



ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

УДК 676.1.038.2

Н.И. Яблочкин, В.И. Комаров, И.Н. Ковернинский, Д.А. Дулькин

Яблочкин Николай Иванович родился в 1954 г., окончил в 1984 г. Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности, заместитель генерального директора ОАО «Караваево». Имеет 14 печатных работ в области производства и научных основ высокоэффективной переработки макулатурного сырья в широкий ассортимент бумаги, картона и изделий из них.



Комаров Валерий Иванович родился в 1946 г., окончил в 1969 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой технологии целлюлозно-бумажного производства Архангельского государственного технического университета. Имеет более 300 печатных работ в области исследования свойств деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов.



Ковернинский Иван Николаевич родился в 1948 г., окончил в 1972 г. химико-технологический факультет Ленинградской лесотехнической академии, доктор технических наук, профессор, академик РАЕН, почетный работник высшего профессионального образования РФ, директор научного центра ОАО «Вторресурсы-Караваево». Имеет 129 научных работ в области теории и технологии производства бумажно-картонной продукции.



Дулькин Д.А. родился в 1966 г., окончил в 1989 г. высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана, исполнительный директор ОАО «Полотняно-заводская бумажная фабрика». Область научных интересов – технология бумаги и картона, использование макулатуры и современных химических средств.



ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО ВОЛОКНА В ЦЕНТРОБЕЖНО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ФРАКЦИОНАТОРЕ

Рассмотрены необходимость фракционирования вторичного волокна в технологических схемах подготовки макулатурной массы и проблемы, связанные с данной задачей; проведено сравнение эффективности работы новой конструкции центробежно-гидродинамического фракционатора с существующими.

Ключевые слова: фракционирование, вторичное волокно (макулатура), тест-лайнер, сортировки, фракционаторы, гидродинамическое фракционирование.

Общие положения

В бумажной промышленности России наблюдается устойчивая тенденция роста потребления вторичного волокнистого материала (макулатуры) для производства различных видов бумажной продукции.

Макулатура характеризуется высокой полидисперсностью и является чрезвычайно неоднородным по компонентному составу вторичным полуфабрикатом, который содержит: во-первых, вторичные волокна из небеленых и беленых видов целлюлозы, полуцеллюлозы и механической массы, полученных различными способами из древесины различных пород; во-вторых, проклеивающие химические гидрофобные вещества на основе канифоли, синтетических химических веществ, воска, парафина и др.; в-третьих, вспомогательные химические вещества на основе катионных, окисленных и анионных сшитых бурой крахмалов и других синтетических веществ, повышающих механические характеристики бумаги и картона; в-четвертых, наполнители – карбонат кальция, каолин, двуокись титана и др.; в-пятых, механические включения и примеси нецеллюлозного происхождения различного размера и плотности, отрицательно влияющие на механическую прочность бумаги и картона и ухудшающие внешний вид их поверхностей. В связи с этим вторичный волокнистый материал необходимо подвергать сортированию и очистке.

У вторичных полуфабрикатов волокна подверглись как минимум одному циклу переработки, т.е. гидратации, размолу, изменению фракционного состава по длине волокна при сортировании и отливу, сушке. В результате изменяются их средневзвешенная длина, геометрия пор и микротрещин в стенке волокон, уменьшается удельная поверхность, ороговекает поверхность волокон, что приводит при повторном использовании к снижению степени гидратации. Волокна становятся более жесткими и хрупкими, снижается способность к внешнему и внутреннему фибриллированию, а, следовательно, и способность образовывать межволоконные связи. Эти свойства ухудшаются при каждом последующем цикле переработки. Как правило, бумага и картон, произведенные из вторичного волокна имеют меньшую прочность [41, 47, 63, 77, 94, 96].

Из работ [41, 63, 77, 94, 96] следует, что вторичный волокнистый материал является крайне неоднородной полидисперсной системой, состоящей из волокон различной длины и толщины, полученных различными способами из различных пород древесины. Предлагается бумажную массу из вторичного материала условно делить на длинно- и коротковолокнистую фракции. Длинноволокнистая фракция характеризуется заметно большей средней длиной волокна, низкой степенью помола и потенциально высокими прочностными свойствами. Коротковолокнистая фракция представляет собой обрывки и фрагменты сильноороговевших волокон, которые характеризуются высокой степенью помола, невысокой средней длиной, недостаточными бумагообразующими свойствами и особой способностью к укорочению в процессе размала вследствие повышенной хрупкости. Коротковолок-

нистая фракция обуславливает увеличение степени помола бумажной массы и препятствует оптимальному воздействию при размолу на длинноволокнистую фракцию.

Совместный размол коротко- и длинноволокнистой фракций приводит к еще большему измельчению коротких и недостаточной обработке длинных волокон. Приготовленная таким образом бумажная масса характеризуется невысокими бумагообразующими свойствами, что в первую очередь проявляется в понижении способности к обезвоживанию и образованию межволоконных сил связи. Таким образом, уменьшаются скорость бумагоделательной машины и механическая прочность волокон. В работах [4, 9, 17, 41, 74, 92, 93, 95] указывается, что псевдо- или квазипомол бумажной массы из вторичных волокон увеличивается с расчетом содержания в ней мелких (длина до 0,3 мм) и очень мелких (мельштоф) волокон, количество которых в зависимости от вида макулатуры и числа циклов ее переработки находится в пределах от 5 до 15 % и более. Авторы работ [86, 99] провели исследования, показавшие, что у бумажной массы со степенью помола 50 °ШР после отделения 5 ... 8 % мелкого волокна степень помола уменьшилась до 15 °ШР, у бумажной массы со степенью помола 48 °ШР после отделения 16 % мелких волокон степень помола составила 16 °ШР.

Для реализации селективной обработки коротко- и длинноволокнистой фракций вторичного волокнистого материала с целью повышения бумагообразующих свойств необходимо фракционирование, т.е. получение двух волокнистых фракций с разными свойствами. С этой целью используется специальное оборудование. Многие системы массоподготовки объединяют сортирование и фракционирование. В этом случае масса вначале подвергается грубому сортированию на сортировках с щелевыми ситами, а на стадии фракционирования используются сита с круглыми отверстиями [8, 12, 32, 36].

После фракционирования коротковолокнистый материал в зависимости от его физических характеристик и технологического назначения либо вообще не подвергают размолу, либо размалывают отдельно. Длинноволокнистую фракцию диспергируют и размалывают в целях гомогенизации и повышения прочности бумажной массы [13, 58, 64, 68, 70, 73, 97].

Бумажная масса, полученная из смеси коротковолокнистой и размолотой длинноволокнистой фракций, будет иметь меньшую степень помола, чем при размолу нефракционированной массы до достижения идентичных значений прочностных показателей бумаги или картона. Вместе с этим повышается скорость обезвоживания бумажной массы на сетке бумаго- и картоноделательных машин и создается реальная возможность увеличения производительности. Прочностные показатели бумажной продукции в зависимости от качества макулатуры повышаются на 19 % и более при одновременном снижении затрат электроэнергии на размол до 25 % [13, 58, 70, 74, 93, 97].

Фракционирование позволяет более эффективно и экономично обрабатывать одну из фракций волокнистого материала с целью повышения ее бумагообразующих свойств без ухудшения качества другой фракции или обрабатывать обе фракции до требуемого уровня качества; уменьшить вариацию характеристик производимой продукции, обусловленную колебанием относительного содержания фракций по длине волокна в перерабатываемой бумажной массе [13, 58, 64, 73, 74, 95, 97].

Удалением из низкосортной макулатурной массы коротковолокнистой фракции можно добиться повышения качества приготовления из нее бумажной массы. Фракции волокнистых материалов после соответствующей обработки могут быть использованы для различных видов бумажной продукции, отличающихся по своим требованиям к прочностным показателям, или различных слоев картона [70, 97].

Таким образом, приготовление бумажной массы из макулатуры с использованием технологической операции фракционирования и отдельной обработки фракций до максимально возможного восстановления бумагообразующих свойств волокнистого материала позволяет значительно улучшить потребительские свойства бумажной продукции. Существующие в настоящее время способы разделения волокнистого материала из макулатуры не всегда удовлетворяют возрастающим требованиям к качеству подготовленной бумажной массы. Конструкции фракционаторов, реализующие эти способы, характеризуются недостаточной избирательной способностью по разделению волокнистого материала на фракции в зависимости от физических свойств волокон и часто требуют дополнительного введения технологической стадии окончательной очистки массы от мелких частиц загрязняющих включений с меньшей, чем у воды и волокон, удельной плотностью в энергоемкой многоступенчатой установке вихревых конических очистителей, работающих в режиме реверса [43–45, 67].

Поэтому дальнейшее совершенствование техники фракционирования является актуальной задачей.

*Разделение вторичного волокнистого материала на фракции
в аппаратах различной конструкции*

В настоящее время в бумажном производстве процесс фракционирования волокнистого материала осуществляют способом просеивания более коротких волокон из интенсивно перемешиваемой массы через отверстия ситообразного фракционирующего элемента при перепаде давления по обе его стороны 30 ... 50 кПа (0,3 ... 0,5 кгс/см²) и непрерывной очистке сита.

Для реализации этого способа используют различные типы фракционаторов, конструкции которых созданы на базе напорных сортировок закрытого типа и приспособлены для выполнения фракционирования. В случае фракционирования волокнистого материала, содержащего 5 ... 15 % и более мелких (длина до 0,3 мм) и очень мелких волокон (мельштоф), применяют сита с круглыми отверстиями, которые характеризуются проницае-

мостью преимущественно для мелких волокон, соизмеримых с размером отверстий.

Требуемая для данной технологии избирательность разделения по степени помола и средней длине волокон коротковолокнистой фракции регулируется вариацией размеров круглых отверстий сита, диаметр которых изменяется обычно в пределах от 1,0 до 2,2 мм. С уменьшением размеров отверстий степень помола и средневзвешенная длина волокон массы, прошедшей сквозь него, уменьшается. Непрерывность процесса фракционирования в таких аппаратах достигается за счет резкого увеличения турбулентности потока массы и непрерывной очистки поверхности сита от закупоривания движущимися вблизи его специальными устройствами [27, 43, 74, 81, 87].

Фирма «Escher Wyss» на базе турбосепаратора создала аппарат «Fiberfraktor», в котором возможно фракционирование вторичного волокна при концентрации массы до 4 %. Устройством, создающим турбулентцию в массе и очищающим сито, служит вращающийся лопастной ротор [58]. Операции фракционирования в этом аппарате должно предшествовать тонкое сортирование массы в сортировке «Fibersorter» [87, 88].

Фирмы «Bird» и «Yngersoll Rand» для вторичного волокна рекомендуют совместно разработанный фракционатор «Centrisorter». Во внутренней цилиндрической полости вертикально размещенного корпуса соосно с ней устанавливается цилиндрическое сито, внутри которого соосно с ним размещен цилиндрический ротор. Образованное между ситом и корпусом пространство служит полостью для прошедшей через сито коротковолокнистой фракции, а пространство между ситом и ротором – полостью для поступающей массы и не прошедшей через сито длинноволокнистой фракции. Масса вторичного волокна поступает тангенциально в верхнюю часть полости для длинноволокнистой фракции. Удаление фракций осуществляется через выводные патрубки, размещенные в нижних частях полостей. На цилиндрической поверхности ротора по крутой винтовой спирали по высоте цилиндра закреплены полусферические выпуклости. Такая конструкция ротора при его вращении создает нисходящий поток массы и способствует лучшему продвижению сгущенной длинноволокнистой фракции к выходному отверстию, что уменьшает возможность разрыва сита. В процессе вращения ротора выпуклости обуславливают сильное турбулентное перемешивание фракционируемой массы и пульсирующие обратные толчки массы. Это приводит к просеиванию коротких волокон через отверстия сита и очистке отверстий сита от закупоривания. Таким образом обеспечивается непрерывность процесса фракционирования вторичных волокон при их концентрации в массе до 4 % и более [27, 81].

С целью повышения качества перемешивания макулатурной массы и очистки поверхности сита от закупоривания его отверстий, а также улучшения условий для создания нисходящего потока массы в полости для длинноволокнистой фракции фирма «Voith» создала фракционатор «Multifraktor», в котором на цилиндрической поверхности ротора полусферические выпукло-

сти заменены на короткие гидродинамические лопасти, расположенные в три яруса по шесть штук в каждом ярусе. Усовершенствование конструкции ротора позволило вести процесс фракционирования вторичного волокна при концентрации от 3 до 5 % [13, 26, 27, 65, 70, 71, 88].

Кроме того, фракционирование выгодно при разделении вторичного волокнистого материала с малой полидисперсностью, содержащего незначительное количество мелких волокон и состоящего в основном из целлюлозных и полуцеллюлозных волокон длиной не менее 1,9 мм. Такое волокно содержится в макулатуре из высокопрочных видов крафт-лайнера. В соответствии с ГОСТ 10700–97 макулатура марки МС-5Б первой и второй категорий состоит из этого волокнистого материала [7].

Фракционирование вторичного материала, состоящего из различного вида волокон с невысокой степенью изменения длины, в первичном цикле рекомендуется проводить на фракционаторах с ситами, имеющими щелевые отверстия с шириной от 0,10 до 0,25 мм, которые являются преимущественно проницаемыми для тонких и длинных целлюлозных волокон и практически непроницаемыми для грубых волокон полуцеллюлозы, характеризующихся значительно большей толщиной, чем целлюлозные волокна [36, 39, 43, 59 – 62, 83, 84].

Фракционирование длиноволокнистого материала также можно осуществлять на фракционаторах «Fiberfraktor», «Centrisorter» и «Multifraktor», но при использовании сит со щелевыми отверстиями. В этом случае в связи с уменьшением площади живого сечения сита [12] производительность фракционаторов существенно снижается. Оптимальная концентрация вторичного волокна, подаваемого на фракционирование составляет 2,5 ... 3,0 % [43].

Однако способ фракционирования волокнистых материалов путем просеивания коротковолокнистой фракции через отверстия сита и существующие для его реализации конструкции фракционаторов имеют следующие недостатки.

1. Многофакторная зависимость эффективности фракционирования от конструктивных и технологических параметров. Качественные показатели процесса фракционирования вторичного волокнистого материала во фракционаторах с ситообразными фракционирующими элементами в значительной степени зависят от размеров отверстий сита; формы отверстий (круглые или щелевые); площади живого сечения сита; толщины сита; интенсивности перемешивания фракционируемой массы; непрерывности очистки отверстий сита от закупоривания; количества загрязняющих включений в массе; концентрации волокна в массе, поступающей на фракционирование; степени помола волокнистого материала; длины волокон; вида волокнистого материала; количества отбираемой коротковолокнистой фракции; окружной скорости вращения ротора; давления массы на входе во фракционатор и перепада давления по обе стороны сита [4, 9, 12, 13, 39, 43, 59 – 61, 65, 71, 73, 74, 83, 84, 87, 88, 93, 97].

Перечисленные переменные факторы значительно затрудняют выбор оптимального режима процесса фракционирования в аппаратах с ситообразными фракционирующими элементами. Конструктивные параметры фракционатора и технологические параметры процесса выбирают для каждого конкретного случая в зависимости от исходного волокнистого материала, технико-экономических показателей фракционирования и приготовления бумажной массы для производства конкретного вида бумаги или картона. При варьировании сортов макулатуры и вида вырабатываемой продукции возникают значительные затруднения, связанные с трудоемкими работами по замене сит и переналадке технологического процесса фракционирования.

2. Необходимость предварительной высококачественной тонкой очистки вторичного волокна от загрязняющих включений перед фракционированием. В результате фракционирования макулатурной массы длинноволокнистая фракция загрязняется различными видами включений за счет уменьшения их количества в коротковолокнистой фракции [64, 65, 70, 71, 73]. При размоле длинноволокнистой фракции загрязняющие включения измельчаются, количество их увеличивается, что влияет на снижение качества продукции. Поэтому в технологической схеме подготовки бумажной массы из вторичного волокна фракционированию всегда предшествует стадия высокоэффективной тонкой очистки массы от различных видов загрязняющих включений с использованием сложной системы тонкого сортирования, состоящей из нескольких напорных сортировок, сита которых обладают селективностью к различному виду сора [8, 12, 83, 84]. Доочистку массы от загрязняющих включений с большей или меньшей, чем у воды и волокон, плотностью, для которых сита не являются преградой, осуществляют в энергоемких многоступенчатых вихревых конических очистителях, которые могут работать в прямоточном режиме или в режиме реверса [8, 43];

3. Недостаточная избирательная способность. Максимально возможное улучшение бумагообразующих свойств вторичного волокна в процессе размола может быть достигнуто только при полном удалении из него мелких (длина до 0,3 мм) и очень мелких (мельштоф) волокон, которые проявляют высокую степень помола и низкие бумагообразующие свойства. Относительное содержание таких волокон во вторичном материале в зависимости от его вида достигает 15 % и более. Из опыта эксплуатации фракционатора «Multifaktor», использующего сита с диаметром отверстий 1,2 ... 2,0 мм при фракционировании вторичного материала (макулатуры) из гофротары [74], содержащей 10 % мелких волокон, установлено, что полное удаление мелких волокон из длинноволокнистой фракции достигалось только при отборе 50 % коротковолокнистой фракции. Таким образом, в коротковолокнистую фракцию переходило 40 % волокон, которые в сильной степени не влияли на качество продукции, т. е. сито не является надежной преградой для волокон, длина которых значительно превышает размеры его отверстий.

Расчетное значение избирательной способности фракционатора, использующего сита с диаметром отверстий 1,8 ... 2,0 мм при фракционировании длинноволокнистого вторичного материала из гофротары составляет всего лишь 20 %.

4. Низкая надежность в эксплуатации. Этот недостаток обусловлен закупориванием отверстий сита; разрывом или деформацией сита; износом сита и конструктивных элементов ротора. Отверстия сита закупориваются как загрязняющими включениями, так и жгутообразными сгустками волокон, создаваемыми эффектом прядения волокон под действием высокочастотных пульсаций в массе при движении сферических выпуклостей или коротких лопастей вблизи перфорированной поверхности сита. Закупоривание отверстий вызывает уменьшение площади живого сечения сита и нарушение режима фракционирования.

Разрыв или деформация конструкции сита вращающимся ротором имеет место при чрезмерном сгущении длинноволокнистой фракции вследствие неожиданного поступления в аппарат длинноволокнистого материала с низкой степенью помола, а также при попадании посторонних предметов или сгустков волокон в зазор между ситом и выпуклостями или лопастями ротора. В результате износа сита, выпуклостей или лопастей роторов абразивными веществами нарушаются геометрические параметры сита и увеличивается зазор между ситом и элементами ротора, что приводит к снижению эффективности процесса фракционирования. В этом случае требуется проведение трудоемких ремонтных работ по восстановлению первоначальных конструктивных параметров фракционатора. Этот недостаток характерен и для напорных сортировок, работающих в режиме сортирования.

Таким образом, для достижения эффекта улучшения бумагообразующих свойств вторичного волокнистого материала и улучшения качества приготовления бумажной массы из макулатуры с использованием фракционирования при производстве бумажно-картонной продукции с повышенной прочностью сопровождается следующими предварительными технологическими процессами: тонкая очистка бумажной массы от различных видов загрязняющих включений в системе тонкого сортирования, состоящей минимум из трех видов напорных сортировок, избирательно удаляющих различные виды загрязнений; заключительная доочистка массы от загрязняющих включений с большей, чем у воды и волокон, плотностью в многоступенчатых вихревых конических очистителях, работающих в прямоточном режиме; окончательная доочистка массы от загрязняющих включений с меньшей, чем у воды и волокон, плотностью в многоступенчатых вихревых конических очистителях, работающих в режиме реверса. Кроме того, для обеспечения непрерывности работы технологической схемы подготовки бумажной массы, аппаратное оформление стадий тонкой очистки и фракционирования из-за низкой надежности в эксплуатации оборудования, должно предусматривать наличие как рабочего, так и резервного оборудования.

На практике процесс фракционирования осуществим с минимальными капитальными затратами лишь на тех предприятиях, где технологическая схема подготовки бумажной массы оснащена современным сортирующим и очистным оборудованием. На предприятиях с устаревшей традиционной технологией подготовки бумажной массы включение процесса фракционирования в аппаратах с ситовидными фракционирующими элементами требует: во-первых, больших капитальных затрат на приобретение оборудования; во-вторых, наличия больших производственных площадей; в третьих, больших капитальных затрат на реконструкцию производства; в-четвертых, значительных затрат электроэнергии несмотря на экономию при размоле только длинноволокнистой фракции. Следовательно, для таких предприятий фракционирование с использованием аппаратов с ситовидными фракционирующими элементами может быть неприемлемо по технико-экономическим соображениям.

Попытка дальнейшего улучшения избирательной способности фракционаторов, реализующих способ просеивания волокон через отверстия сита путем уменьшения размеров отверстий, выявила значительные технические трудности.

Практический опыт эксплуатации фракционаторов, созданных на базе конструкций напорных сортировок закрытого типа, хорошо дополняет теоретический анализ процессов фракционирования с учетом существующих представлений о закономерностях внутреннего гидродинамического поведения потока волокнистой суспензии.

Закономерности гидродинамического поведения волокнистой суспензии

С точки зрения гидродинамики волокнистая суспензия представляет собой смесь двух фаз: дисперсионной жидкой среды или сплошной внешней фазы – воды, которая является несущей фазой; дисперсной твердой или внутренней прерывистой фазы, включающей волокна технической целлюлозы или механической массы, которые рассматриваются как примесь, увлекаемая несущей фазой. Волокнистая суспензия характеризуется присутствием в ней частиц твердой фазы макроскопических размеров сильно удлиненной формы и является гетерогенной системой, где между частицами дисперсной твердой фазы и дисперсионной жидкой средой имеется четкая поверхность раздела. Волокнистая суспензия механически может быть разделена на составляющие ее компоненты.

Вода относится к категории ньютоновских жидкостей. Единственная динамическая характеристика ньютоновской жидкости – вязкость. Значение вязкости при данной температуре не зависит от напряжения сдвига, т.е. является постоянным коэффициентом в формуле закона Ньютона. Реологическая зависимость напряжения сдвига (касательного напряжения или напряжения внутреннего трения) от градиента скорости (скорости сдвига) для ньютоновских жидкостей выражается прямой линией, исходящей из начала координат [5, 30].

Примесь целлюлозных волокон в воде существенно изменяет гидродинамические свойства образованной системы по сравнению с водой. Поток волокнистой суспензии характеризуется следующими гидродинамическими параметрами: реологической характеристикой (зависимостью между напряжением сдвига и градиентом скорости) [28, 29], внутренней структурой потока [31, 52, 90], распределением полей скоростей в поперечном сечении канала [28, 31, 46, 50, 52, 66, 85], коэффициентом трения [11, 31, 46, 50, 52] и гидродинамическими потерями на трение [11, 31, 46, 50, 52, 54, 66]. Величины гидродинамических параметров зависят от скорости движения потока волокнистой суспензии.

Для волокнистых суспензий реологическая зависимость между напряжением сдвига и градиентом скорости (кривая течения) характеризуется отсутствием прямой пропорциональности, поэтому волокнистые суспензии относятся к категории нормальных или неньютоновских жидкостей. Вязкость неньютоновской жидкости зависит от напряжения сдвига, т.е. является функцией скорости деформации потока [28 – 31, 34, 35].

По внешнему виду кривые течения волокнистых суспензий [28, 29, 34] отличаются от кривых течения известных классов неньютоновских жидкостей [30, 54]. Поэтому волокнистые суспензии представляют собой особый вид неньютоновских жидкостей с ярко выраженной аномалией вязкости [28, 29, 34, 46, 50]. Материалы с такими реологическими характеристиками относятся к веществам со сложным реологическим поведением [5].

Реологическая характеристика волокнистой суспензии содержит области аномального (неньютоновского) и нормального (ньютоновского) поведения сдвигового потока жидкости. Она характеризуется предельным напряжением сдвига при нулевом градиенте скорости и критическим значением градиента скорости. С увеличением градиента скорости в потоке между нулевым и критическим его значениями заключена область неньютоновского внутреннего поведения. Вязкость суспензии в этой области изменяется с ростом скорости сдвига и называется кажущейся вязкостью. При превышении критического значения градиента скорости имеет место область ньютоновского поведения потока суспензии. Кривая течения в этой области потока аналогична кривой течения ньютоновской жидкости. Вязкость приобретает постоянное значение [28, 29].

Значения характеристик аномального реологического внутреннего поведения волокнистой суспензии (предельное напряжение сдвига, критический градиент скорости и вязкость) зависят от физических свойств волокнистого материала, способа получения, степени помола и концентрации волокон в воде и всегда увеличиваются с ростом последнего показателя. Таким образом, неньютоновские свойства суспензии во всех случаях усиливаются с увеличением концентрации волокон в суспензии [28, 29, 34].

Причиной аномального поведения волокнистой суспензии является свойство волокон образовывать в состоянии покоя сетевидную флокулированную волокнистую структуру определенной прочности, что обуславлива-

ет тиксотропные свойства суспензии [28, 29, 31, 40, 46, 50, 52]. Реологическое поведение волокнистой суспензии, как неньютоновской жидкости, на всем протяжении кривой течения регламентируется изменением внутренней структуры потока в зависимости от скорости установившегося его движения. Поток волокнистой суспензии низкой концентрации с увеличением скорости переходит от структурированного стержневого к диспергированному ламинизированному сдвиговому потоку с реализованными тиксотропными свойствами, а средней концентрации – от флокулированного через структурированный к диспергированному ламинизированному сдвиговому потоку с полностью реализованными тиксотропными свойствами [28, 29, 91].

Область неньютоновского реологического поведения суспензии с низкой концентрацией волокон обусловлена присутствием структурированного [28], а средней и высокой – флокулированного и структурированного строения потока [28, 29, 31, 52, 91]. В структурированном потоке наблюдается стержень из переплетенных волокон, который с увеличением скорости постепенно разрушается в направлении от сплошной гладкой стенки канала к его оси, уменьшаясь в диаметре. В пространстве между поверхностью стержня и сплошной гладкой стенкой канала волокна разрушенной структуры образуют диспергированный ламинизированный слой с ориентированными в нем по потоку волокнами. Когда градиент скорости достигает величины критического значения, остаток стержня в центре потока полностью разрушается с образованием по всей площади сечения канала полностью диспергированного ламинизированного сдвигового потока волокнистой суспензии с ориентированными по потоку волокнами и полностью реализованными тиксотропными свойствами. Переход внутренней структуры потока суспензии из структурированного состояния в диспергированное зависит от скорости движения, градиента скорости, концентрации волокон в суспензии и физических свойств, т.е. вида волокон. Чем выше концентрация в суспензии одного и того же вида волокон при неизменной степени помола, тем больше скорость, при которой сохраняется стержневой структурированный поток. При неизменной концентрации волокон в суспензии с увеличением степени их помола уменьшается скорость, при которой сохраняется стержневой поток. Таким же образом разрушается и флокулированный поток, но уже до сетчатой стержневой структуры, которая затем разрушается и трансформируется в диспергированный ламинизированный сдвиговой поток с высоким градиентом скорости, ориентированными по потоку волокнами и полностью реализованными тиксотропными свойствами, аналогично потоку суспензии с низкой концентрацией волокон [28, 29, 31, 46, 50, 52, 66, 85, 91].

В установившемся режиме диспергированный ламинизированный сдвиговой поток суспензии с ориентированными по потоку волокнами и полностью реализованными тиксотропными свойствами имеет ньютоновский характер движения. Область реологической кривой течения с прямой зависимостью напряжения сдвига от градиента скорости, т.е. с ньютонов-

ским реологическим поведением потока, характеризуется диспергированным ламинизированным сдвиговым потоком суспензии с ориентированными по потоку волокнами и полностью реализованными тиксотропными свойствами. В таком потоке действуют силы вязкостного трения между водой и ориентированными по потоку волокнами и между водой и гладкими сплошными стенками канала, характерные для ньютоновской жидкости. Ориентированные по потоку волокна подавляют мелкомасштабные турбулентные пульсации, и коэффициент трения в потоке суспензии становится меньше, чем в потоке воды с аналогичной скоростью движения. Однако при чрезмерном увеличении скорости движения суспензии интенсивность турбулентных пульсаций возрастает, а с увеличением концентрации волокон – уменьшается. Кроме того, с увеличением скорости сдвига в потоке суспензии реализация тиксотропных свойств суспензии ускоряется [28, 31, 40, 46, 50, 52, 54, 66, 82, 85, 91]. При обратном уменьшении напряжения сдвига в потоке реализованные тиксотропные свойства сохраняются вплоть до очередного обратного восстановления первоначальных внутренних структур суспензии [16, 82].

Распределение скоростей в поперечном сечении потока волокнистой суспензии зависит от скорости его движения. С увеличением скорости движения потока эпюра скоростей в установившемся режиме изменяется от равноскоростной в начале области ньютоновского поведения реологической характеристики суспензии к параболической в области ньютоновского реологического поведения жидкости [28, 31, 40, 46, 50, 52, 54, 66, 85].

В диспергированном ламинизированном сдвиговом потоке волокнистой суспензии с ориентированными по потоку волокнами возникают гидродинамические силы, воздействующие на волокна в направлении градиента скорости, которые перемещают их из области сдвигового потока с малой скоростью движения суспензии в область потока с большей скоростью движения суспензии. При этом скорость перемещения волокон увеличивается с ростом их длины, что обуславливает увеличение концентрации волокон в потоке суспензии в направлении их перемещения [14, 38, 49, 76].

В процессе трансформации флокулированного потока волокнистой суспензии в структурированный коэффициент трения уменьшается и в диспергированном ламинизированном сдвиговом потоке с ориентированными по потоку волокнами и полностью реализованными тиксотропными свойствами достигает меньшего, чем у воды, значения при одинаковых скоростях движения. При дальнейшем одновременном увеличении концентрации волокон в суспензии и скорости ее движения интенсивность уменьшения значений коэффициента трения также возрастает [31, 46, 50, 52, 66, 85]. Гидравлические потери напора в потоке суспензии при движении ее в канале трубопровода аналогичны изменению коэффициента трения [11, 46, 48, 54].

*Работа фракционаторов, реализующих способ просеивания
волокнутого материала через отверстия сита,
с позиции гидродинамики волокустных суспензий*

Рабочим телом фракционаторов является волокустная суспензия. Задача фракционирования – разделение волокустного материала с высокой избирательной способностью на фракции в зависимости от физических характеристик волокунов. Для этого рабочие органы конструкции фракционатора должны создавать гидродинамическое движение потока волокустной суспензии, которое необходимо для разделения волокустного материала на фракции с максимальной избирательной способностью.

Представим модель конструкции фракционатора, реализующую идеальным образом способ просеивания волокунов через фракционирующий элемент.

Необходимым и достаточным условием для осуществления гидродинамического процесса фракционирования волокустного материала является организация в канале аппарата полости для фракционируемой волокунской суспензии, которая движется под воздействием вращающегося ротора относительно внутренней поверхности ситообразного фракционирующего элемента с большой окружной скоростью. При этом сдвиговой поток волокунской суспензии диспергирован, ламинизирован, имеет большой градиент скорости, волокуна ориентированы по потоку, тиксотропные свойства полностью реализованы. Единственным (заранее технически абсурдным) условием для организации такого сдвигового потока суспензии является, с одной стороны, выполнение фракционирующего элемента сита со сплошной гладкой поверхностью, которая была бы проницаемой для коротковокунской фракции с требуемой для технологических целей физической характеристикой и непроницаемой для длиновокунской фракции, а с другой – конструкция вращающегося ротора не должна оказывать турбулентно перемешивающего воздействия на поток.

Сразу же после организации такого сдвигового потока, под воздействием напряжений сдвига, в нем возникают гидродинамические силы, воздействующие на волокуна в направлении градиента скорости. При этом, чем длиннее волокуно, тем большее силовое воздействие оно испытывает в указанном направлении. Под воздействием гидродинамической силы волокуна различной длины перемещаются с различной скоростью в направлении градиента скорости, обращенного внутрь аппарата к оси вращающегося ротора. Причем, чем длиннее волокуно, тем с большей скоростью оно перемещается поперек сдвигового потока к ротору.

В итоге при непрерывном процессе фракционирования происходит избирательное распределение волокунов в зависимости от их длины по толщине сдвигового потока, где самые короткие волокуна располагаются вблизи гладкой сплошной поверхности фракционирующего элемента, а самые длинные – вблизи вращающегося ротора. Исходя из первоначально принятых (технически нереализуемых) условий коротковокунская фракция

проходит через сплошную гладкую поверхность фракционирующего элемента в полость для этой фракции, и далее обе фракции удаляются из «идеализированного» фракционатора.

Однако в реальной конструкции фракционатора сито, имея прерывистую поверхность, не является сплошной гладкой поверхностью и поэтому не может быть техническим средством для организации внутри аппарата сдвигового потока. Сито с прерывистой рабочей поверхностью вместе с ротором, предназначенным для перемешивания волокнистой массы, не создают никаких предпосылок для присутствия в аппарате явления гидродинамического фракционирования. Таким образом, процесс разделения волокнистого материала на фракции во фракционаторе с ситообразным фракционирующим элементом осуществляется исключительно путем просеивания коротковолокнистой фракции из волокнистой суспензии.

Из выше сказанного следует, что потенциально высокие возможности способа гидродинамического фракционирования, обеспечивающего высокую избирательность разделения волокон по длине, на фракционаторах с ситообразными фракционирующими элементами реализовать невозможно. Можно утверждать, что избирательность разделения на фракционаторах с ситообразными фракционирующими элементами достигла своего предела, дальнейшее совершенствование данных конструкций может только незначительно улучшить избирательную способность.

*Гидродинамическое фракционирование
вторичного волокнистого материала*

Способ гидродинамического фракционирования волокнистого материала основан на гидродинамическом разделении волокон по толщине сдвигового потока волокнистой суспензии в зависимости от их средней длины и последующего распределения путем распыления различных слоев сдвигового потока по фракциям в зависимости от средней длины волокон.

Гидродинамическое разделение волокнистого материала в зависимости от средней длины волокон осуществляется в организованном на сплошной гладкой поверхности фракционирующего элемента диспергированного ламинированного сдвигового потока волокнистой суспензии с ориентированными по потоку волокнами и полностью реализованными тиксотропными свойствами таким образом, что самые короткие волокна располагаются у поверхности фракционирующего элемента и по мере удаления от нее последовательно располагаются в области потока с увеличивающейся средней длиной волокон. Самые длинные волокна размещаются в той области потока, где скорость движения суспензии будет наибольшей.

Распыление сдвигового потока по фракциям в зависимости от средней длины волокон осуществляют различными способами в зависимости от конструкции фракционатора и фракционирующего элемента.

Первая конструкция фракционатора, реализующего способ гидродинамического разделения волокнистого материала на фракции в зависимости от их физических свойств, была создана в начале 70-х годов прошлого сто-

летия в институте Акселя Джонсона (Швеция). Фракционатор представляет собой круглый диск с выполненными внутри его тремя или шестью спиралевидными каналами, берущими начало в центральной части диска и заканчивающимися на периферии. Высота каналов плавно уменьшается в направлении от центра диска по спирали к периферии, таким образом, чтобы горизонтальный уровень жидкостных пробок в нижних частях всех каналов был одинаков и находился на одной линии. Высота выходных каналов равна 15 или 30 мм в зависимости от назначения аппарата. Скорость вращения диска 25 ... 30 об/мин. Оптимальное значение концентрации волокон в суспензии на входе 0,25 %. Движущая сила процесса фракционирования – сила земной гравитации. При вращении диска волокнистая суспензия поступает в каждый из каналов в центральной части диска и передвигается в виде жидкостной пробки вдоль спиралевидного канала, находясь все время в нижней части диска. В процессе движения жидкостной пробки в организованном диспергированном ламинизированном сдвиговом потоке под воздействием напряжений сдвига возникают гидродинамические силы, обуславливающие перемещение волокон в направлении градиента скорости к центральной области потока. Самые длинные волокна достигают этой области первыми и, передвигаясь в ней в переднюю часть пробки и образуя прочную флокулированную структуру, остаются там. Далее в направлении к хвостовой части жидкостной пробки располагаются волокна по мере уменьшения их длины. В хвостовой части располагаются самые короткие волокна. При достижении жидкостной пробкой выходного отверстия канала происходит полное распределение волокон по длине пробки, после чего жидкость последовательно выливается в емкости для сбора фракций в зависимости от длины волокон. Для увеличения производительности фракционатора диски объединяют в барабаны.

Однако конструкция аппарата не нашла широкого распространения в промышленности по причине низкой эксплуатационной надежности и малой концентрации волокон во фракционируемой суспензии. Эксплуатация фракционатора сопровождается явлениями закупоривания выходных отверстий каналов волокнистыми пробками, в результате чего или вообще нарушается процесс, или жидкостная пробка выливается в емкости, предназначенные для других фракций. Это существенно нивелирует высокую избирательную способность самого процесса гидродинамического фракционирования в спиралевидных каналах диска [51, 53, 76].

Для разделения волокнистого материала с концентрацией от 3 до 5 % была предпринята попытка создания гидродинамических фракционаторов, в которых движущей силой процесса является механическая энергия вращения дискообразного фракционирующего элемента, выполненного в виде усеченного конуса правильной формы с параллельными основаниями и обращенной рабочей поверхностью меньшего основания вверх или вниз. Предусматривалась возможность подачи волокнистой суспензии по нормали в центральную часть рабочей поверхности. Емкости для сбора фракций волокнистых материалов в зависимости от их физических свойств размеща-

лись по периферии фракционирующего элемента концентрически и соосно с его вертикальной осью [56, 57].

При обработке суспензии с концентрацией 0,8 и 1,2 % во фракционаторе с фракционирующим элементом диаметром 152 мм при скоростях его вращения 3 200 и 21 000 об/мин наблюдалось хорошее качество разделения волокнистого материала на коротко- и длинноволокнистую фракции, заметно отличающиеся по степени помола. Однако дальнейшее увеличение концентрации волокнистого материала привело к резкому ухудшению качества фракционирования, и при концентрации 3,0 % различие между фракциями по степени помола стало незначительным. Это явление объясняется тем, что при повышении концентрации волокон в суспензии данная конструкция фракционирующего элемента не может реализовать главное требование гидродинамического способа разделения волокон на фракции: организацию диспергированного ламинизированного сдвигового потока суспензии с ориентированными по потоку волокнами и полностью реализованными тиксотропными свойствами.

В 70-е годы прошлого века в бумажной промышленности начал проявляться интерес к разделению вторичного волокнистого материала на несколько фракций, волокна которых обладали различными физическими свойствами, с целью последующего раздельного размола для придания заданных свойств с использованием, например, в различных слоях многослойного картона.

С этой целью Шведским научно-исследовательским институтом древесины и фирмой «Niro Atomizer» была разработана конструкция гидродинамического фракционатора для разделения на восемь фракций суспензии вторичного волокнистого материала с концентрацией до 5 %. Фракционатор совмещал в себе одновременно две технологических операции: фракционирование волокнистого материала и очистку фракций от загрязняющих включений. Такое решение упрощало технологическую схему приготовления бумажной массы из макулатуры.

Основным элементом фракционатора является вращающийся с различной скоростью дискообразный фракционирующий элемент с вогнутой рабочей поверхностью. Этот элемент расположен горизонтально вогнутой поверхностью вверх. Волокнистая суспензия подается в центральную часть вогнутой поверхности. В воздушном пространстве по периферии фракционирующего элемента и соосно с ним размещены концентрические емкости сбора фракций волокон. Фракционирующий элемент вращается с большой скоростью.

Под воздействием энергии вращения и центробежных сил суспензия распределяется тонким слоем по вогнутой поверхности и движется в направлении к ее периферии. Благодаря вогнутости элемента суспензия под воздействием центробежных сил прижимается к его рабочей поверхности, что обуславливает увеличение напряжения сдвига в слое движущейся жидкости, под воздействием которого поток волокнистой суспензии с флокулированной структурой превращается в диспергированный ламинизированный сдвиговой поток, где происходит распределение волокон по длине в толще

слоя суспензии от рабочей поверхности в направлении к свободной поверхности слоя. При достижении слоем суспензии периферии рабочей поверхности под действием центробежных сил сдвиговой поток распыляется в воздушном пространстве в факел, в котором сохраняется такое же расположение волокон в зависимости от их длины, как и по толщине слоя сдвигового потока на рабочей поверхности. Фракции волокнистых материалов улавливаются из факела расположенными на их пути емкостями [18, 27, 68 – 70]. При диаметре фракционирующего элемента от 120 до 750 мм и скорости вращения от 1 700 до 20 000 об/мин суспензия с концентрацией 3 % во всех случаях разделялась на фракции с различной степенью помола или средней длиной волокон.

Существенным недостатком данной конструкции является малая избирательная способность при отделении фракций мелких и очень мелких волокон. Во всех фракциях в различных количествах содержатся как мелкие и очень мелкие, так и грубые волокна. Загрязняющие включения с меньшей, чем у воды и волокон, удельной плотностью преимущественно концентрируются в длинноволокнистых фракциях, но в малых количествах содержатся и во всех остальных. Включения с большей, чем у воды и волокон, удельной плотностью концентрируются в основном в коротковолокнистой фракции.

Причина низкой избирательности при разделении потока – неоднородность движущих сил, участвующих в организации сдвигового потока волокнистой суспензии на рабочей поверхности фракционирующего органа [10]. Траектория движения сдвигового потока суспензии на рабочей поверхности вращающегося фракционирующего органа является результирующей от векторного сложения траекторий окружных и радиальных составляющих сдвиговых потоков. Движущей силой организации окружного сдвигового потока является энергия вращения фракционирующего органа, а движущей силой организации радиального сдвигового потока – центробежные силы, возникающие при вращении этого органа. При векторном сложении на рабочей поверхности направлений движения элементарных слоев по толщине окружного сдвигового потока с направлениями движения элементарных слоев по толщине радиального сдвигового потока образуются результирующие направления движения элементарных слоев, которые и образуют траекторию движения сдвигового потока, организованного на рабочей поверхности фракционирующего органа. А так как скорости движения элементарных слоев по толщине окружного сдвигового потока существенно превышают скорости движения аналогичных элементарных слоев по толщине радиального сдвигового потока, то при энергетическом взаимодействии они будут иметь разные направления и скорости движения, что обуславливает не только турбулентное перемешивание волокон в потоке, но и существенное ухудшение условий для организации сдвигового потока с однородным полем скоростей, являющегося главным условием для осуществления гидродинамического фракционирования. Это явление и объясняет причину плохой избирательной способности конструкций фракционаторов с

вращающимися в горизонтальном положении фракционирующими органами.

Таким образом, анализ механизма процесса фракционирования в гидродинамических аппаратах с вращающимися в горизонтальном положении фракционирующими элементами позволяет констатировать следующее: во-первых, гидродинамический фракционатор данной конструкции не может служить оборудованием для высококачественной очистки макулатурной массы от загрязняющих включений; во-вторых, энергия вращения фракционирующего элемента является одновременно как движущей силой процесса фракционирования, так и причиной ухудшения избирательной способности фракционаторов; в-третьих, энергия вращения фракционирующего органа является причиной возникновения на его рабочей поверхности сдвигового потока с неоднородными полями скоростей и напряжений сдвига, которые ухудшают гидродинамические условия осуществления процесса фракционирования; в-четвертых, наилучшие гидродинамические условия для фракционирования волокнистого материала в гидродинамическом аппарате достигаются при организации на сплошной гладкой рабочей поверхности фракционирующего органа сдвигового потока волокнистой суспензии с однородным полем скоростей и напряжений сдвига; в-пятых, наилучшие гидродинамические условия для организации сдвигового потока с однородным полем скоростей и напряжений сдвига могут быть достигнуты только на сплошной гладкой рабочей поверхности неподвижного фракционирующего органа; в-шестых, движущей силой для организации на сплошной гладкой рабочей поверхности фракционирующего органа сдвигового потока с однородным полем скоростей и напряжений сдвига может служить только энергия, приложенная со стороны волокнистой суспензии.

Вышеприведенные условия реализованы в конструкции гидродинамического фракционатора [1 – 3, 20 – 23, 38], где в качестве фракционирующего органа служит неподвижно установленное в горизонтальном положении дискообразное тело вращения, в котором верхняя сплошная гладкая поверхность по периферии плавно переходит в торроидальную поверхность. Под фракционирующим органом по его периферии и соосно с ним на некотором расстоянии расположены несколько концентрически размещенных емкостей для улавливания фракций волокнистых материалов.

В этом случае движущей силой процесса фракционирования является кинетическая энергия свободной струи волокнистой суспензии, направленной по нормали в центральную часть рабочей поверхности фракционирующего органа. В месте встречи свободной струи волокнистой суспензии цилиндрической формы с преградой (рабочей поверхностью) давление суспензии достигает своего удвоенного значения [15]. Под его воздействием струя растекается по рабочей поверхности равномерным слоем и в виде сдвигового потока движется с большой скоростью в направлении от центра к периферии поверхности. Организованный таким образом сдвиговой поток характеризуется однородным полем скоростей, напряжений сдвига и градиентом скорости, направленным вверх по нормали к рабочей поверхности.

Под воздействием гидродинамических сил происходит процесс разделения волокнистого материала по толщине сдвигового потока в зависимости от степени помола и средней длины волокон таким образом, что поток достигает торроидальной поверхности уже с полным разделением волокнистого материала. При этом самые короткие волокна остаются вблизи рабочей поверхности, самые длинные – вблизи свободной поверхности сдвигового потока. Концентрация волокон увеличивается в направлении от рабочей поверхности фракционирующего органа до свободной поверхности сдвигового потока. На торроидальной поверхности сдвиговой поток распыляется в окружающее фракционирующий орган воздушное пространство в факел, в котором сохраняется такое же расположение волокон, что и в сдвиговом потоке. Распыленная волокнистая суспензия с самыми короткими волокнами, огибая торроидальную поверхность, собирается в емкости для коротковолокнистой фракции, расположенные под фракционирующим органом.

Этот тип оборудования имеет фракционирующий орган диаметром 360 мм, торроидальную поверхность диаметром 60 мм с сопловой насадкой диаметром 15 мм. Суспензия концентрацией до 3 % фракционируется с хорошим разделением волокон на фракции, отличающиеся степенью помола и средней длиной волокна. Причем фракционированию успешно могут быть подвергнуты различные виды волокон (вторичные, полуцеллюлоза, механическая масса и др.) [38]. Избирательная способность по отделению мелких и очень мелких волокон из макулатурной массы в этом случае достигала 70 % и выше. Одновременно с фракционированием волокнистого материала конструкция фракционатора способна осуществлять очистку 40 ... 50 % массы волокнистого материала от загрязняющих включений с эффективностью 85 ... 95 % за счет их перевода в длиноволокнистую фракцию. Однако при повышении производительности гидродинамического фракционатора по сухому волокну до 12 т/сут. качество фракционирования волокнистого материала и очистки его от загрязняющих включений резко ухудшаются из-за возникновения в аппарате сильных воздушных потоков, которые турбулизуют и разрушают внутреннюю структуру факела из распыленного волокнистого материала. Этот существенный недостаток характерен для всех типов конструкций гидродинамических фракционаторов.

Конструкции гидродинамических фракционаторов не нашли широкого применения в промышленности, так как обладали производительностью 10 ... 15 т/сут. Однако теоретическое изучение механизма процесса фракционирования в них дало мощный толчок для создания более совершенного способа центробежно-гидродинамического фракционирования волокнистых материалов, что привело к появлению нового поколения конструкций фракционаторов, предусматривающих организацию процесса разделения волокнистого материала на фракции в закрытых аппаратах без движущихся конструктивных элементов и с очень малыми объемами внутренних полостей, образованных сплошными гладкими поверхностями. Центробежно-гидродинамический способ фракционирования предусматривает разделение волокнистого материала на фракции поперек вращающегося вокруг

своей оси сдвигового потока в зависимости от физических свойств волокон за счет энергетического воздействия на волокна направленных навстречу друг другу гидродинамических и центробежных сил, создаваемых в таком потоке.

Эффективным оборудованием для реализации этого способа является центриклинер, работающий в режиме реверса, с диаметром основания его внутренней конической полости менее 80 мм. Данная конструкция и принцип работы учитывают все предпосылки для организации в конической полости вращающегося вокруг ее оси сдвигового потока волокнистой суспензии и создания направленных навстречу друг другу гидродинамических и центробежных сил.

Движущей силой процесса фракционирования в данном случае является кинетическая энергия потока волокнистой суспензии, подаваемого у верхнего основания по касательной тангенциально к сплошной гладкой поверхности конической полости [27, 33, 42, 55, 79, 80, 98]. При этом организуется вращающийся вокруг оси сдвиговой поток суспензии с однородным полем скоростей и напряжений сдвига. Скорость элементарных слоев сдвигового потока увеличивается от минимальной (вблизи конической поверхности) до максимальной (вблизи оси полости). В том же направлении увеличивается и напряжение сдвига в сдвиговом потоке. Градиент скорости в организованном таким образом сдвиговом потоке волокнистой суспензии направлен по радиусу от периферии потока к оси его вращения.

Во вращающемся вокруг оси конической полости поле сдвигового потока на волокна суспензии действует центробежная сила, направленная по радиусу от оси вращающегося сдвигового потока к его периферии – к поверхности конической полости. При этом интенсивность воздействия центробежной силы на волокна убывает с увеличением радиуса вращения сдвигового потока. Одновременно во вращающемся потоке суспензии под воздействием напряжения сдвига возникает гидродинамическая сила, действующая на волокна в направлении градиента скорости в сдвиговом потоке – по радиусу от периферии сдвигового потока вблизи поверхности конической полости к оси его вращения. Интенсивность воздействия гидродинамической силы на волокна увеличивается с ростом их удельной поверхности.

В результате взаимодействия в сдвиговом потоке противоположно направленных гидродинамических и центробежных сил происходит разделение волокнистого материала поперек сдвигового потока на фракции в зависимости не только от степени помола и длины волокон, но и от величины их удельной поверхности. Мелкие и очень мелкие волокна сосредотачиваются вблизи оси вращающегося сдвигового потока и конической полости, самые длинные и грубые волокна – на периферии потока вблизи поверхности полости.

Загрязняющие включения с меньшей, чем у воды и волокон, удельной плотностью под влиянием совпадающих по направлению действия сепарационных центробежной и гидродинамической сил также пере-

мещаются поперек вращающегося сдвигового потока к его оси и концентрируются в коротковолокнистой фракции. Одновременно загрязняющие включения с большей, чем у воды и волокон, удельной плотностью под действием центробежной силы отбрасываются на периферию вращающегося сдвигового потока к стенке конической полости и, передвигаясь по ней вместе с длинными грубыми волокнами к вершине конической полости, удаляются через выходное отверстие для длиноволокнистой фракции. Коротковолокнистая фракция удаляется через отверстие в центральной патрубке основания центриклинера. В зависимости от технологических требований к волокнистому материалу количество удаляемой коротковолокнистой фракции по сухому волокну регулируется в пределах 10 ... 50 % объемным расходом суспензии из коротковолокнистой фракции.

Избирательная способность фракционатора в сильной степени определяет свойства волокнистого материала подвергнутого процессу фракционирования. Для проведения эксперимента по определению избирательной способности процесса фракционирования был выбран центриклинер фирмы «Baueg» со следующими конструктивными параметрами: диаметр конической полости – 7 ... 6 мм, диаметр отверстия напорного патрубка для выхода коротковолокнистой фракции – 16 мм, диаметр отверстия патрубка для выхода длиноволокнистой фракции – 9 мм. Данные эксперимента представлены в работах [24, 78].

Бумажная масса, полученная из бывших в употреблении гофроящиков, имела степень помола 36 °ШР и содержание мелких (до 0,3 мм) волокон 12,3 %. При проведении эксперимента (давление на входе фракционатора 600 кПа, концентрация массы 0,6 %) были получены фракции: коротковолокнистая, содержащая 12,3 % сухого волокна со степенью помола 71 °ШР; длиноволокнистая со степенью помола 22 °ШР.

Избирательная способность фракционатора Y при данных конструктивных и технологических параметрах

$$Y = \frac{g_1}{g_2} \cdot 100 = \frac{7,38}{12,3} \cdot 100 = 60\%.$$

Здесь g_1 – содержание сухих волокон длиной 0,3 мм в отфракционированной коротковолокнистой фракции, %;

g_2 – масса сухих волокон коротковолокнистой фракции, %.

Эффективное разделение макулатурной массы из гофрокартона на несколько фракций с одновременной очисткой фракций от тяжелых и легких загрязняющих включений достигается на созданном в Канаде центробежно-гидродинамическом фракционаторе [55], состоящем из шести ступеней фракционирования с применением центриклинеров фирмы «Baueg». Избирательная способность аппарата 60 %. Фракции волокнистых материалов используют повторно в производстве гофрированного картона.

Широкое применение данного вида оборудования в промышленности сдерживается требуемой невысокой (0,5 %) концентрацией массы, поступающей на фракционирование. Попытки увеличить этот параметр сопро-

вождались ухудшением качественных показателей фракционирования волокнистого материала.

Основной причиной этого недостатка в конструкции центробежно-гидродинамического фракционатора, где в качестве фракционирующего органа использован центриклинер, является отсутствие возможности реализации необходимого и достаточного условия – организации в рабочей полости центриклинера вращающегося диспергированного ламинизированного сдвигового потока волокнистой суспензии с ориентированными по потоку волокнами и полностью реализованными тиксотропными свойствами. Это условие выполняется только при использовании суспензии с концентрацией 0,1 ... 0,5 %.

Таким образом, фракционирование волокнистой суспензии с концентрацией волокон свыше 0,5 % сопровождается резким ухудшением избирательной способности фракционатора, что обусловлено физической несовместимостью происходящих процессов при повышении концентрации суспензии.

Авторы работ [25, 37] создали более совершенный способ центробежно-гидродинамического фракционирования в дефлокуляторе, выполненном в виде трубопровода определенной длины и диаметра. В отличие от предыдущей концентрации в этом аппарате организован диспергированный ламинизированный сдвиговый поток с ориентированными по потоку волокнами и полностью реализованными тиксотропными свойствами.

Основным преимуществом центробежно-гидродинамических фракционаторов перед другими аппаратами аналогичного назначения является возможность совмещения в них нескольких технологических операций: удаление из волокнистой массы мелких и очень мелких (мельштоф) волокон; фракционирование по длине волокна материалов различного вида; очистка подлежащей размолу длинноволокнистой фракции от загрязняющих включений с плотностью меньшей, чем у воды и волокон; очистка коротковолокнистой фракции от загрязняющих включений с плотностью большей, чем у воды и волокон; сгущение длинноволокнистой фракции перед размолом.

Таким образом, использование центробежно-гидродинамического фракционатора в технологии материалов из вторичного волокна может обеспечить не только упрощение технологической схемы подготовки бумажной массы для повышения качества продукции, но и экономию электроэнергии.

Преимущества нового центробежно-гидродинамического фракционатора перед широко используемым в ЦБП фракционатором типа «Multifraktor» фирмы «Voith» с ситообразным фракционирующим элементом и гидродинамическим фракционатором представлены в таблице.

Новый центробежно-гидродинамический фракционатор состоит из пяти ступеней: первая предназначена для удаления из массы мелких и очень мелких волокон совместно с легкими загрязнениями; вторая – для

Технические характеристики фракционаторов

Характеристика	«Multifraktor» с диаметром отверстий в ситах, мм [26]		Гидродинамический фракционатор [1 – 3, 20 – 23, 38]	Центробежно- гидродинамический фракционатор [6, 24, 37]
	1	2		
Производительность, т/сут.	100...300		15...30	≥ 5...300
Давление на входе, МПа	0,30...0,35		0,42...0,60	0,30...0,60
Концентрация поступающей массы, %	> 3,0		> 3,5	> 3,5
Избирательная способность по мелкому волокну, %	60 20		40...72	76...93
Число фракций, шт.	2		2 и 3	≥ 2
Масса фракционатора, кг	2000...3000		300...400	200...400
Потребление электроэнергии, кВт·ч/т	20 11		30...60	24...50

длинноволокнистой фракции (относительная доля которой примерно 40 %) от тяжелых мелких загрязнений и доочистки коротковолокнистой фракции на вибрационной сортировке с щелевыми ситами. Установка в технологической схеме производства тест-лайнера фракционатора новой конструкции позволит экономить порядка 100 кВт·ч/т сухого волокна.

Анализ изложенного выше показал, что одной из наиболее важных технологий целенаправленного использования качества волокнистой массы с минимальной обработкой является фракционирование. Оно позволяет применять отдельные фракции вторичной массы в соответствии с их бумагообразующими свойствами в композиции различных видов бумаги и картона. Экономически целесообразно соотношение между длинно- и коротковолокнистой фракциями около 40 ... 60 % [90].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 1116771 СССР, МКИ Д21Д 5/02. Устройство для сортирования твердых частиц суспензии / А.В. Яхно. – Оpubл. 1.06.1984.
2. А. с. 1139174 СССР, МКИ Д21Д 5/02. Устройство для сортирования твердых частиц суспензии / А.В. Яхно. – Оpubл. 8.10.1984.
3. А. с. 1522807 СССР, МКИ Д21Д 5/02. Устройство для сортирования твердых частиц суспензии / А.В. Яхно. – Оpubл. 8.10.1984.
4. Барсов В.В. Теория и практика фракционирования целлюлозного волокна. О глубоком отборе мелкого целлюлозного волокна / В.В. Барсов // Тр. ЛТИ ЦБП. Вып. 18. – М.: Лесн. пром-сть, 1965. – С. 37–44.
5. Бибик Е.Е. Реология дисперсных систем. / Е.Е. Бибик. – Ленинград, 1981. – 171 с.
6. Бумагоделательное оборудование: каталог. – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1978. – 206 с.
7. ГОСТ 10700–1997. Макулатура бумажная и картонная. Технические условия.
8. Дулькин Д.А. Мировые тенденции в развитии техники и технологии переработки макулатуры / Д.А. Дулькин [и др.]. – Архангельск: АГТУ, 2002. – 109 с.

9. *Зайцев Б.Г.* Рациональная система приготовления волокнистого материала из макулатуры и новая концепция в создании технологического оборудования нового поколения / Б.Г. Зайцев [и др.] // Создание конкурентоспособного оборудования и технологий для изготовления бумажно-картонной продукции из вторичного волокнистого сырья: науч. тр. 3-й Междунар. научно-техн. конф. – Караваево-Правдинск, 2002. – С. 33–36.

10. *Киселев П.Г.* Гидравлика. Основы механики жидкости / П.Г. Киселев. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.

11. *Климов В.И.* Гидротранспорт волокнистых материалов в целлюлозно-бумажном производстве / В.И. Климов. – М.: Лесн. пром-сть, 1971. – 280 с.

12. *Кугушев И.Д.* Сортирование бумажной массы / И.Д. Кугушев, К.А. Смирнов. – М.: Лесн. пром-сть, 1971. – 200 с.

13. *Ламбергер Э.* Фракционирование макулатуры - средство к управлению качеством и его улучшению / Э. Ламбергер // Материалы фирмы «Voith». – М., 1985. – 15 с.

14. *Линд А.М.* Роль выходного отверстия напорного ящика бумажной машины в формировании бумажного листа / А.М. Линд: // Бум. пром-сть. – 1935. – № 1. – С. 82–92.

15. *Нурок Г.А.* Гидромеханизация горных работ / Г.А. Нурок. – М.: Госгортехиздат, 1959. – 391 с.

16. *Овчинников П.Ф.* Реология тиксотропных систем / П.Ф. Овчинников, Н.Н. Круглицкий, Н.В. Михайлов. – Киев: Наук. думка, 1972. – 120 с.

17. Пат. 86538 Польша, Д21С 5/02. Sposob przerobu makulatury na papier / E. Szwarczstain, K. Przybysz – Publ. 15.11.1976.

18. Пат. 2632999 ФРГ, В01Д 21/26. Verfahren zum Zerlegen einer flüssigen Suspension von festen Partikeln in Fraktionen mit verschiedenen Durchschnittsei – gesellschaften / Annilder: A/S Nizo Atomizer. – Publ. 10.02.1977.

19. Пат. 2037340 Великобритания. Utilizing waste paper / M. Lalak, A. Kostka – Publ. 9.07.80.

20. Пат. 198034 Италия, Д21Д 5/02. Dispositivo per dividere in frazioni le particelle solide di una sospensione / A.V. Yakhno. – Publ. 31.12.85.

21. Пат. 73475 Финляндия, С1. Д21Д 5/00. Anerdning för Klassering av fasta partiktart fraktioner / A.V. Yakhno. – Publ. 30.06.87.

22. Пат. 257556 ГДР, Д21Д 5/02. Vorrichtung zum Sortieren der festen Teilchen einer Suspension / A.W. Jachno. – Publ. 22.06.88.

23. Пат. 259019 ЧСР, С1. Д21Д 5/02. Zařizení pro třídění pevných částic suspenze / A.V. Yachno. – Vydáno 03.01.89.

24. Пат. 2210651 РФ, 7 D 21 D 1/32, G 01 N 33/34. Устройство для определения качества приготовления волокнистого материала / В.Б. Зайцев, М.Д. Овчинников, И.Н. Ковернинский, Н.И. Яблочкин. – Оpubл. 10.08.2004. – Бюл. № 22.

25. Пат. 2210653 РФ, 7 D 21 D 5/18. Способ центробежно-гидродинамической обработки волокнистой суспензии и установка вихревых конических очистителей для его осуществления / В.Б. Зайцев, М.Д. Овчинников, И.Н. Ковернинский, Н.И. Яблочкин. – Оpubл. 10.08.2004. – Бюл. № 22.

26. *Примаков С.Ф.* Технология бумаги и картона / С.Ф. Примаков, В.А. Барбаш, А.П. Шутько. – М.: Экология, 2000. – 304 с.

27. *Смоляницкий Б.З.* Переработка макулатуры / Б.З. Смоляницкий. – М.: Лесн. пром-сть, 1980. – 175 с.

28. *Терентьев О.А.* Гидродинамика волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве / О.А. Терентьев. – М.: Лесн. пром-сть, 1980. – 248 с.
29. *Тотухов Ю.А.* Теоретическая модель реологической характеристики волокнистой суспензии повышенной концентрации / Ю.А. Тотухов, О.А. Терентьев // *Машины и оборудование ЦБП: межвуз. сб. науч. тр., вып. V.* – Ленинград: ЛТА, 1977. – С. 48–50.
30. *Уилкинсон У.Л.* Неньютоновские жидкости / У.Л. Уилкинсон; пер. с англ. З.П. Шульмана. – М.: Мир, 1964. – 216 с.
31. *Форгес О.Л.* Гидродинамическое поведение волокон, применяемых для выработки бумаги / О.Л. Форгес, А.А. Робертсон, С.Г. Мезон // *Основные представления о волокнах, применяемых в бумажной промышленности: материалы симп.* – М.: Гослесбумиздат, 1962. – С. 458–489.
32. *Хертль Э.* Современные установки для массоподготовки / Э. Хертль // *Оборудование и общие концепции: материалы фирмы «Andritz».* – М., 2001. – 20 с.
33. *Чичаев В.А.* Оборудование целлюлозно-бумажного производства Том 1. Оборудование для производства волокнистых полуфабрикатов / В.А. Чичаев. – М.: Лесн. пром-сть, 1981. – С. 244–260.
34. *Шайдуrow Г.Ф.* О вязкости и упругости бумажной массы / Г.Ф. Шайдуrow // *Коллоидный журнал.* – 1955. – Т. XVII, вып. 5. – С. 397–402.
35. *Шульман З.П.* Пограничный слой неньютоновских жидкостей / З.П. Шульман, Б.М. Берковский. – Минск, 1966. – 240 с.
36. *Яблочкин Н.И.* Макулатура в технологии картона / Н.И. Яблочкин, В.И. Комаров, И.Н. Ковернинский. – Архангельск: АГТУ, 2004. – 252 с.
37. *Яблочкин Н.И.* Фракционирование и новый фракционер для повышения эффективности использования вторичного волокна / Н.И. Яблочкин, Д.А. Дулькин, И.Н. Ковернинский // *Теория и технология бумажно-картонной продукции из вторичного волокнистого сырья: науч. тр. 5-й Междунар. научно-техн. конф.* – Правда – Караваево, 2004. – 100 с.
38. *Яхно А.В.* Установка для сортирования волокнистых материалов (гидродинамическая сортировка) / А.В. Яхно // *Совершенствование технологии и оборудования по переработке макулатуры: сб. науч. тр. УкрНИИБ.* – Киев, 1989. – С. 83–94.
39. *Ackermann Ch.* Entfernung von Makro-Stickers bei der Aufbereitung gemischter Altpapiere für die Herstellung von Wellpappenrohpa-pieren / Ch. Ackermann, H.-J. Putz, L. Gottsching // *Wochenblatt für Papierfabrikation.* – 2000. – N 7. – S. 410–418.
40. *Andersson O.* Some Observation on fibre suspensions in turbulent motion / O. Andersson // *Svensk Papperstidning.* – 1966. – Vol. 69, N 2. – P. 23–31.
41. *Blechschi-dt Y.* Morphologische und chemische Eigenschaften von Altpapierstoffen / Y. Blechschi-dt, Y. Vogel // *Zellstoff und Papier.* – 1981. – N 3. – S. 113–118.
42. *Bliss T.* A study of fiber fractionation using centrifugal cleaners / T. Bliss // *Masters Thesis.* – Miami University, 1983.
43. *Bliss T.* Pulp fractionation can benefit multiplayer paperboard operations / T. Bliss // *Pulp and Paper.* – 1987. – N 2. – P. 104–107.
44. *Bliss T.* Through-flow cleaners of fer good efficiency with low pressure drop / T. Bliss // *Pulp and Paper.* – 1985. – N 69/3. – P. 131–135.
45. *Boettohet P.C.* Paper presented at 1986 Tappi Pulping Conference / P.C. Boettohet. – Toronto, 1986.

46. *Bugliarello G.* Rheological models and laminar flow of fiber suspensions / G. Bugliarello, J.W. Daily // *Tappi*. – December, 1961. – Vol. 44, N 12. – P. 881–893.
47. *Carlsson G.* Hornification of Cellulosic fibers during wet pressing / G. Carlsson, T. Lindstrom // *Svensk Papperstidning*. – 1984. – T. 87, N 15. – P. 119–125.
48. *Condolios E.* Strömung von Faserstoff – Suspensionen durch Rohrlitungen / E. Condolios, J. Constans // *Allgemein Papier Rundschau*. – 1964. – N 3. – S. 136–138.
49. *Gottsching L.* Faserfraktionierung mit Hilfe hydrodynamischer Kräfte – Eine Studie über den Johnson-Fraktionator / L. Gottsching, L. Stürmer // *Wocheublat für Papier – fabrication*. – 1975. – 103, N 11–12. – S. 372–381.
50. *Daily J.W.* Basic data for dilute fiber suspensions in uniform flow with shear / J.W. Daily, G. Bugliarello // *Tappi*. – 1961. – Vol. 44, N 7. – P. 497–512.
51. Der Johnson-Fraktionator und einige seiner Einsatzmöglichkeiten in der Zellstoff und Papierindustrie // *Das Papier*. – 1973. – T. 27, N 3. – S. 105–107.
52. *Forgacs O.L.* The hydrodynamic behaviour of papermarking fibres / O.L. Forgacs, A.A. Robertson, S.G. Mason // *Pulp and Paper Magazine of Canada*. – 1958. – Vol. 59, N 5. – P. 117–128.
53. *Gavelin G.* Time to take another look at mechanical pulp fractionation / G. Gavelin // *Paper Trade Journal*. – 1971. – Vol. 155, N 44. – P. 40–42.
54. *Hemström G.* Boundary layer studies in Pulp suspension flow / G. Hemström, K. Moller, B. Norman // *Tappi*. – 1976. – Vol. 59, N 8. – P. 115–118.
55. *Ho Sheau-Ling.* Fibre fractionation in hydrocyclones / Ling Ho Sheau, T. Rehmat, R. Branion // 86th Annu. Meet. PAPTAC, Montreal, Febr. 1-3, 2000. – Montreal: Pulp and Pap. Techn. Assoc. Can., 2000. – P. 193–215.
56. *Klungnes J.H.* Disc separation wetting angle differences / J.H. Klungnes // *Tappi Journal*. – 1987. – July. – P. 125–127.
57. *Klungnes J.H.* Fiber separation with vaneless spinning Disc: Application / J.H. Klungnes, A.R. Oroskar, J. Crosby // *Tappi Journal*. – June. – P. 78–82.
58. *Leblanc P.* Fractionation of Secondary Fibers / P. Leblanc, R. Harrison // *Tappi*. – 1975. – Vol. 58, N 4. – P. 85–87.
59. *Lindgren K.* How to screen Waste Paper Stock / K. Lindgren // *Paper Trade Journal*. – 1955. – Vol. 139, N 17. – P. 33.
60. *Lindgren K.* Modern Pulp screening equipment and systems / K. Lindgren // *Paper Trade Journal*. – 1955. – Vol. 139, N 13. – P. 30–37.
61. *Lindgren K.* New Development in groundwood Pulp Screening / K. Lindgren // *Paper Trade Journal*. – 1955. – Vol. 139, N 16. – P. 33–34.
62. *Lindsay M.* High-consistency screening guts Equipment costs / M. Lindsay // *Pulp and Paper*. – 1984. – Vol. 56, N 3. – P. 80–82.
63. *Mc-Kee R.C.* Effekt of repulping on sheet properties and fiber characteristics / R. C. Mc-Kee // *Paper Trade Journal*. – 1971. – Vol. 155, N 24. – P. 34–40.
64. *Menges W.* Einsatz und Funktion im Praktischen Betrieb T. II. / W. Menges // *Wochenblatt für Papierfabrikation*. – 1982. – N 11/12. – S. 374–379.
65. *Menges W.* Wastepaper fiber fractionation is the key at PWAs Redenfelden mill / W. Menges // *Pulp and Paper*. – 1984. – N 58. – P. 118–122.
66. *Mih W.* Velocity profile measurements and a phenomenological description of turbulent fiber suspension pipe flow / W. Mih, J. Parker // *Tappi*. – May, 1967. – Vol. 50, N 5. – P. 237–246.
67. *Mitra R.* Description and operating experience of an optimized and fully automated stock preparation system / R. Mitra // *Pulp and Paper*. – 1985. – N 87/5. – P. 51–55.

68. *Moller K.* Dickstoffsartierung mit Sprühverfahren / K. Moller [et al.] // Wocheblatt für Papierfabrikation. – 1978. – N 11/12. – S. 445–448.
69. *Moller K.* High-consistency pulp fractionation with an atomizer / K. Moller [et al.] // Tappi. – 1980. – Vol. 63, N 9. – P. 89–91.
70. *Moller K.* Schreening cleaning and fractionation with atomiser. / K. Moller [et al.] // Paper Technology and Yndustry. – 1979. – Vol. 20, N 3. – P. 110–114.
71. *Musselmann W.* Die Fraktionierung von Fasserstoffen aus Altpapier W. Musselmann // Wochenblatt für Papierfabrikation. – 1978. – N 6. – S. 242–377.
72. *Musselmann W.* Die Sortierung von Altpapier im Bereich mittlerer Stoffdichte. Betriebserfahrungen mit Contaminex und Turbosorter / W. Musselmann, W. Menges // Wochenblatt für Papierfabrikation. – 1983. – N 11/12. – S. 376 – 388.
73. *Musselmann W.* Grundlagen, Einflussgrößen der Fraktionierung und Eigenschaften der Fraktionen. T. I / W. Musselmann // Wochenblatt für Paperfabrikation. – 1982. – N 11/12. – S. 368–373.
74. *Musselmann W.* Konzept und Funktion einer Altpapierfaserfraktionierungsanlage und Erfahrungen im praktischem Betrieb / W. Musselmann, W. Menges // Wochenblatt für Papierfabrikation. – 1982. – N 11/12. – S. 368–379.
75. *Nordman L. S.* The Determination of Fiber Length Distribution in Connection with Beating Research / L.S. Nordman, J.A. Niemi // Tappi. – 1960. – Vol. 43, N 3. – P. 260–266.
76. *Olgard G.* Fractionation of fiber suspensions by liquid column flow / G. Olgard // Tappi. – 1970. – Vol. 53. – P. 1240–1246.
77. *Pakarinen H.* Papermaking science and technology. Book 7. Recycled fiber an deinking / H. Pakarinen, L. Gottsching. – Finland: Jyvaskila, 2000.– 649 p.
78. Pat. 2,878,934. Cl. 209-211USA. Method and Apparatus separating dirt from Aqueous Suspensions of Pulp Fibers. / G.H. Tomlinson. – Publ. 24.03.59.
79. Pat. 3,085,927. Cl. 162-55 USA. Process for preparation of fibers having differing characteristics / A.W. Pesch, D. Ala– Pr. 16.05.63.
80. Pat. 3,301,745. Cl. 162-55 USA. Pulp processing method for mixed cellulosic materials / C. Sydney, P. Ridiey, B. Ralph – Pr. 31.01.67.
81. Pat. 3363759 USA, MKU 209-273. Screening apparatus with rotary Pulsing member / Y. C. Pounder. – Publ. 16.01.68.
82. *Raij U.* An experimental ynvestigation of paper pulp stock flow in a straight pine / U. Raij, D. Wahren // Svensk Papperstidning. – 1964. – Vol. 67, N 5. – P. 186 – 195.
83. *Ranhagen G.* How to screen sulphite pulp / G. Ranhagen // Paper Trade Journal. – 1954. – Vol. 138, N 1. – P. 19–22.
84. *Rienecker R.* Sortierung von Altpapierstoff zur Herstellung von graphischen Papieren / R. Rienecker // Wochenblatt für Papierfabrikation. – 1997. – N 23/24. – S. 1149–1159.
85. *Sanders H.T.* Consistency distributions in turbulent tube flow of fiber suspensions / H.T. Sanders, H. Meyer // Tappi. – May, 1971. – Vol. 54, N 5. – P. 722–730.
86. *Sandgren B.* Studies on pulp Crill / B. Sandgren, D. Wahren // Svensk Papperstidning. – 1960. – T. 63, N23. – P. 854–858.
87. *Selder H.* Faser fraktionierung-ein neuer Weg zur Optimierung der Papierqualität bei gleichzeitiger senkung der Rohstoff und Energiekosten / H. Selder // Paper. – 1984. – N 29/9. – S. 435–440.
88. *Selder H.* The escher wyss fibersorter for the high density screening of recycled fibres / H. Selder, W.H. Siewert // Materials of conf. Tappi. – Seattle, 1980.

89. *Siewert W.H.* Funktion und Bedeutung eines neuartigen Endstufensortierers für die Stiffaufbereitung / W.H. Siewert // Sonderdruck aus der Zeitschrift «Das Papier». – 1983. – N 10. – S. 1–8.

90. *Siewert W.H.* Потенциал улучшения качества макулатурной массы / W.H. Siewert // Wochenblatt für Papierfabrikation. – 1996. – N 6. – С. 217–220.

91. *Skali Lami S.* Ecoulement de pate a papier en conduite floculation et turbulence / S. Skali Lami, G. Cagnet, D. Quemada // Journal de Mecanique Theorione et Appliquie. – 1985. – P. 253–266.

92. *Souček M.* Změny Vlastnosti Vlákén při mleti / M. Souček // Papir a celuloza. – 1965. – S. 17–19.

93. *Strazdins E.* Conenical Aids can Effect Strenct loss secondary Fiber Furnish usd / E. Strazdins // Pulp Pappé. – 1984. – N 3. – P. 73–77.

94. *Stürmer Z.* Physikalische Eigenschaften von Sekundäкафыкыещааут under dem Einfluss ihrer Vorgeschichte. Т. III. Einflussy der Papierherstellung (Zustand der Primärfaserstoffe, Hilfstoffe, Blattbildung, Trocknung) / Z. Stürmer, L. Göttsching // Wochenblatt für Papierfabrikation. – 1979. – N 3. – S. 69–78.

95. *Szwarczajtajn E.* Einige Aspekte der Fraktionierung von Zellstoff und Altpapier / E. Szwarczajtajn, K. Przybyez // Das Papier. – 1975. – Heft 7, Т. 29. – S. 295–300.

96. *Under E.* Zur morphologischen Bewertung von Altpapierstoffen mit der Siebanalyse / E. Under, F. Freund // Zellstoff und Papier. – 1976. – N 3. – S. 76–82.

97. *Weber A.* Fasserfraktionierung mit dem Cellusizer / A. Weber // Wochenblatt für Paperfabrikation. – 1978. – N 8. – S. 309–311.

98. *Wood R.* Distribution of fibre specific surfase of papermarking pulps / R. Wood, A. Karnis // Pulp and Paper. – 1979. – N 4. – P. 73–79.

99. *Yngmanson W.L.* [et. al.] // Tappi. – 1959. – Т. 42, N 1. – P. 29.

ОАО «Караваево»

Архангельский государственный
технический университет

ОАО «Вторресурсы – Караваево»

ОАО «Полотняно-заводская бумажная фабрика

Поступила 25.11.04

N. I. Yablochkin, V.I. Komarov, I.N. Koverninsky, D.A. Dulkan

Fractionating of Secondary Fiber in Centrifugal-hydrodynamic Fractionator

The necessity of secondary fiber fractionating in the process flowsheets for preparing waste paper mass and problems related to this task are considered; the operational efficiency of the new design of centrifugal-hydrodynamic fractionator is compared to the existing ones.
