

# Ц Б К

*Pulp*

## еллюлоза

*Paper*

## умага

*Board*

## артон

02 [2010]

- **Новый завод в Коряжме.**
- **Российская ЦБП. Взгляд “со стороны”**
- **Сообщают корреспонденты “ЦБК”:**  
**Окуловка; Тульская область...**
- **Наше интервью.**
- **Наука и технология.**
- **Представляют зарубежные поставщики.**
- **Приглашение в Хельсинки.**
- **Конференции, семинары, выставки...**
- **Логистика – продолжение рубрики.**
- **Особенности ЦБП Финляндии.**

СПЕЦИАЛЬНЫЙ  
НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ  
ЦЕНТР  
С-Петербург, ул.Лавана Черных, 4

УДК 676:628  
ББК 35.77

# Резервы водосбережения при реконструкции сульфатно-целлюлозных заводов

Ю. Г. Мандре, к. т. н.,  
технический директор  
ООО «Илим Тимбер Индастри»;  
М. В. Коваленко, к. т. н., доцент,  
Н. В. Виноградов,  
Э. Л. Аким, д. т. н., профессор,  
СПб ГТУ РП

Глобальный экономический и финансовый кризисы отодвинули на неопределенный срок реализацию многочисленных проектов строительства в России новых ЦБК. Строительство нового целлюлозно-бумажного производства в регионах с недоиспользованными лесными ресурсами требует концентрации очень больших необходимых материальных, инженерных, строительного-монтажных, кадровых и т. п. ресурсов. Все это – очень сложная и дорогостоящая задача.

В то же время в России развивается внутренний рынок, что привело к торговому дефициту по бумаге и картону, достигшему в 2008 году свыше двух млрд долларов [1]. Эти данные показывают, что при сохранении конкурентоспособности российские предприятия имеют достаточно устойчивые перспективы, прежде всего на внутреннем рынке. С этой точки зрения гораздо эффективнее и безопаснее реконструировать действующие предприятия. Там уже имеется необходимая инфраструктура,

есть коллектив специалистов, налажены производственные связи с поставщиками сырья, материалов, выстроены логистические схемы транспортировки огромных потоков сырья и готовой продукции. Реконструкция действующих предприятий становится, в связи с этим, доминирующим направлением развития российской ЦБП. Еще один аспект реконструкции – проблема «моногородов», так как многие из существующих предприятий ЦБП являются градообразующими. Сохранение их конкурентоспособности связано с решением важнейшей социальной задачи – сохранением рабочих мест.

Однако, если при проектировании нового целлюлозно-бумажного комплекса можно сразу предусмотреть современный набор передовых технических, технологических и экологических решений, и подобрать соответствующий современным требованиям набор технологического оборудования, то при реконструкции действующего производства провести такую работу на порядок сложнее. Необходимо обеспечить такие условия, при которых оборудование, которое остается в работе, и новое оборудование совместно обеспечивали бы технологические параметры, соответствующие современным заводам.

К тому же реконструкция может осуществляться (и, как правило, осуществляется) поэтапно. При этом на каждом этапе должно обеспечиваться до-

стижение технических, экологических и экономических результатов.

Мировые тенденции перехода к «зеленой экономике» [2] проявляются при реконструкции ЦБК через тенденции ресурсосбережения, прежде всего, энерго- и водосбережения. При этом целесообразно учитывать, что проблема воды резко обострится в ближайшие годы.

В результате, одним из ограничений при расширении действующих предприятий могут стать проблемы, связанные с их водообеспечением, а также с качественными и количественными параметрами очищенных сточных вод при сбросе.

**При этом возникают два основных вопроса:**

**Какой объем загрязнений и стоков достигим без применения каких-либо сверхсложных и дорогих технических решений?**

**Какой объем загрязнений и стоков не вызовет нарушений в способности окружающей среды к самоочищению?**

Ответ на эти вопросы следует, однако, давать, учитывая не только региональную, но и общемировую ситуацию с пресной водой.

Как известно, вода является основой жизни на планете. Беспристрастная мировая статистика свидетельствует о том, что более одного млрд человек имеют устойчивого доступа к чистой воде. Кроме того, более 40 % населения

планеты живет в районах, испытывающих среднюю или острую нехватку воды, и такое положение продолжает ухудшаться. Эксперты ООН полагают, что к 2025 г. приблизительно 2/3 населения Земли (около 5,5 млрд человек) будет жить в районах, сталкивающихся с нехваткой воды. В начавшемся, казалось бы, не так давно XXI веке, по данным, опубликованным совместно **Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ)**, и **ЭК ООН** [4], уже 100 млн европейцев не имеют доступа к чистой питьевой воде. Десятки миллионов европейцев живут в домах без водопровода. В странах Восточной Европы 16 % населения не имеют в доме воды. В докладе ООН о состоянии водных ресурсов в [3] показано, что в ближайшие годы наступит небывалый по масштабам кризис водных ресурсов. Главный вывод доклада заключается в том, что водные ресурсы планеты будут постоянно уменьшаться в результате роста численности населения, загрязнения окружающей среды и климатических изменений.

Не вызывает сомнения, что, хотя повышенные выбросы от производств пока не оказывают существенного влияния на экономическую устойчивость предприятий, вопросы рационального использования воды в производстве будут в самое ближайшее время определять не только экологический имидж предприятия, но будут все больше становиться категорией экономической.

В предлагаемой статье и речь пойдет о том, каким образом можно подходить к анализу и выбору технических решений при планировании реконструкции.

В России серьезной реконструкции на большинстве предприятий ЦБП практически не проводилось. Поэтому обобщенного отраслевого опыта разработки программ технического перевооружения, учитывающих, кроме производственных и экономических результатов, также и экологические улучшения, не накоплено. Каждое предприятие вынуждено самостоятельно разрабатывать точечные мероприятия на

отдельных участках производства или обращаться за консультациями к поставщикам оборудования и технологии. При таком подходе в качестве технического задания заказчиками выдаются требуемые показатели производства (производительность, тип продукции и некоторые технологические условия), а показатели водопотребления, объемы выбросов и сбросов, объемы энергопотребления выдаются поставщиками как следствие выбранных технологических решений и оборудования, и соответствующие современному уровню достижений технологии.

Практики комплексного управления набором технических решений, корректировки конфигурации производств с целью добиться, кроме производственных и экономических показателей также и минимизации возможных экологических нагрузок, практически нет.

Исключением, пожалуй, можно назвать первый этап инвестиционной программы **Светогорского ЦБК** в период 2000 – 2004 гг. и реализацию проекта строительства на этом комбинате производства БХТММ [4].

При разработке конфигурации производства поставщикам оборудования, наряду с требованиями по показателям производства, были также добавлены требования о сохранении уровня загрязнений в сбросе с комбината на неизменном уровне. Другими словами, дополнительные объемы производства бумаги и целлюлозы, а также ввод нового производства БХТММ не должны были увеличить экологическую нагрузку на окружающую среду. Для этого, параллельно с разработкой основных технических решений по основному производству (БХТММ) и выбором решений по организации локальных очистных установок, были также разработаны и внедрены мероприятия по снижению нагрузки на действующие сооружения биологической очистки стоков и модернизации очистных сооружений.

В этом состоит принципиальная разница в подходе к модернизации производства.

При принятии окончательного решения по конфигурации, типу применяемого оборудования заказчиком оценивались не только стоимость оборудования и эксплуатационные затраты, но и возможности оборудования и технологии обеспечить необходимый уровень загрязнений от производства.

Конечно, при этом управление производством становится сложнее, так как для удержания показателей производства и сохранения низкого уровня загрязнений в сбрасываемых стоках требуется гораздо более высокий уровень технологической дисциплины, чем это принято на большинстве предприятий.

К сожалению, на некоторых предприятиях до сих пор сохраняется отношение к очистным сооружениям и другим природоохранным системам (газоочистные установки, локальные системы очистки и т. п.) как к второстепенным системам, затрудняющим выполнение производственной программы и не приносящим доходов.

На самом же деле расход и загрязненность стоков предприятия напрямую характеризуют уровень потерь сырья и химикатов, а также затрат энергии на производство, а стало быть общую эффективность производства и его культуру. Иными словами, не могут быть экономически эффективными предприятия с высоким уровнем удельных показателей по расходу воды на производство, количеству загрязнений в стоках, удельных затрат тепловой энергии.

В связи с этим, при планировании любой реконструкции необходимо провести анализ проектных решений действующего производства, определить причины отклонений фактических показателей работы производства от проектных и провести анализ возможностей достижения проектных и планируемых показателей. Кроме того, необходимо проанализировать влияние реконструкции на работу смежных участков производства (об этом упоминалось в статье [5]).

Если этого не делать, то возникает серьезный риск неосвоения планируемых показателей или потребность в следующих этапах реконструкции на смежных участках из-за разбалансированности работы.

Ну и, наконец, еще один важный момент. Как правило, в качестве технического задания для разработки проекта реконструкции какого-либо производства используются или среднеотраслевые Нормативы водо- и энергопотребления, потребления химикатов, удельного сброса и выброса загрязняющих веществ или нормативы, рассчитанные от разрешенного объема сбросов в водоем.

Мировые тенденции по сопоставлению с наилучшими существующими технологиями (НСТ или BAT), хотя и предусматриваются новым российским экологическим законодательством, однако, на практике не применяются из-за неразработанности подзаконных актов (по последним данным, переход на сопоставление с наилучшими существующими технологиями в России планируется завершить к 2016 году). Для того, чтобы получить ответ на вопрос: «Какие нормативы справедливы и достижимы для данного предприятия?», достаточно провести анализ возможностей каждого производственного цикла с учетом возможностей различных типов оборудования и вариантов конфигурации системы водопользования всего производства.

Пример (естественно упрощенный) такого анализа мы приводим ниже. Для этого в качестве базовых вариантов промывного оборудования выбраны традиционные вакуум-фильтры, обеспечивающие сухость около 10%, и промывные прессы, дающие сухость 30% [6].

Большинство процессов, происходящих при производстве продукции ЦБП, проводится в водной среде. В зависимости от конфигурации производства, вида производимой продукции (целлюлоза белая или небеленая, бумага, картон и их сочетания) техно-

логи по-разному выделяют основные и вспомогательные производства.

В данной статье для удобства рассуждений рассматривается производство товарной белой сульфатной целлюлозы, как наиболее крупномасштабное производство волокнистых полуфабрикатов.

#### Основными процессами производства будем считать:

Варочно-промывное производство.  
Отбельное производство.  
Сушильное производство.  
Выпаривание щелоков.  
Содорегенерационное производство.  
Производство белого щелока и регенерации извести.

#### Вспомогательные производства:

Древесно-подготовительное производство.  
Производство белящих реагентов.  
Очистка загрязненных конденсатов.  
Энерго-хозяйство.  
Станция биологической очистки сточных вод.

### Варочно-промывной цех

Рассмотрим упрощенную схему варочно-промывного цеха (рис. 1). Сразу оговоримся, что в качестве промывной жидкости для промывки небеленой целлюлозы должен применяться очищенный конденсат от упаривания щелоков. Применение для этих целей свежей горячей воды представляет собой непозволительную роскошь. Кроме того, мы не показываем поток выведения отходов сортирования небеленой целлюлозы (потери органических веществ в стоки должны быть незначительными при нормальной организации утилизации отходов; при этом расход жидкости по сравнению с общим расходом стоков достаточно мал. В то же время, потери органических веществ при ненормальной организации утилизации отходов могут оказаться значительными).

Из рис. 1 видно, что в зависимости от применяемого на последней ступени

промывки оборудования количества промывной жидкости, подаваемой на последний аппарат противоточной промывки, может значительно отличаться.

В статье [6] об отравлении технологических схем при промывке целлюлозы было показано, что в промывном аппарате по возможности следует держать как можно более высокую концентрацию массы. Это позволяет сохранить разумный фактор разбавления (превышение количества промывной жидкости, содержащейся в промываемой массе) и необоснованно не увеличивать нагрузку на выпарную установку.

В дальнейшем при рассмотрении баланса жидкости выпарной установки мы увидим, что излишняя гидравлическая нагрузка приводит не только к увеличению затрат энергии на упаривание черного щелока, но и вносит существенный дисбаланс в общую схему водооборота завода.

На современных заводах в варочно-промывном цехе производится вторая стадия делигнификации с помощью кислородно-щелочной отбелки. Подача каустика и (иногда) пара на подогрев массы перед этой ступенью увеличивают удельное количество щелока, отбираемого из варочного котла. В данной статье, однако, для упрощения мы не будем учитывать это количество.

Таким образом, общий баланс технологической жидкости варочно-промывного цеха в представленных схемах выглядит следующим образом (см. таблицу).

● Входящие потоки – влага со щелой –  $2 \text{ м}^3/\text{т}$ , белый щелок на варку –  $5 \text{ м}^3/\text{т}$ , промывная вода на последнюю ступень промывки –  $10 \text{ м}^3/\text{т}$  (в случае применения на последней ступени промывки промывного фильтра с концентрацией выходящей массы – 10%) или  $3,5 \text{ м}^3/\text{т}$  (в случае применения на последней ступени промывки промывного прессы с концентрацией выходящей массы – 30%). Итого:  $17 \text{ м}^3/\text{т}$  или  $10,5 \text{ м}^3/\text{т}$ .

● Выходящие потоки – черный щелок на упаривание –  $9 \text{ м}^3/\text{т}$ , влага с промывной массой –  $9 \text{ м}^3/\text{т}$  или  $2,5 \text{ м}^3/\text{т}$  (в

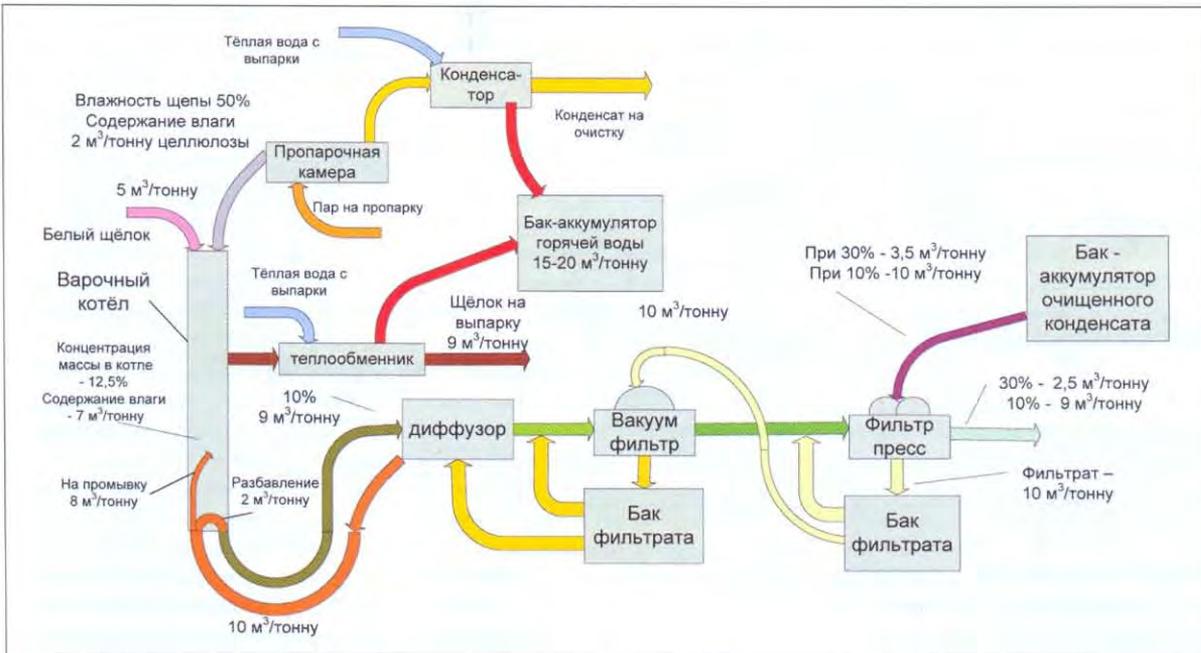


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема варочно-промывного цеха

зависимости от концентрации массы с последней ступени промывки). Итого: 18 м³/т или 11,5 м³/т.

Разница в 1 м³/т обусловлена переходом органических веществ древесины в раствор.

При данном рассмотрении баланс сходится. Однако в реальном производстве в каждый момент времени практически очень редко совпадает расход входящей в процесс и выходящей из процесса жидкости (из-за наличия большого количества баков фильтрата на всех ступенях промывки и баков хранения массы между ступенями и производствами). В результате:

- Во время снижения уровня массы в емкостях хранения массы между ступенями промывки нагрузка по массе на промывку превышает производительность варочного котла. Вследствие этого увеличивается удельный расход промывной воды на промывку по сравнению с отбором щелока, отбираемого с варочного котла на выпарную станцию. При этом открыва-

Влияние типа промывного оборудования последней ступени промывки на баланс жидкости варочно-промывного цеха, м³/т		
Потоки	При использовании	
	Вакуум-фильтра (концентрация выходящей массы 10%)	Промывного пресса (концентрация выходящей массы 30%)
<b>Входящие потоки</b>		
Вода со щепой	2	2
Белый щелок на варку	5	5
Промывная вода на последнюю ступень промывки	10	3,5
<b>Итого</b>	<b>17</b>	<b>10,5</b>
<b>Выходящие потоки</b>		
Черный щелок на упаривание	9	9
Вода с промытой массой	9	2,5
<b>Итого</b>	<b>18</b>	<b>11,5</b>

ется подача свежей воды в бак запаса промывной жидкости.

- Во время повышения уровня массы в емкостях хранения массы между ступенями промывки, нагрузка по массе на промывку оказывается ниже производительности варочного котла.

Вследствие этого уменьшается удельный расход жидкости на промывку по сравнению с удельным расходом щелока, отбираемого с варочного котла на выпарную станцию. При этом, как правило, происходит перелив воды из бака запаса промывной жидкости.

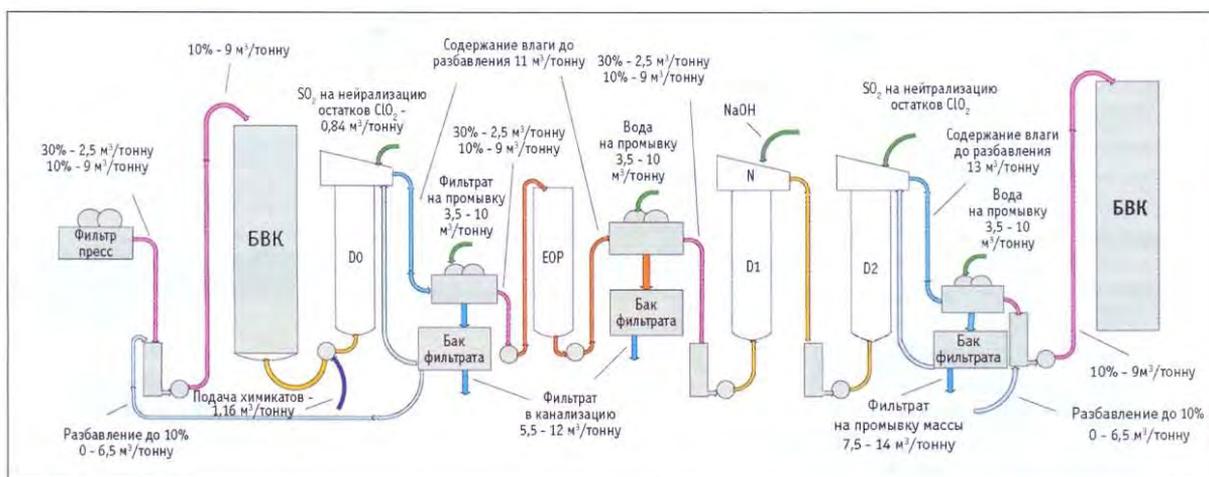


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема отбельного цеха

Отбор черного щелока из котла производится при температуре варки, т. е. с температурой в диапазоне 140–160 °С. Поэтому перед подачей в баки слабого черного щелока выпарной станции щелок охлаждается. Охлаждение осуществляется за счет вскипания в расширительных циклонах с последующей конденсацией паров вскипания, за счет охлаждения на теплообменниках или комбинированием обоих способов.

Для конденсации паров вскипания и подачи в теплообменник обычно используется теплая вода (температура 35–40 °С) с конденсаторов выпарной станции. Таким образом, при охлаждении щелока образуется от 15 до 20 м³/т горячей воды температурой 60–70 °С.

Направление использования этой воды на различных заводах различное. На некоторых производствах ее используют в качестве промывной воды в отбельном цехе или на промывку небеленой целлюлозы. Такое решение не всегда целесообразно. Как правило, на заводе и так образуется большой избыток теплой воды. Поэтому лучше использовать избыточное тепло щелока для упаривания. Это позволит сократить расход свежего пара на данные цели. Отметим, что за исключением потерь фильтрата с отходами сортирования небеленой целлюлозы других заг-

рязненных органикой стоков в варочно-промывном цехе быть не должно.

Свежая (или чистая теплая) вода, если применяется для охлаждения щелока и конденсации паров вскипания, в сток не попадает.

## Отбельное производство

Для рассмотрения примем одну из схем отбели, которая применяется на заводах, оснащенных хорошей промывкой небеленой целлюлозы и кислородно-щелочной отбелкой в варочно-промывном цехе (рис. 2).

Последовательность отбели выглядит следующим образом: двуокись хлора (D0) – щелочение с пероксидом водорода и кислородом (EOP) – двуокись хлора (D1) – нейтрализация в верхней части башни (N) – двуокись хлора (D2).

Рассмотрение отбельного производства мы начнем с выхода массы с последней ступени промывки в бассейн высокой концентрации (БВК) хранения промывной небеленой массы.

В случае, если в качестве последней ступени применяется вакуум-фильтр, количество влаги, поступающее с промывкой массой в бассейн высокой концентрации, при концентрации 10% составляет 9 м³/т.

В случае, если в качестве последней ступени применяется промывной пресс, содержание жидкости в выходящей массе составит 2,5 м³/т. При этом перед подачей массы в БВК ее необходимо разбавить до концентрации 10–12%.

Примем расход двуокиси хлора на первую ступень – 7 кг на тонну целлюлозы. При концентрации двуокиси хлора в растворе – 6 кг на тонну расход жидкости составит 1,16 м³/т, а в случае нейтрализации остатков двуокиси хлора раствором SO<sub>2</sub> – до 2 м³/т. Таким образом, из отбельной башни на промывку поступает 11 м³ жидкости на тонну целлюлозы.

Будем считать, что концентрация массы с промывочного фильтра после ступени D0 составит 10%. Таким образом, на промывку потребуется 10 м³/т целлюлозы.

В случае если в качестве промывочного аппарата применить промывной пресс, то на промывку потребуется 3,5 м³/т целлюлозы.

Баланс жидкости на промывке после первой ступени отбели выглядит следующим образом:

- Входящие потоки – жидкость с промывкой массой с последней ступени промывки небеленой целлюлозы – 9 м³/т, или 2,5 м³/т, жидкость с химикатами – 2 м³/т, жидкость на промывку – 10 м³/т или 3,5 м³/т. Итого – 21 м³/т или 8 м³/т (в зависимости от типа применяемых в схеме промывочных аппаратов).

● Выходящие потоки: жидкость в промытой массе  $9 \text{ м}^3/\text{т}$  или  $2,5 \text{ м}^3/\text{т}$ , избыток фильтрата в сток –  $12 \text{ м}^3/\text{т}$  или  $5,5 \text{ м}^3/\text{т}$ . Потоки (фильтрат на разбавление перед БВК –  $0 - 6,5 \text{ м}^3/\text{т}$ , разбавление перед промывным аппаратом) используемые на разбавление внутри ступени, на баланс не влияют.

Для экономии места балансы следующих ступеней в статье детально не разбираются. Для ступени ЕОР можно принять такой же баланс, а совместный баланс ступеней D1 – N – D2 будет отличаться в большую сторону за счет введения большего количества химикатов. Примем объем жидкости, поступающей с химикатами на ступени D1 – N – D2 –  $4 \text{ м}^3/\text{тонну}$ .

Баланс жидкости для этих ступеней будет выглядеть следующим образом:

● Входящие потоки: жидкость с промытой массой –  $9 \text{ м}^3/\text{т}$ , или  $2,5 \text{ м}^3/\text{т}$ , жидкость с химикатами –  $4 \text{ м}^3/\text{т}$ , жидкость на промывку –  $10 \text{ м}^3/\text{т}$  или  $3,5 \text{ м}^3/\text{т}$ . Итого:  $23 \text{ м}^3/\text{т}$  или  $10 \text{ м}^3/\text{т}$ .

● Выходящие потоки: жидкость в промытой массе –  $9 \text{ м}^3/\text{т}$  или  $2,5 \text{ м}^3/\text{т}$ , избыток фильтрата в сток –  $14 \text{ м}^3/\text{т}$  или  $7,5 \text{ м}^3/\text{т}$ .

Теперь необходимо поговорить о том, какая вода применяется для промывки целлюлозы на ступенях, каковы возможности использования фильтратов со ступеней отбелки, и как при этом может меняться общий баланс воды отбелочного производства.

Если в качестве промывной жидкости применять свежую воду, то для нашей схемы в зависимости от типа промывного оборудования потребность в свежей воде составит  $30 \text{ м}^3/\text{т}$  или  $10,5 \text{ м}^3/\text{т}$  (в зависимости от типа промывных аппаратов).

Сокращение количества промывной воды за счет уменьшения фактора разбавления крайне нежелательно, так как ухудшение качества промывки на любой из ступеней, а особенно на ступени ЕОР приведет к увеличению удельного расхода химикатов и к ухудшению качества готовой продукции [6].

Способы уменьшения удельного расхода свежей воды на отбелку следующие:

● Применение элементов противоточной промывки. В частности, учитывая

то, что две последние ступени отбелки не являются делегнифицирующими, и не содержат большой объем органических загрязнений, фильтрат последней ступени стоит использовать в качестве промывной жидкости для промывки после первой ступени (D0) и на разбавление перед ступенью D1 (в случае использования промывного пресса на ступени ЕОР). Избыток можно применять в качестве промывной жидкости на последние spryski промывного аппарата ступени ЕОР (на первые spryski должна подаваться чистая вода). При использовании в качестве промывного аппарата промывного пресса нельзя подавать избыток фильтрата на промывку и на разбавление небеленой массы перед подачей в БВК (в случаях, когда это требуется). Таким образом, расход свежей воды может быть снижен уже на  $10 \text{ м}^3/\text{т}$ .

● В случаях, когда планируется реконструкция, следует выбирать промывное оборудование с максимально возможной концентрацией массы в зоне промывки.

● Вместо свежей воды на промывку в последней ступени в отбельном цехе можно подавать оборотную воду из сушильного цеха. При этом в зависимости от установленного оборудования, можно сэкономить еще от  $3,5 \text{ м}^3/\text{т}$  до  $10 \text{ м}^3/\text{т}$ . Реализовать эту рекомендацию, однако, не просто. Для этого необходимо тщательно изучить все факторы работы и сушильного, и отбельного производств, степень загрязненности оборотной воды и запланировать необходимые дополнительные мероприятия по предотвращению «отравлений» технологических схем (подробнее возможные «неприятности» рассматривались в статье [7]).

В результате видно, что отбельный цех может работать без использования свежей горячей воды на технологические нужды при обеспечении необходимых условий по качеству оборотной воды и эффективности промывного оборудования.

Вопросы, связанные с резервами водосбережения при реконструкции сушильного цеха и регенерации сульфатно-целлюлозных заводов, будут рассмотрены в следующей статье.

#### Список литературы.

1. «Forest Products Annual Market Review, 2008-2009». UN ECE/FAO, United Nations, New York and Geneva, 2009, – 166 p.

2. «Состояние лесов мира – 2009», FAO, United Nations, Rome, 2009, 177 p.

3. The United Nations World Water Development Report, 3. 2009, 344 с.

4. Мандре Ю. Г. Эколого-технологическая реконструкция ОАО «Светогорск», Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2005. – № 6. – С. 20-22.

5. Мандре Ю. Г., Аким Э. Л. Поэтапная эколого-технологическая реконструкция предприятий ЦБП и проблема «отравления» технологических схем, Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2006. – № 1. – С. 26-30.

6. Мандре Ю. Г., Аким Э. Л. Проблемы «отравления» технологических схем при промывке небеленой целлюлозы, Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2006. – № 7. – С. 68-75.

7. Мандре Ю. Г., Аким Э. Л. Проблемы «отравления» технологических схем на бумагоделательной машине и при производстве товарной целлюлозы Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2006. – № 4. – С. 34-40.

8. Смирнов М. Н., Локшин Ю. Х., Смирнов А. М., Аким Э. Л. Современная концепция водопользования на предприятиях ЦБП. «Целлюлоза. Бумага. Картон.», 2006, № 6, стр. 66-74.

9. Смирнов А. М., Смирнов М. Н., Мошкин С. С., Коваленко М. В., Аким Э. Л. Водопользование – реализация инновационных идей. «Целлюлоза. Бумага. Картон.», 2008, № 8, стр. 66-72.

10. Технология целлюлозно-бумажного производства : справ. материалы : в 3-х тт. / ВНИИБ. – СПб. – Т. 1.: Древесное сырье и производство полуфабрикатов; Ч. 3: Производство полуфабрикатов. – 2004. – 316 с.

11. «Water Use Reduction in the Pulp and Paper Industry», PAPRICAN, Second Edition, December 2001, 172 p.

12. «Energy Cost Reduction in the Pulp and Paper Industry», PAPRICAN, First Edition, November 1999, 234 p.

УДК 676.054.1.3  
ББК 35.77

# Диспергирование волокнистой суспензии в роторно-пульсационном аппарате

Н. П. Мидуков, В. С. Куров,  
А. О. Никифоров, СПб ГТУРП

Роторно-пульсационный аппарат (РПА) нашел широкое применение в целлюлозно-бумажной промышленности для подготовки химикатов, красителей наполнителей проклеивающих составов, а также для диспергирования бумажной массы. Сложная гидродинамика потока, вызванная конструктивной особенностью и реологическими свойствами бумажной массы, присутствие насосного эффекта создает сложности при расчете этих аппаратов. Однако, для эффективной работы роторно-пульсационного аппарата необходимо определение оптимальных технологических режимов и конструктивных параметров диспергирующей гарнитуры. Зависимости технологических характеристик от конструктивных параметров получаются на основании теоретических и экспериментальных исследований.

В основу теории процесса диспергирования бумажной массы в роторно-пульсационном аппарате, созданном на базе центробежного насоса, положена модель воздействия на волокно основных гидромеханических факторов, обусловленных кавитационным, пульсационным, жидкостным, ударным и ме-

ханическим воздействием на обрабатываемую среду.

Для диспергирования бумажной массы наиболее эффективен механический фактор, воздействующий на пучки нераспущенных волокон. Мощность, затрачиваемая на его создание, описывается первым слагаемым в уравнении (1). Кроме того, при диспергировании в роторно-пульсационном аппарате присутствуют ударное, кавитационное, пульсационное и воздействия жидкостного трения. Затраты мощности на их создание соответствуют второму, третьему, четвертому и пятому слагаемому этого уравнения. В сумме они представляют собой мощность, затрачиваемую на диспергирование. Для РПА, созданного на базе центробежного насоса, отдельно выделена мощность насосного эффекта. В сумме с мощностью диспергирования определяется полезная мощность роторно-пульсационного аппарата:

$$N_z = B_s \cdot (l_p \cdot z_{pp} \cdot z_{pc} \cdot n) + \left( \frac{\Delta p^2}{2\rho \cdot c_s^2} + \frac{V_0 \cdot c \cdot v_1^2}{2} \right) \cdot \frac{v_1 - v_2}{2 \cdot r} + \left( \frac{\Delta p_A^2}{2 \cdot \rho \cdot c_s^2} + \frac{\rho \cdot V_0 \cdot v_{cp}^2}{2} \right) \cdot z_p \cdot n + \frac{4\pi \cdot p_k \cdot a_{ок}^3 \cdot k_n \cdot m_k \cdot v_{cp}}{3 \cdot (m_c + m_p + \delta)} + (b_p \cdot z_p \cdot l_\delta \cdot \delta) \cdot \tau \cdot \dot{\gamma} + \rho \cdot g \cdot H \cdot Q,$$

где  $N_z$  – полезная мощность роторно-пульсационного аппарата, Вт;

$B_s$  – работа размолва в зазоре между выступами ротора и статора, Дж/м;

$l_p$  – высота прорезей ротора и статора, м;

$z_{pp}, z_{pc}$  – число зубьев ротора и статора, шт.;

$n$  – частота вращения ротора, с<sup>-1</sup>;

$\Delta p$  – разность давлений между нормальным и возникшим в результате гидравлического удара, Па;

$V_0$  – объем в радиальном зазоре между кольцами ротора и статора, м<sup>3</sup>;

$\rho$  – плотность бумажной массы, ;

$c_s$  – скорость звуковых волн в жидкости, м/с;

$v_1, v_2$  – скорость пучков до столкновения и после, м/с;

$\Delta p_A$  – звуковое давление, Па;

$r$  – радиус ротора, м;

$P_k$  – давление на поверхности твердого тела, обусловленное захлопыванием пузырьков при кавитации, МПа;

$a_{ок}$  – начальный размер пузырька при кавитации, м;

$k_n$  – количество пузырьков в единице объема, шт.;

$m_c, m_p$  – толщина кольца статора и ротора соответственно, м;

$m_k$  – число циклов пульсации пузырька за время прохождения им кавитационной области;

$v_{cp}$  – средняя скорость в зазоре между кольцами, м/с;

$\tau$  – касательное напряжение в зазоре между кольцами, Па;

$\dot{\gamma}$  – градиент скорости в зазоре, с<sup>-1</sup>;

$l_\delta$  – длина выступов ротора и статора в радиальном зазоре, м;

$\delta$  – ширина зазора между ротором и статором в радиальном зазоре, м;  
 $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Напор  $H$  и объемный расход  $Q$  роторно-пульсационного аппарата, созданного на базе центробежного насоса, определялись из следующих формул:

$$Q = \varphi \cdot D^3 \cdot \left(\frac{b_p}{D}\right)^{z_p} \cdot \left(\frac{b_c}{D}\right)^{z_c} \cdot n \cdot z_p^{z_p} \cdot z_c^{z_c}, \quad (2)$$

$$H = \psi \cdot \frac{D^2 \cdot n^2}{g} \cdot \left(\frac{b_p}{D}\right)^{z_p} \cdot \left(\frac{b_c}{D}\right)^{z_c} \cdot z_p^{z_p} \cdot z_c^{z_c}, \quad (3)$$

где  $b_p, b_c$  – ширина прорезей ротора и статора, м;

$z_p, z_c$  – количество прорезей ротора и статора, шт.;

$D$  – диаметр ротора, м;

$\varphi, \psi$  – коэффициенты, зависящие от технологических свойств бумажной массы, которые определяются опытным путем;

$\beta_p, \lambda_p, \zeta_p, \beta_n, \lambda_n, \zeta_n, \zeta_n$  – коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров элементов ротора и статора, находятся экспериментально.

Условием для диспергирования бумажной массы и разрушения нераспущенных пучков волокон является неравенство (4):

$$N_D > \frac{3 \cdot \sigma^2 \cdot Q \cdot (j-1)}{2 \cdot E_{II} \cdot \eta_{PIA}}, \quad (4)$$

где  $N_D$  – мощность, затрачиваемая РПА на диспергирование, Вт;

$\sigma$  – напряжение необходимое для разрушения пучка волокна, Па;

$j$  – степень измельчения;

$E_{II}$  – модуль упругости пучка нераспущенного волокна, Па;

$\eta_{PIA}$  – коэффициент полезного действия РПА.

Исходя из реологических свойств бумажной массы, следует, что создание диспергированного потока на выходе из аппарата возможно при выполнении условия:

$$\frac{2 \cdot U}{D_y} \geq \gamma_{кр}, \quad (5)$$

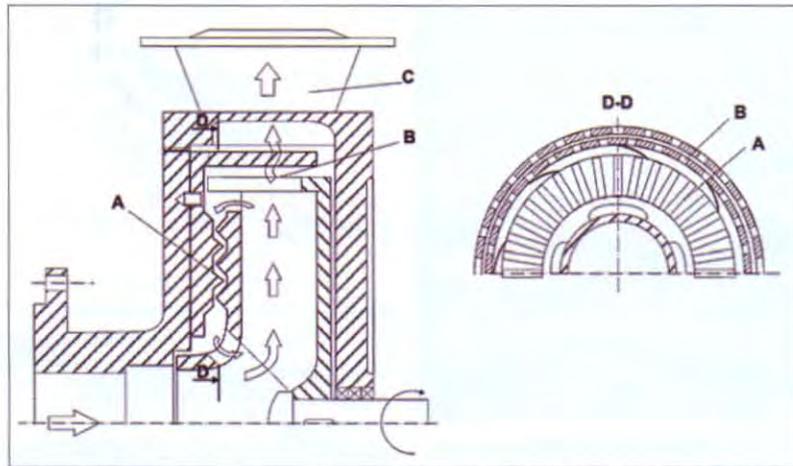


Рис. 1. Схема движения потока бумажной массы в роторно-пульсационном аппарате: А – зона механического воздействия; В – зона радиального зазора; С – зона отвода; 1 – корпус, 2 – ротор; 3, 4 – кольцо с прорезями ротора и статора; 5, 6 – рифления ротора и статора; 7 – регулировка зазора; 8, 9 – входной и выходной патрубки.

где  $U$  – скорость потока в выходном патрубке аппарата, м/с;

$D_y$  – диаметр выходного патрубка аппарата, м;

$\gamma_{кр}$  – критическое значение градиента скорости, которое определяется исходя из реологической кривой, с<sup>-1</sup>.

Нераспущенный пучок волокон бумажной массы обладает значительной прочностью в отличие от прочности капель в эмульсии и сгустков в мелкодисперсной суспензии. Поэтому для его деформации необходимо приложить усилия сдвига, которые обусловлены механическим воздействием. Уравнения (1), (2), (3) устанавливают связь полезной мощности с конструктивными параметрами РПА, предназначенного для диспергирования и транспортировки бумажной массы. Условия (4) и (5) определяются технологическими характеристиками бумажной массы.

Таким образом, полученные теоретические зависимости позволяют рассчитать мощность, которую необходимо затратить для диспер-

гирования бумажной массы, являющейся реологически сложной системой, с учетом комплекса гидромеханических факторов, воздействующих на волокно при различных конструктивных параметрах РПА.

На основании проведенного теоретического анализа и по критическому анализу литературных источников было установлено, что наиболее эффективное диспергирование бумажной массы проходит под механическим воздействием. Поэтому было решено усилить механический фактор, воздействующий на бумажную массу, за счет дополнительной зоны рифления в аппарате. Для этого была разработана конструкция РПА для диспергирования бумажной массы с усилением механического воздействия (рис. 1). Разработка защищена патентом Российской Федерации № 70154.

РПА состоит из корпуса 1 (рис. 1) со спиральным отводом. На лопастном колесе – роторе 2 имеются рифления 5. На ротор и статор установлены кольца с прорезями 3, 4. На статоре и роторе, имеются рифления 5, 6.

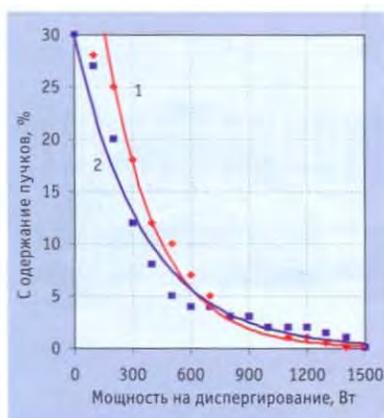


Рис. 2. Зависимость процентного содержания нераспущенных пучков волокон от мощности, затраченной на диспергирование в роторно-пульсационном аппарате: 1 – для бумажной массы на основе сульфатной блененной целлюлозы из хвойных пород древесины; 2 – для бумажной массы на основе макулатуры

Для изменения ширины зазора в зоне рифления А предусмотрено резьбовое соединение 7. Обрабатываемая среда подается во входной патрубке аппарата 8 и удаляется через нагнетательный трубопровод 9. Пучки нераспущенных волокон задерживаются перед кольцами и отводятся в зону рифления, где происходит их интенсивное диспергирование под механическим воздействием. Таким образом, создается циркуляция в аппарате. Основной поток бумажной массы проходит через зону радиального зазора В, где осуществляется воздействие на обрабатываемую среду ударом, пульсацией, кавитацией и жидкостным трением. Диспергированный поток бумажной массы отводится через выходной патрубок, проходя зону С.

Путем проведения процедуры экспоненциальной регрессии были получены зависимости для бумажной массы на основе суль-

фатной блененной целлюлозы из хвойных пород древесины (6) и для бумажной массы на основе макулатуры (7) (рис. 2).

$$c = 28,5 \cdot e^{-0,00274 \cdot N_D}; \quad (6)$$

$$c = 54,642 \cdot e^{-0,0037 \cdot N_D}. \quad (7)$$

Результаты экспериментальных исследований, полученные при работе аппарата с различными геометрическими параметрами ротора и статора, представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что с увеличением полезной мощности РПА процентное содержание нераспущенных пучков волокон снижается. Проведенные экспериментальные исследования в РПА с различными геометрическими параметрами ротора и статора позволяют утверждать об их влиянии на степень диспергирования бумажной массы. График также показывает резкое увеличение полезной мощности на конечной стадии диспергирования, когда требуется уменьшить содержание нераспущенных пучков ниже 1 %.

При проведении экспериментальных исследований в РПА контролировались длина волокна и степень помола бумажной массы (рис. 4).

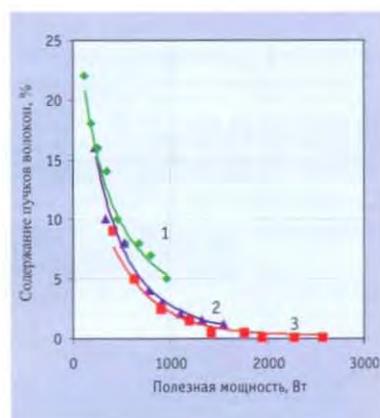


Рис. 3. Зависимость процентного содержания нераспущенных пучков волокон от полезной мощности: 1 – расчетные значения функции  $c = f(N_{\Sigma})$  при  $z_{PP} = z_{PC} = 30$ ,  $l_p = 0,01$  м,  $D = 0,125$  м;  $\blacklozenge$  – данные, полученные опытным путем при  $z_{PP} = z_{PC} = 30$ ,  $l_p = 0,01$  м,  $D = 0,125$  м; 2 – расчетные значения функции  $c = f(N_{\Sigma})$  при  $z_{PP} = z_{PC} = 40$ ,  $l_p = 0,02$  м,  $D = 0,125$  м;  $\blacktriangle$  – данные, полученные опытным путем при  $z_{PP} = z_{PC} = 40$ ,  $l_p = 0,02$  м,  $D = 0,125$  м; 3 – расчетные значения функции  $c = f(N_{\Sigma})$  при  $z_{PP} = z_{PC} = 50$ ,  $l_p = 0,03$  м,  $D = 0,125$  м;  $\blacksquare$  – данные полученные опытным путем при  $z_{PP} = z_{PC} = 50$ ,  $l_p = 0,03$  м,  $D = 0,125$  м

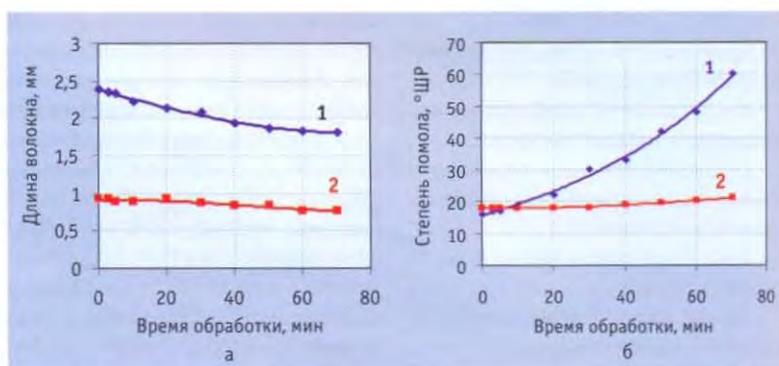


Рис. 4. Влияние обработки бумажной массы в роторно-пульсационном аппарате на изменение длины волокна (а) и степени помола (б): 1 – бумажная масса на основе сульфатной блененной целлюлозы из хвойных пород древесины; 2 – бумажная масса на основе сульфатной блененной целлюлозы из лиственных пород древесины.

Из графиков, изображенных на рис. 4, видно, что кратковременная обработка бумажной массы в роторно-пульсационном аппарате незначительно влияет на укорочение длины волокна и изменение степени помола, следовательно качество готовой картонной или бумажной продукции не ухудшится. Таким образом, роторно-пульсационный аппарат может быть использован в технологии массоподготовительного отдела производства бумажной и картонной продукции.

Полученные на основании теоретических и экспериментальных исследований зависимости позволяют определить влияние конструктивных параметров рабочих элементов РПА на степень диспергирования бумажной массы. На рис. 5 и 6 представлены зависимости процентного содержания нераспущенных пучков волокон от основных геометрических параметров ротора и статора аппарата, влияющих на диспергирование бумажной массы.

Из рисунков видно, что при увеличении числа выступов ротора и

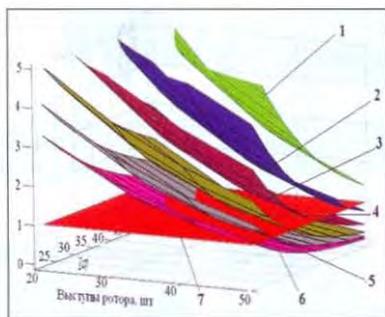


Рис. 5. Влияние количества выступов ротора и статора на процентное содержание нераспущенных пучков волокон ( $D=0,125$  м,  $l_p = 0,020$  м): 1 – при частоте вращения ротора  $n=25$  с<sup>-1</sup>; 2 –  $n=30$  с<sup>-1</sup>; 3 –  $n=35$  с<sup>-1</sup>; 4 –  $n=40$  с<sup>-1</sup>; 5 –  $n=45$  с<sup>-1</sup>; 6 –  $n=50$  с<sup>-1</sup>; 7 – допустимое значение содержания нераспущенных пучков волокон.

статора (рис. 5), а также длины зоны рифления (рис. 6) происходит снижение процентного содержания нераспущенных пучков волокон. Степень диспергирования также зависит от частоты вращения ротора.

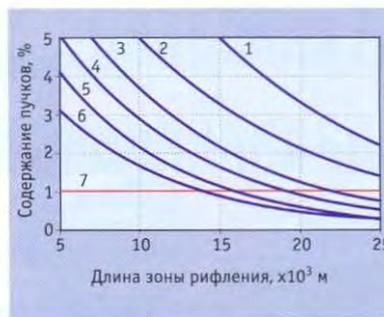


Рис. 6. Влияние длины зоны рифления на процентное содержание нераспущенных пучков волокон ( $D=0,125$  м, ): 1 – при частоте вращения ротора  $n=25$  с<sup>-1</sup>; 2 –  $n=30$  с<sup>-1</sup>; 3 –  $n=35$  с<sup>-1</sup>; 4 –  $n=40$  с<sup>-1</sup>; 5 –  $n=45$  с<sup>-1</sup>; 6 –  $n=50$  с<sup>-1</sup>; 7 – допустимое значение содержания нераспущенных пучков

Таким образом, определяются оптимальные геометрические параметры и режим работы РПА, диспергирующего бумажную массу для заданной технологии массоподготовки.

## В 16-й раз!

В 2010 году выйдет из печати 16-ое (!) издание справочника «Адресная база предприятий ЦБП России, Украины, Белоруссии и Казахстана», которое регулярно предлагает своим читателям редакция журнала «Целлюлоза. Бумага. Картон.» в бумажном и электронном виде.

Новое издание дополнено информацией о недавно появившихся предприятиях, в него внесены изменения адресных данных, персонального состава руководителей, новинки ассортимента вырабатываемой продукции, недавно установленное и модернизированное оборудование.

Кроме того, в справочнике появятся новые разделы.

Цена справочника в 2010 г. — 30 условных единиц. Заявки принимаются по e-mail: info@cbk.ru или по факсам: (495) 258-39-36; 258-39-37; 258-39-38.

ООО Редакция «ЦБК»