

УДК 676.16.002

## АСПЕКТЫ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЩЕПЫ И ОСВЕТЛЕНИЯ БЕЛОГО ЩЕЛОКА В ПРОИЗВОДСТВЕ СУЛЬФАТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Васильев С.Б., Жилин В.А.

ФББОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»,  
Петрозаводск, e-mail: servas@psu.karelia.ru

Цель работы – обзор аспектов ресурсосбережения при получении технологической щепы и обоснование рекомендаций по интенсификации процесса осветления белого щелока в производстве сульфатной целлюлозы. Результаты работы ориентированы на применение в целлюлозно-бумажной промышленности. Приведен краткий обзор ранее выполненных исследований в данной области. Разработана методика расчета, применение которой позволило определить границы эффективного применения однокамерных и двухкамерных установок для осветления белого щелока. Расчеты и экспериментальные исследования показали, что слой осветления имеет толщину примерно 1,00 м, слой осаждения – 1,00 м, промежуточный слой – 0,25...0,40 м, слой осадка – 1,00...2,00 м. Поэтому высота однокамерного осветлителя от днища до уровня отбора осветленного щелока должны быть не менее 3,50 м. Адекватность методики расчета проверена экспериментально.

**Ключевые слова:** ресурсосбережение, щепка, балансы, сульфатный процесс, белый щелок, осветление

## RESOURCE-SAVING ASPECTS OF CHIPPING AND CLARIFICATION OF WHITE LIQUOR IN THE PRODUCTION OF SULPHATE PULP

Vasilyev S.B., Zhilin V.A.

Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, e-mail: servas@psu.karelia.ru

The purpose of the study was to the analysis of aspects resource-saving at chipping and justification of recommendations for process intensification clarification of white liquor in the production of sulphate pulp. The results of the work focused on applications in the pulp and paper industry. A brief review of previous research in this area is given. We proposed the method of calculation, the use of which is allowed to determine the boundaries of the effective application of single-chamber and dual chamber systems for clarification of white liquor. Calculations and experiments showed that the clarification layer has a thickness of about 1,00 m, the layer deposition – 1,00 m, an intermediate layer – 0,25...0,40 m, the layer of sludge – 1,00...2,00 m. Therefore the height of the single-chamber from the bottom of the clarifier to the level of qualification of clarified liquor must not be less than 3,50 m adequacy calculation method is experimentally verified.

**Keywords:** resource saving, wood chips, pulpwood, kraft-process, white liquor, clarification

Целлюлозно-бумажная промышленность является крупнейшим потребителем круглых лесоматериалов, которые подвергаются комплексной переработке [15]. Современные требования к качеству продукции и рациональному природопользованию предопределяют актуальность исследования всех аспектов производства целлюлозы.

Круглые лесоматериалы подвергаются раскрою на отрезки длиной 1,2 м, называемые балансами. Влияние технологии раскроя балансовой древесины на фракционный состав щепы исследовано в работах [2, 12]. Наличие короткомеров (отрезков длиной менее 0,8 м) в потоке балансов, поступающих на окорку в корообдирочный барабан, а после него в рубительную машину, приводит к потерям древесины и к снижению качества щепы [11]. Одна часть потерь в виде лома и отщепов образуется при окорке балансов [6]. Практика и результаты численного моделирования [3, 7] указывают на возможность уменьшения потерь, но не на полное их исключение. Часть потерь в виде некондиционных крупных и мелких древесных частиц образуется при измельче-

нии балансов в рубительной машине. Изъятие короткомеров из общего потока балансов позволяет уменьшить эти потери [12]. Техническое решение рольганга, обеспечивающего интенсификацию сортировки транспортируемых лесоматериалов по длине, предложено в [16]. Применение этого решения позволяет реализовать некоторые возможности ресурсосбережения [11, 10].

Однако полностью избавиться от короткомеров не удаётся, поскольку любой баланс на финишной стадии измельчения в рубительной машине неизбежно превращается в короткомер. Моделирование этой ситуации впервые рассмотрено в статье [1]. Измельчение короткомеров в существующих рубительных машинах служит одной из причин появления избыточно крупных и мелких частиц в щепе. Если избыточно крупные частицы древесины поступают на варку целлюлозы, то появляются так называемые непровары целлюлозы. Мелкие же частицы поглощают большое количество реактивов и также ухудшают качество целлюлозы. Чтобы получить технологическую щепу [10], измельченная древесина

на сортировочной установке разделяется на фракции по критерию крупности частиц [17]. Щепа на выходе из рубительной машины представляет собой полидисперсный сыпучий материал. Математическая модель процесса фракционирования полидисперсного сыпучего материала методом рассева предложена в [5, 14]. Техническое решение для реализации этих теоретических результатов предложено в установке по патенту [15].

Технологическая щепа [10], являясь продукцией древесно-подготовительной стадии, используется в качестве основного сырья на очередной стадии производства целлюлозы. Щепа поступает на термохимическую обработку с целью делигнификации и получения целлюлозы. В настоящее время целлюлозу производят, как правило, используя сульфатный процесс (крафт-процесс). Основная стадия этого процесса, сульфатная варка, заключается в обработке древесной щепы белым щелоком – водным раствором, который содержит гидроксид натрия, сульфид натрия и другие соли натрия. В процессе варки состав белого щелока существенно меняется – концентрация щелочи уменьшается, в растворе появляются органические соединения и натриевые соли неорганических и органических кислот, что более подробно рассмотрено в [17]. Достоинство сульфатного метода: возможность использования щепы практически всех пород древесины; высокие механические свойства сульфатной целлюлозы; возможность регенерации щелочи, расходуемой на варку целлюлозы.

Далее рассматриваются вопросы совершенствования технологии осветления белого щелока в производстве сульфатной целлюлозы.

### Материалы и методы исследования

При регенерации щелочи самым продолжительным является процесс осветления щелоков [4, 17]. Для осветления щелоков часто используется метод осаждения и соответствующее оборудование (осветлитель). В целях совершенствования осветлителей был выполнен комплекс исследований [4].

Известно, что в осветлителе можно выделить определённые слои, различающиеся содержанием твердых веществ и протекающими в них процессами: слой осадка, слой осаждения, слой осветления, а также промежуточные слои [13, 19, 21]. Баланс исходной суспензии  $Q_{исх}$ , осветленного щелока  $Q_{осв}$ , и шлама  $Q_{шл}$ , ( $м^3/ч$ ) в некотором  $i$ -м слое может быть представлен следующим уравнением:

$$Q_{исх} = Q_{осв} + Q_{шл}, \quad (1)$$

Масса твердых веществ, проходящих через  $i$ -й слой, равна их массе в исходной суспензии и в удаляемом шламе:

$$Q_{исх} \cdot C_i = Q_{исх} \cdot C_{исх} = Q_{шл} \cdot C_{шл}, \quad (2)$$

где  $Q_{исх}$  и  $Q_{шл}$  – соответственно расход подаваемой в осветлитель суспензии и расход откачиваемого из осветлителя шлама,  $м^3/ч$ ;  $C_i$ ,  $C_{исх}$  и  $C_{шл}$  – концентрации твёрдого вещества ( $кг/м^3$ ) соответственно в  $i$ -м слое, в исходной суспензии и в шламе.

Из (1) и (2) найдем

$$Q_{осв} = Q_{исх} C_{исх} (1/C_i - 1/C_{шл}). \quad (3)$$

Для предотвращения уноса твердой фазы входящими потоками жидкости необходимо, чтобы в любой области слоя осаждения величина  $Q_{осв}/S$  не превышала скорости осаждения твердой фазы  $\omega_{ос}$ , [9, 13], где  $S$  – площадь осаждения,  $м^2$ . Если в (3) подставить взамен  $Q_{осв}$ , максимально допустимое его значение, равное  $\omega_{ос} S$ , то получим максимально допустимое значение удельного расхода исходной суспензии  $Q_{исх}/S$ , при котором имеет место баланс в любом  $i$ -м слое:

$$Q_{исх}/S = \omega_{ос} / (C_{исх} (1/C_i - 1/C_{шл})). \quad (4)$$

Выражение (4) определяет максимально возможный удельный расход исходной суспензии, такой, чтобы в  $i$ -й области соблюдалось равновесие и не возникло уноса твердого вещества с осветленным щелоком. Для расчета производительности осветлителя вычисляют допустимый расход исходной суспензии (4) для каждого  $i$ -го слоя зоны осаждения. Минимальное из этих значений определяет производительность аппарата, соответствующий слой будет лимитирующим слоем.

При вычислении производительности осветлителя необходимо в (4) подставить скорости осаждения, соответствующие всем значениям концентраций в зоне осаждения. Для расчетов были использованы данные экспериментов по отстаиванию суспензий белого щелока различных концентраций. Процессу стесненного осаждения соответствует интервал концентраций от 10 до 260 г/л. При меньших концентрациях происходит свободное осаждение ( $\omega_{ос} = \text{const}$ ), которому соответствует зона осветления. При больших концентрациях наблюдается сгущение, флоккулы шлама соприкасаются, деформируются и частично разрушаются. Эмпирические зависимости скорости  $\omega_{ос}$  (мм/мин) от концентрации твёрдых веществ в суспензии  $c$  (г/л) имеют вид

$$\omega_{ос} = 69,77 \cdot (1,025)^{-c}, \text{ при } 10 \text{ г/л} \leq c \leq 100 \text{ г/л}; \quad (5)$$

$$\omega_{ос} = 8,72 - 0,0272c, \text{ при } 100 \text{ г/л} \leq c \leq 260 \text{ г/л}. \quad (6)$$

### Результаты исследования и их обсуждение

Расчет величины  $Q_{исх}/S$  (4) выполнен для  $C_i = 80 \dots 260$  г/л,  $C_{исх} = 80 \dots 150$  г/л и  $C_{шл}$ , равного 400 и 500 г/л. В (4) подставлялись данные о скорости (5) и (6). Зависимость  $Q_{исх}$  от  $C_{исх}$  монотонно убывающая. Зависимость  $Q_{исх}/S$  от  $C_i$  имеет ряд экстремумов, два из которых находятся в рабочем диапазоне: при  $C_i = 100$  г/л и при  $C_i = 260$  г/л. В зоне осаждения  $C_i \geq C_{исх}$ . Например, если  $C_{исх} = 150$  г/л и  $C_{шл} = 500$  г/л, то в лимитирующем слое  $C_i = 260$  г/л.

В многокамерных осветлителях отбор осветленного щелока распределяется меж-

ду всеми камерами, нагрузка на верхнюю часть зоны осаждения в каждой из камер уменьшается. Нагрузка на нижнюю часть зоны осаждения не снижается, так как весь шлам перетекает из камеры в камеру. Применение таких осветлителей целесообразно, если лимитирующей оказывается верхняя часть зоны осаждения.

Адекватность результатов моделирования подтверждена в экспериментах [4].

Результаты работы не противоречат данным других авторов [20, 22].

### Заключение

Результаты работы показали, что для осветления белого щелока при концентрации взвеси более 100 г/л целесообразно использовать однокамерные осветлители, а при меньших концентрациях – двухкамерные осветлители.

Согласно полученным данным, слой осветления имеет толщину примерно 1,00 м, слой осаждения – 1,00 м, промежуточный слой – 0,25...0,40 м, слой осадка – 1,00...2,00 м. Поэтому высота однокамерного осветлителя от дна до уровня отбора осветленного щелока должна быть не менее 3,50 м. Погружение трубы, подающей исходную суспензию, должно составлять 2 м.

Применение полученных результатов на целлюлозно-бумажном комбинате позволило на 25% повысить производительность однокамерных осветлителей [4].

### Список литературы

1. Васильев С.Б., Девятникова Л.А., Колесников Г.Н. Влияние изменения длины баланса, измельчаемого в дисковой рубильной машине, на размеры частиц древесной щепы // Политематический сетевой электронный научный журнал КубГАУ. – 2012. – № 81. – С. 270–279.
2. Васильев С.Б., Девятникова Л.А., Колесников Г.Н. Влияние технологии раскря балансовой древесины на фракционный состав щепы // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2011. – № 195. – С. 125–133.
3. Васильев С.Б., Доспехова Н.А., Колесников Г.Н. Численное моделирование взаимодействия еловых балансов неодинакового диаметра в корообдирочном барабане // Resources and Technology. – 2013. – Т. 10. – № 1. – С. 024–038.
4. Васильев С.Б., Жилин В.А. Оборудование для каустизации щелоков // Леса России в XXI веке: материалы пятой междунар. научно-практ. Интернет-конференции. – СПб.: ЛТА, 2010. – С. 182–185. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ftacademy.ru/science/internet-conference/index.php?c=6&a=310>.
5. Васильев С.Б., Колесников Г.Н. Логистический подход к моделированию фракционирования сыпучих материалов // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2010. – № 4. – С. 61–65.
6. Влияние локальной жесткости корпуса корообдирочного барабана на изменение силы соударений и величину потерь древесины / С.Б. Васильев, Г.Н. Колесников, Ю.В. Никонова, М.И. Раковская // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2008. – № 96. – С. 84–91.

водского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2008. – № 96. – С. 84–91.

7. Исследование закономерностей изменения силы соударений с целью снижения потерь при окорке древесины в барабане / С.Б. Васильев, Г.Н. Колесников, Ю.В. Никонова, М.И. Раковская // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2008. – № 185. – С. 195–202.

8. Установа для сортировки древесной щепы: патент на полезную модель RU 109025 / Васильев С.Б. Колесников Г.Н., Шегельман И.Р., Андреев А.А., Кульбицкий А.В. – Опубликовано 13.05.2011.

9. Гальперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1981. – 812 с.

10. Щепы технологическая. Технические условия: ГОСТ 15815-83.

11. Девятникова Л.А. Потенциал ресурсосбережения в технологии подготовки круглых лесоматериалов к переработке на щепу // Политематический сетевой электронный научный журнал КубГАУ. – 2013. – № 88. – С. 188–206.

12. Девятникова Л.А., Васильев С.Б., Колесников Г.Н. Влияние технологии раскря балансов на фракционный состав щепы // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – М.: Изд-во МГУЛ, 2012. – № 3. – С. 120–124.

13. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Альянс, 2008. – 750 с.

14. Колесников Г.Н., Васильев С.Б. Математическая модель технологического процесса фракционирования полидисперсного сыпучего материала методом рассева на установках с ярусной компоновкой сит // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 3. – С. 42–49.

15. Установа для фракционирования сыпучих полидисперсных материалов: патент RU 117326 / Колесников Г.Н., Васильев С.Б., Андреев А.А. – Опубликовано 27.02.2012.

16. Секция рольганга для сортировки транспортируемых лесоматериалов по длине: патент RU 117411 / Колесников Г.Н., Васильев С.Б., Девятникова Л.А., Доспехова Н.А. – Опубликовано 05.12.2011.

17. Комплексная химическая переработка древесины: учебник для вузов / И.Н. Ковернинский, В.И. Комаров, С.И. Третьяков, Н.И. Богданович, О.М. Соколов, Н.А. Куткова, Л.И. Селянина; Под ред. проф. И.Н. Ковернинского. – Архангельск: Изд-во Архангельского государственного техн. ун-та, 2002. – 347 с.

18. Никонова Ю.В., Раковская М.И. Методика определения жесткости балансов, результаты численных экспериментов и испытаний образцов // Resources and Technology. – 2010. – № 8. – С. 100–106.

19. Перри Д.Г. Справочник инженера-химика. – Т. 2. – Л.: Химия, 1969. – 640 с.

20. Способ приготовления белого щелока для получения сульфатной целлюлозы: патент RU 2042003 / Полойко Е.Г., Богдан В.М., Шафранович П.П., Окладникова Т.Г., Игнатьева О.И. – Опубликовано 20.08.1995.

21. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. – Л., 1982. – 288 с.

22. Vena P.F., García-Aparicio M.P., Brienza M., Görgens J.F., Rypstra T. Effect of Alkaline Hemicellulose Extraction on Kraft Pulp Fibers from Eucalyptus Grandis // Journal of Wood Chemistry and Technology. – 2013. – Vol. 33. – № 3. – P. 157–173.

### References

1. Vasilyev S.B., Devyatnikova L.A., Kolesnikov G.N. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*. 2012, no. 7 (81), pp. 270–279.
2. Vasilyev S.B., Devyatnikova L.A., Kolesnikov G.N. *Izvestiya Saint-Petersburg State Forest Technical Academy*. 2011, no. 195, pp. 125–133.

3. Vasilyev S.B., Dospekhova N.A., Kolesnikov G.N. *Resources and Technology*. 2013, no. 10(1), pp. 024–038.
4. Vasilyev S.B., Zhilin V.A. *Proceedings of the Fifth International Scientific and Practical Internet Conference «Forests of Russia in XXI century»*. Saint-Petersburg State Forest Technical Academy, 2010, pp.182–185.
5. Vasilyev S.B., Kolesnikov G.N. *Proceedings of Petrozavodsk state University: Natural and Engineering Sciences*, 2010, no. 4, pp. 61–65.
6. Vasilyev S.B., Kolesnikov G.N., Nikonova Ju.V., Rakovskaya, M.I. *Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences*, 2008, no. 96, pp. 84–91.
7. Vasilyev S.B., Kolesnikov G.N., Nikonova Ju.V., Rakovskaya M.I. *Izvestiya Saint-Petersburg State Forest Technical University*, 2008, no. 185, pp. 195–202.
8. Patent RU 109025. Published 13.05.2011.
9. Halperin N. *Main processes and devices of chemical technologies*. M. 1981.
10. GOST 15815-83 «Wood chips. Specifications»
11. Devjatnikova L.A. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*. 2013, no. 88, pp. 188–206.
12. Devjatnikova L.A., Vasilyev S.B., Kolesnikov G.N. *Bulletin of the MSFU – Lesnoi Vestnik*. M: Publishing house of the MSFU, 2012, no. 3, pp.120–124.
13. Kasatkin A.G. *Basic processes and devices of chemical technologies*. M. 2008.
14. Kolesnikov G.N., Vasilyev, S.B. *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. 2012, no. 3, pp. 42–49.
15. Patent RU 117326. Published 27.02.2012.
16. Patent RU 117411. Published 05.12.2011.
17. Koverninskii I.N., Mosquitoes V.I., Tretyakov S.R., Bogdanovic N.I., Sokolov O.M., Kutakova N.A., Selyanina L.I. *Integrated chemical processing of wood: Textbook for high schools*. Ed. prof. I.N. Koverninskiy. Arkhangelsk: Publishing House of the Arkhangelsk State Technical University. 2002.
18. Nikonova Ju.V., Rakovskaya M.I. *Resources and Technology*. 2010, no. 8, pp. 100–106.
19. Perry D.G. *Chemical Engineers Handbook*. Vol. 2. Leningrad, 1969.
20. Patent RU 2042003. Published 20.08.1995.
21. Romankov P.G., Kurotshkina M.I. *Hydro-mechanical processes of chemical technology*. Leningrad, 1982.
22. Vena P.F., Garcia-Aparicio M.P., Brienzo M., Gørgens J.F., Rypstra T. (2013). *Effect of Alkaline Hemicellulose Extraction on Kraft Pulp Fibers from Eucalyptus Grandis*. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 33(3):157–173.

---

**Рецензенты:**

Колесников Г.Н., д.т.н., профессор, зав. кафедрой механики, зам. директора по НИР Института рационального природопользования на Европейском Севере, г. Петрозаводск;

Питухин А.В., д.т.н., профессор, зав. кафедрой технологии металлов и ремонта, ФБГОУ ПетрГУ, г. Петрозаводск.

Работа поступила в редакцию 23.08.2013.