рис. 58. Типы основы сукна:
a – однослойная; *б* – двухслойная; *в* – трёхслойная;
г, д – основы ламинатных сукон

Основными требованиями к основе сукна являются: достаточная прочность в машинном направлении, низкая сжимаемость, обеспечивающая достаточный объём порового пространства в зоне прессования, высокая проницаемость в *z*-направлении и в перпендикулярном ему направлении, а также стабильность свойств в процессе работы.

По типу основы сукна делят на сукна с тканой основой и сукна с сеточной основой. Первые получили название «ватка на ткани», вторые – «ватка на сетке». В связи с меньшей сжимаемостью сеточной основы и более высокой стабильностью её свойств сукна «ватка на сетке» получили широкое распространение. Основа сукна обычно состоит из кручёных монофиламентных нитей в поперечном направлении и кручёных моно- или мультифиламентных нитей в продольном направлении. Однослойные сукна имеют меньший вес, высокую гибкость, облегчающую их установку на машину, но они сильнее маркируют бумагу. Поэтому их применяют при прессовании с контролируемым давлением и при отсутствии жёстких требований к гладкости поверхности бумажного полотна. Двух- и трёхслойные сукна имеют больший объём порового пространства, чем однослойные. Поэтому их применяют при прессовании тяжёлых видов бумаги и картона, в первых прессах и при работе с высокими давлениями, т. е. в том случае, когда при прессовании удаляется большое количество воды. Увеличение числа слоёв также благоприятно влияет на способность сукна поглощать вибрации.

Назначение ватки – создание однородной гладкой поверхности сукна, обеспечивающей равномерную передачу давления на бумажное полотно, незначительные маркировку бумаги и её увлажнение сукном на выходе из

пресса. У большинства сукон слой ватки располагают не только на стороне сукна, граничащей с бумажным полотном, но и на стороне, соприкасающейся с валом. Ватку сукна изготавливают из более тонких, чем основа, волокон. Она необходима кроме прочего для устранения маркировки от узлов переплетения волокон основы, а также желобков или отверстий на поверхности прессового вала. Малые размеры пор в ватке способствуют снижению повторного увлажнения бумаги на выходной стороне зоны прессования. При применении сукон с многослойной ваткой уменьшается маркировка и повышается качество бумажного полотна, а также снижается обратное впитывание. В такой ватке верхние слои выполняют из волокон меньшего диаметра, чем нижние. Для количественной оценки способности сукна равномерно передавать давление на бумагу можно использовать такой показатель, как индекс поддержки сукна, который определяется числом контактов сукна с гладкой поверхностью, приходящимся на 1 см² площади сукна при давлении 8 МПа. Среднее значение индекса получено по результатам измерений в машинном и в поперечном направлениях.

В последние годы широкое применение получили ламинатные сукна, в которых основа состоит из двух независимых слоев. Верхний слой основы сукна, располагающийся со стороны бумажного полотна, выполняют из волокон меньшего диаметра и более тонкого переплетения, что уменьшает маркировку бумажного полотна. Нижний слой представляет собой двух- или трёхслойную сетку, более грубую и жесткую, чем верхний слой основы. Сетки сотканы отдельно друг от друга и соединяются при иглопробивании. Более равномерное распределение прессовой нагрузки при использовании ламинатных сукон можно получить, комбинируя гладкий верхний каркас с грубым нижним. Доля каркаса у ламинатных сукон составляет 50–75 %, что препятствует быстрому уплотнению таких сукон Система, состоящая из двух независимых тканых каркасов, лучше сопротивляется сжатию, чем комбинированная тканая система в сукнах с многослойным каркасом. При применении двух независимых основ ламинатные сукна долгое время остаются чистыми и легче кондиционируются. Низкая склонность к уплотнению, а также возможность выбора типа нитей для двух независимых друг от друга каркасных тканей обуславливают высокую способность ламинатных сукон гасить вибрации. Ламинатное сукно, в отличие от сукон с многослойным каркасом, хорошо сохраняет толщину в прессовом захвате, что позволяет этим сукнам работать при минимальной теневой маркировке бумажного полотна.

В прессах с удлинённой зоной прессования применяют трёхслойные сукна, способные поглощать и переносить через зону прессования большое количество воды.

Материалами для волокон, используемых при изготовлении сукон, служат полиамиды (нейлон, капрон, силон и т. д.), реже – полиэфир (диолен, терилен, лавсан и т. д.) и полиакриды (долан, редон, уралон и т. д.). Полиамидные волокна имеют самую высокую прочность при растяжении и изгибе, высокую износостойкость и устойчивость к действию щелочей. К их недостаткам можно отнести чувствительность к кислотам и невысокую термостойкость.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Машины для производства бумаги и картона [Текст] / под ред. В. С. Курова, Н. Н. Кокушина – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 646 с.
2. Оборудование целлюлозно-бумажного производства. Т. 2. Бумагоделательные машины [Текст] / под ред. В. А. Чичаева. – М.: Лесная промышленность, 1981. – 264 с.
3. Эйдли, И. Я. Бумагоделательные и отделочные машины [Текст] / И. Я. Эйдли. – М.: Лесная промышленность, 1970 – 624 с.
4. Биргер, И. А. Расчёт на прочность деталей машин [Текст]: справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
5. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. [Текст] / В. И. Анурьев. – М.: Машиностроение, 2008.
6. Бумагоделательные машины [Текст] / под ред. В. С. Курова, Н. Н. Кокушина. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2011. – 598 с.
7. Шульман, Г. З. Расчёт напускных устройств бумагокартоноделательных машин [Текст]: учебное пособие / Г. З. Шульман, А. В. Александров, А. Г. Андреев. – СПб.: ГОУВПО СПбГТУРП, 2010. – 48 с.
8. Швецов, Ю. Н. Расчёт обезвоживания в отсасывающей части бумаго- и картоноделательных машин [Текст]: учебное пособие / Ю. Н. Швецов, И. Д. Кугушев., А. Е. Слуцкий. – СПб.: ГОУВПО СПбГТУРП, 1993. – 106 с.