

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ВЕСТНИК

Санкт-Петербургского
государственного университета
технологии и дизайна



Серия 1

Естественные
и технические науки

№ 1/2022

Е. П. Дятлова, И. В. Ремизова

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
191186 РФ, Санкт-Петербург, Большая Морская, 18**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОТБЕЛКИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ МАССЫ**

© Е. П. Дятлова, И. В. Ремизова, 2022

Рассмотрен вопрос нахождения оптимальных условий отбелки, обеспечивающих максимальный прирост белизны термомеханической массы (ТММ). Разработаны условия выбора оптимального процесса отбелки.

Ключевые слова: термомеханическая масса, белизна, математическая модель, система регулирования.

Технологический процесс производства термомеханической массы (ТММ) включает следующие операции: пропарка щепы паром низкого давления; размол щепы на рафинерах; смешение массы с реагентами; подачу массы в отбельную башню.

В отбельной башне происходит процесс отбелки небеленой ТММ. После окончания отбелки беленная древесная ТММ выкачивается из нижней части башни насосом и подается в производство бумаги.

Отбелка термомеханической массы заключается в воздействии перекиси водорода на свежую ТММ при контролируемых технологических условиях: температуре, щелочности среды, концентрации и времени пребывания массы в башне.

По технологическому регламенту в башне отбелки должны поддерживаться следующие условия: рН – в пределах 10–11 единиц, концентрация массы в башне 17–20%, температура на входе в башню Т – в пределах 65–90 °С, количество отбеливающего реагента – в пределах 25–30 кг на тонну воздушно-сухой ТММ, время пребывания зависит от уровня массы в башне и от нагрузки на башню. Все перечисленные параметры оказывают существенное влияние на протекание процесса отбелки и на конечную белизну ТММ. Часть параметров в процессе отбелки стабилизируются, как например, величина рН путем добавления к массе компонентов, создающих буферную среду, или концентрация массы, которая стабилизируется путем поддержания заданного соотношения расхода разбавляющей воды в смеситель и ТММ. Остальные параметры: расход реагента, температуру ТММ и время отбелки изменяют в процессе отбелки с целью достижения заданной белизны ТММ.

Для достижения удовлетворительного прироста белизны расход перекиси должен составлять 1–3% от абсолютно сухого волокна. Увеличение количества перекиси свыше 3% не дает заметного прироста белизны при значительном удорожании производства. При повышении температуры увеличивается эффективность и скорость отбелки.

До последнего времени отбелка проводилась при температурах, близких к 40 °С. С увеличением температуры сокращается продолжительность процесса,

но наблюдается явление обратимости белизны, т. е. резкого ее снижения после достижения максимума. Кроме того, возрастает расход перекиси, деструкция которой при повышении температуры возрастает.

Продолжительность отбелки в значительной степени зависит от концентрации массы и температуры. Время отбелки составляет 2–3 часа при средних концентрациях массы (5–15%) и температуре 40 °С, 1–2 часа при высоких концентрациях и температуре 40 °С. При высокой концентрации 17–20% и температуре более 60 °С время отбелки сокращается до 40 минут [1].

В результате проведения большой серии экспериментов были получены графические и табличные зависимости величины прироста белизны ТММ от различных технологических факторов. На рис. 1 приведены зависимости прироста белизны ΔB от времени отбелки t при различных фиксированных значениях температуры ТММ на входе в башню и постоянном расходе перекиси водорода.

Анализируя графики, можно сделать следующие выводы:

1. Зависимость прироста белизны от времени отбелки носит экстремальный характер.
2. Максимальный прирост белизны достигается при наименьшей температуре $T=70$ °С (рис. 1).
3. Для получения максимального прироста белизны необходимо строго соблюдать температурный и временной режим процесса отбелки, так как каждому значению температуры соответствует строго определенное время отбелки.

На рис. 2 приведена зависимость прироста белизны от расхода перекиси при фиксированной температуре $T=75$ °С. Из графика видно, что прирост белизны линейно связан с расходом реагента в диапазоне 20–30 кг на тонну воздушно-сухой ТММ. Дальнейшее увеличение расхода перекиси водорода не приводит к эффективному увеличению белизны.

На графике рис. 3 показано влияние содержания остаточной перекиси в ТММ после отбельной башни. Уменьшение процента остаточной перекиси вызывает эффект пожелтения массы. Из рис. 3 видно, что содержание остаточной перекиси в массе не должно быть ниже 15–10%.

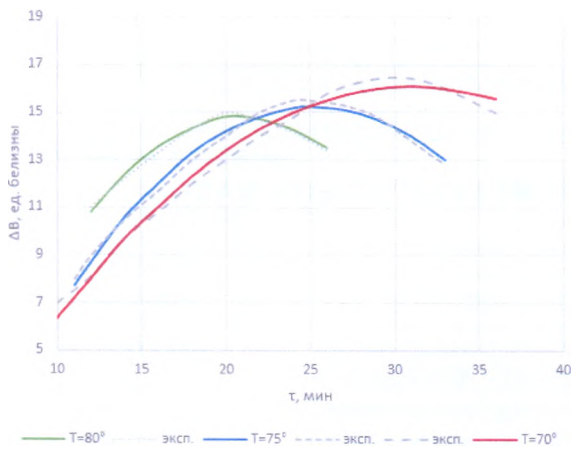


Рис. 1. Влияние времени отбели на прирост белизны ТММ, $F=30$ кг/т

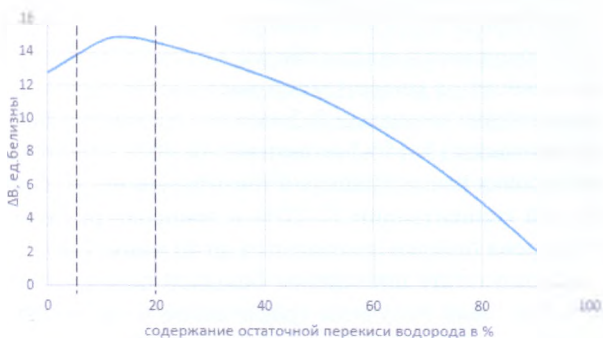


Рис. 2. Прирост белизны от расхода перекиси. $T=75$ °C

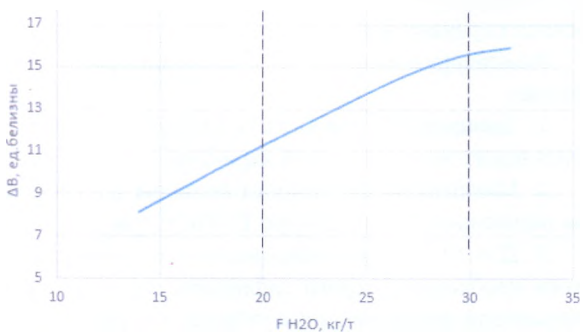


Рис. 3. Содержание остаточной перекиси в ТММ

Большой процент остаточной перекиси водорода экономически нецелесообразен, так как ведет к неполному израсходованию перекиси и в то же время не достигается максимальный прирост белизны при прочих равных условиях.

Из экспериментальных кривых следует, что существуют оптимальные условия процесса отбели, при которых достигается максимальный прирост белизны массы при ограниченном расходе реагента.

Для расчета оптимальных режимов процесса отбели в нормальном режиме эксплуатации отбельной установки

был проведен дополнительный эксперимент по следующей методике. По три раза за смену отбиралась небелёная масса со второй ступени размола и на лабораторном приборе – лигметре получали значение белизны небелёной массы. Одновременно с отбором массы фиксировались текущие значения температуры, время отбели и удельный расход реагента. Через время τ , равное примерно 30 минутам, отбирали массу на выходе башни и производили анализ белизны беленой массы. Разность между белизной беленой и небеленой массы и представляла прирост белизны, достигаемый при фиксированном режиме технологического процесса. Из большого количества анализов отбирались только те, для которых количество остаточной перекиси водорода составляло $15 \pm 10\%$. Экспериментальные данные сведены в табл. 1.

Обработка экспериментальных данных, приведенных в табл. 1, была выполнена методом наименьших квадратов. Из графиков экспериментальных зависимостей прироста белизны от параметров технологического процесса следует, что математическая модель должна быть нелинейной. Поэтому для обработки по методу наименьших квадратов было выбрано степенное уравнение регрессии второго порядка:

$$\Delta B = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2$$

В уравнении регрессии приняты следующие обозначения: x_1 — температура массы в отбельной башне, выраженная в относительных единицах; x_2 — время пребывания массы в башне в относительных единицах; x_3 — удельный расход перекиси водорода в относительных единицах.

Между переменными x_i ($i=1,2,3$) и параметрами технологического процесса в натуральных единицах существует соотношение вида:

$$x_1 = \frac{T - T_{cp}}{\Delta T / 2}, \quad x_2 = \frac{\tau - \tau_{cp}}{\Delta \tau / 2}, \quad x_3 = \frac{F - F_{cp}}{\Delta F / 2},$$

где T — текущая температура массы в башне, T_{cp} — среднее значение температуры массы в диапазоне допустимых по технологическому регламенту температур, $\Delta T / 2$ — половина диапазона допустимых температур,

$$T_{cp} = \frac{T_{мин} + T_{макс}}{2}, \quad \Delta T / 2 = \frac{T_{макс} - T_{мин}}{2},$$

τ — время пребывания массы в отбельной башне,

$$\tau_{cp} = \frac{\tau_{мин} + \tau_{макс}}{2}, \quad \Delta \tau / 2 = \frac{\tau_{макс} - \tau_{мин}}{2},$$

F — удельный расход реагента в башню,

$$F_{cp} = \frac{F_{мин} + F_{макс}}{2}, \quad \Delta F / 2 = \frac{F_{макс} - F_{мин}}{2}.$$

Предельные значения параметров процесса отбели были определены по данным табл. 1.

После расчета в Excel коэффициентов уравнения регрессии была проверена адекватность математической модели и значимость коэффициентов.

Таблица 1. Экспериментальные данные процесса отбелки ТММ

№	T, °C	τ, мин	F, кг/т	ΔB, ед.
1	80	15	30	12,75
2	80	20	30	15
3	80	25	30	12,5
4	75	15	30	11,25
5	75	20	30	13,75
6	75	25	30	15,25
7	75	30	30	14
8	70	15	30	10,25
9	70	20	30	13
10	70	25	30	15,1
11	70	30	30	16,25
12	70	35	30	15,5
13	80	14,5	20	10,3
14	80	17,3	25	13,4
15	80	19,8	30	15
16	75	17,75	20	11
17	75	21,25	25	13,4
18	75	25	30	15,1
19	70	21,75	20	12,2
20	70	26	25	14,8
21	70	30	30	16,25

Дисперсия адекватности $s_a = 0,35$ (ед. белизны)², дисперсия воспроизводимости $s_e = 0,12$ (ед. белизны)², квантиль распределения Фишера $F_{кр} = 8,7$ для уровня значимости $\pm = 0,05$, степеней свободы $f_1 = 11$, $f_2 = 3$. дисперсионное отношение $F = 3,1 < F_{кр}$.

После оценки коэффициентов математическая модель процесса отбелки приобрела следующий вид:

$$\Delta B = 12,1 - 3,1x_1 - 5,5x_2 + 4,9x_3 - 3x_1x_2 + 2,1x_1x_3 + 5,6x_2x_3 - 3,5x_2^2 - 2,5x_3^2 \quad (1)$$

На рис. 1 нанесены расчетные значения прироста белизны массы, полученные при тех же условиях технологического процесса, что и экспериментальные кривые. Из графиков на рис. 1 следует хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных.

Для нахождения оптимальных условий отбелки, обеспечивающих максимальный прирост белизны ТММ, была сформулирована задача оптимизации, в которой в качестве функции цели была использована полученная выше зависимость прироста белизны от параметров технологического режима.

Максимум ΔB должен определяться при ограничениях на допустимый диапазон изменения технологических параметров.

1. Ограничение по времени отбелки. Это ограничение вытекает из того обстоятельства, что при увеличении производительности G для поддержания постоянного τ необходимо увеличивать уровень в башне. Так как объем башни ограничен, то при больших расходах массы G , выше, чем $G = 5,5 - 6$ кг/с, уровень в башне достигает максимума и тем самым лимитирует время отбелки для высоких значений производительности G .

Для отбельной башни АО «Монди СЛПК» была найдена зависимость предельного времени пребывания в башне от расхода ТММ:

$$\tau_{\max} = \frac{163}{G} - 1 \quad (2)$$

2. Ограничения по температуре массы. Регулирование температуры ТММ осуществляется изменением температуры воды, подаваемой на разбавление ТММ в смеситель. Расход воды регулируется для обеспечения заданной концентрации ТММ в смесителе.

При больших расходах ТММ, особенно в летнее время, не удается поддерживать температуру ТММ в смесителе ниже 74 °C (установлено экспериментально). Эта величина температуры и принята в качестве минимального предела при больших расходах ТММ.

Для задачи оптимизации ограничение по температуре записано в виде

$$T_{\min} \leq T \leq 80^\circ \text{C} \quad (3)$$

где $T_{\min} = \begin{cases} 70 & \text{при } G < 5,5 \text{ кг/с} \\ 70 + 0,14G & \text{при } G \geq 5,5 \text{ кг/с} \end{cases}$

3. Ограничение по расходу реагента. На практике всегда стремятся к увеличению удельного расхода перекиси водорода, но, как уже отмечалось, экономически целесообразно ограничить расход перекиси $F = 30$ кг/т (рис. 2). При недостаточных запасах перекиси ее расход в административном порядке ограничивают $F_{\max} = 25$ кг/т. Поэтому при решении задачи выбора оптимальных режимов отбелки в качестве максимальных удельных расходов перекиси рассматривались два варианта:

$$F \leq F_{\max}, \quad (4)$$

где $F_{\max} = 30$ кг/т и $F_{\max} = 25$ кг/т.

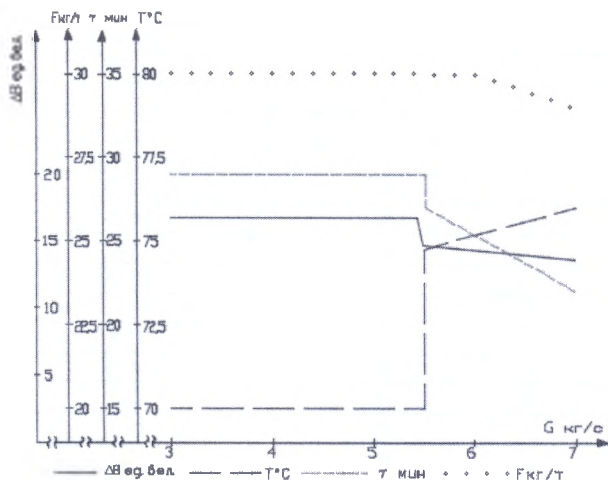


Рис. 4. Оптимальные режимы отбели, $F_{\max} = 30$ кг/т

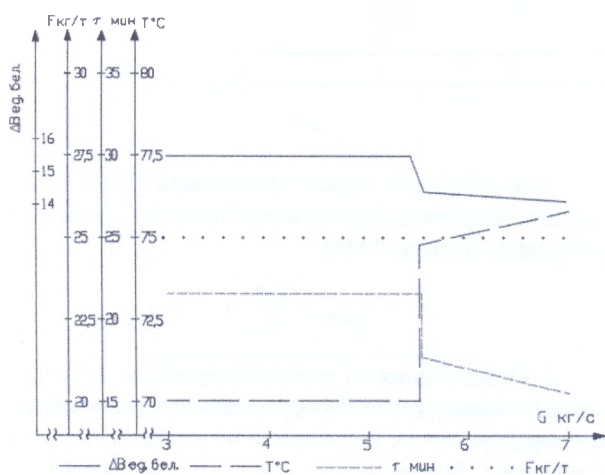


Рис. 5. Оптимальные режимы отбели, $F_{\max} = 25$ кг/т

Для отыскания максимума функции цели (1) при ограничениях на диапазон изменения ее переменных (2)–(4) был использован метод проекции градиента [2]. Сущность алгоритма состоит в том, что из произвольно заданной точки в области допустимых значений переменных, определяемой ограничениями (2)–(4), выполняется серия шагов в направлении градиента функции цели (1). На каждом шаге алгоритма контролируется соблюдение ограничений (2)–(4). При нарушении какой-либо границы осуществляется корректировка путем проектирования точки, вышедшей за границу области допустимых значений переменных, на поверхность нарушенного ограничения. В случае ограничений на диапазон изменения переменных типа (2)–(4) такая корректировка сводится к простой операции присваивания переменной, значение которой вышло за допустимую границу, значения нарушенной границы. Дальнейшее движение к экстремуму функции цели выполняется по поверхности нарушенного ограничения. Признаком попадания в окрестность экстремума функции цели является удовлетворение следующего условия:

$$(\text{grad} \Delta B, \Delta \bar{x}) \leq \varepsilon, \quad (5)$$

где $\text{grad} \Delta B$ — градиент функции цели, $\Delta \bar{x}$ — вектор допустимых направлений, который в данной задаче расположен в плоскости того ограничения, которое было нарушено в процессе решения, ε — требуемая точность вычисления экстремума функции цели.

В данном конкретном случае точность вычисления экстремума задавалась, исходя из точности лабораторных анализов определения белизны термомеханической массы.

По результатам расчета построены графики оптимальных значений температуры (T), времени отбели (τ), удельного расхода перекиси водорода (F) при различных нагрузках отбельной башни G , а также графики изменения белизны ТММ при оптимальных режимах отбели. На рис. 4 изображены кривые T , τ , F и ΔB при $F_{\max} = 30$ кг/т. На рис. 5 приведены аналогичные зависимости, полученные для $F_{\max} = 25$ кг/т. Из сравнения графиков оптимальных режимов процесса отбели на рис. 5 и 6 видно, что максимум прироста белизны ΔB достигается при температуре $T = 70^\circ\text{C}$, времени отбели $\tau = 29$ мин, удельном расходе реагента $F = 30$ кг/т и нагрузке на отбельную башню G не больше 5,5 т/ч, соответствующей этому режиму максимум белизны $\Delta B = 16,5$ единиц. При достижении расхода ТММ значения $G = 5,5$ т/час вступает в силу ограничение по времени пребывания в башне, которое начинает уменьшаться, для компенсации этого изменения и с учетом ограничения по температуре снизу при больших расходах ТММ возрастает температура процесса, это вызывает снижение расхода реагента (рис. 4 и 5). В результате прирост белизны резко падает.

Из графиков на рис. 4 и 5 следует вывод, что температуру процесса необходимо поддерживать на нижнем допустимом пределе, расход реагента — на верхнем допустимом пределе (за исключением случая, когда $G \geq 5,5$ кг/т и $F_{\max} = 30$ кг/т), время отбели при этом рассчитывается из условия максимума ΔB с учетом ограничения (3).

Исследование показало, что при таких режимах выполняется условие: остаточное содержание реагента в ТММ составляет 10–15%.

При удельном расходе реагента $F_{\max} = 25$ кг/т. максимальный прирост белизны составляет 15,65 ед. Вынужденное повышение температуры на 5°C уменьшает прирост белизны на величину от 1,2 до 1,65 ед., что сказывается на показателе белизны печатных бумаг, в композиции которых ТММ составляет около 70%.

Изложенные выше результаты были подтверждены для различных выборок экспериментальных данных, накопленных в процессе эксплуатации отбельной башни и характеризующих ТММ с разными значениями показателя белизны перед отбелкой.

Расчетные режимы процесса отбели, обеспечивающие максимум белизны ТММ при различных нагрузках на отбельную башню, были использованы при формировании задающих воздействий системам регулирования отдельных параметров: дозировки

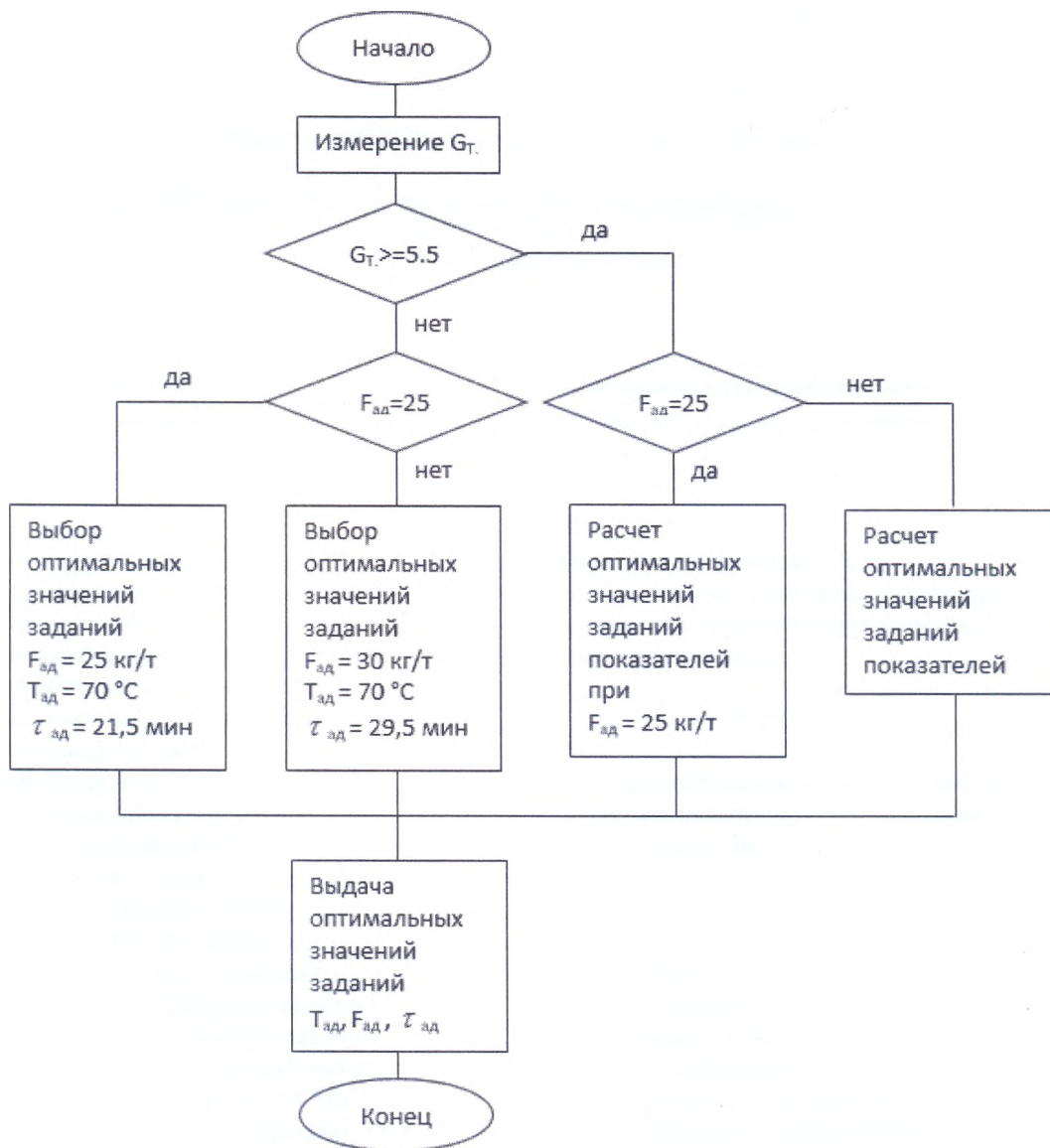


Рис. 6. Алгоритм выбора оптимальных режимов отбелки ТММ

реагента, температуры ТММ и уровня в башне зависимости от величины нагрузки G .

Для усовершенствования системы управления был разработан алгоритм выбора оптимальных условий процесса отбелки ТММ (рис. 6).

Сущность алгоритма состоит в том, что в зависимости от измеренной величины расхода ТММ и ограничения на расход реагента, формируется задание системам регулирования температуры, времени отбелки и удельного расхода перекиси водорода. Причем, если расход ТММ G меньше 5,5 т/час, то заданные значения этих параметров есть величины постоянные, равные

тем значениям, которые приведены на графиках рис. 4 и 5. В случае $G \geq 5,5$ т/час задания рассчитываются по формулам, описывающим характер изменения этих параметров на графиках рис. 4 и 5.

Оптимизация режима отбелки позволит устранить потерю качества бумаги из-за пониженной белизны ТММ.

Список литературы

1. Технологический регламент отбелки термомассы на АО «Монди СЛПК».
2. Васильев Ф. П. Методы оптимизации. М.: Изд-во «МЦНМО», 2011. 620 с.

E. P. Dyatlova, I. V. Remizova

Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design
191186 Russia, St. Petersburg, Bolshaya Morskaya, 18

OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF BLEACHING THERMOMECHANICAL MASS

The question of finding the optimal bleaching conditions, providing the maximum increase in TMM whiteness. Developed an algorithm for selecting the optimal conditions of the TMM bleaching process.

Keywords: thermomechanical mass, whiteness, mathematical model, regulatory system.

References

1. Technological regulations for bleaching thermomass at JSC «Mondi SLPK» (in Rus.).
2. Vasiliev F. P. Optimization methods. M.: Publishing House «MCNMO», 2011. 620 p. (in Rus.).