

УДК 661.728.2

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОМЫВКИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

©М.И. Кравченко, канд. техн. наук, доц.

С.-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, г. С.-Петербург, Россия, 19402; e-mail: ola.ola07@mail.ru

Исследован процесс промывки целлюлозы методом вытеснения сульфитного отработанного щелока в варочном котле периодического действия. Приведен метод расчета констант фильтрования и скорости фильтрации в зависимости от высоты слоя фильтрования и избыточного давления для промышленного варочного котла периодического действия. Показано, что процесс извлечения сухих веществ (растворимых органических веществ из волокон целлюлозы) протекает в два периода: первый – во внешнедиффузионной области, второй – во внутридиффузионной области методом вытеснения в варочных котлах. Установлено, что высота слоя к концу промывки целлюлозы методом вытеснения в варочных котлах вместимостью 320 м<sup>3</sup> может достигать 5,4 м при схеме вытеснения снизу вверх. При этом определены константы фильтрования. Варочные котлы, оборудованные гидрораспределителями для промывной жидкости, позволили выявить зависимость скорости фильтрации от гидравлического давления в варочном котле до 120 мин, процесс фильтрации щелока может происходить при постоянной скорости фильтрования. Проведение высокотемпературной промывки целлюлозы в варочных котлах периодического действия позволяет получить легкобелимую целлюлозу.

*Ключевые слова:* математическая модель, варка, промывка, отбелка целлюлозы, фильтрация, константы промывки, варочный котел, жесткость целлюлозы, константы фильтрования, скорость фильтрации, технологический регламент, эффективность, гидрораспределители промывной жидкости.

Периодические процессы варки и промывки целлюлозы наиболее удобно изучать во временных факторах, так как эти процессы осуществляются в разное время. Причем временные факторы строго ограничиваются технологическим регламентом.

В работах [2–5] рассмотрены математические методы описания процессов промывки и даны некоторые механизмы их протекания с расчетом кинетических коэффициентов, определяющих эти процессы.

Например, в работе [2] рассмотрена математическая модель процесса промывки целлюлозы, которая сводится к системе дифференциальных уравнений, описывающих диффузионную стадию промывки целлюлозы:

$$\frac{\partial^2 C_1}{\partial x \partial t} + \frac{K_1 a \partial C}{\rho \partial x} + \frac{K_1 a \partial C}{W_1 \partial t} = 0,$$

где  $C$ ,  $C_1$  – начальные и текущие концентрации распределяемого вещества;

$K_1$  – объемный коэффициент массопередачи;

$a$  – удельная поверхность целлюлозы;

$\rho = fE$ ;

$f$  – коэффициент пропорциональности;

$E$  – пористость промываемого осадка;

$W_1$  – скорость фильтрации промывной жидкости через слой волокна.

Объемный коэффициент массопередачи сложно определить из-за трудностей соблюдения критериев подобия этих процессов в лабораторных и промышленных условиях.

На практике нам важна скорость фильтрации промывной жидкости  $W_1$  и концентрация распределяемого вещества в отбираемых пробах в зависимости от продолжительности  $t$  промывки. Эти величины можно измерять на промышленном оборудовании.

Анализ системы промывки сульфитной целлюлозы, который выполняется в промышленных условиях в варочных котлах вместимостью 320 м<sup>3</sup>, позволяет определить скорость фильтрации промывной жидкости в зависимости от избыточного давления в котле, а также свойств и сопротивления осадка, которые функционально зависят от жесткости вырабатываемых видов целлюлозы.

В таблице приведены экспериментальные данные при отборе щелока в процессе высокотемпературной промывки целлюлозы в варочном котле объемом 320 м<sup>3</sup> при избыточном давлении. Промывную жидкость на промывку подавали через гидрораспределитель в нижнюю горловину варочного котла, а фильтрат отбирали из верхней горловины.

В результате исследований высокотемпературной промывки при избыточном давлении определена функциональная зависимость скорости фильтрации от гидравлического давления в варочном котле:

$$W_1 = f(P).$$

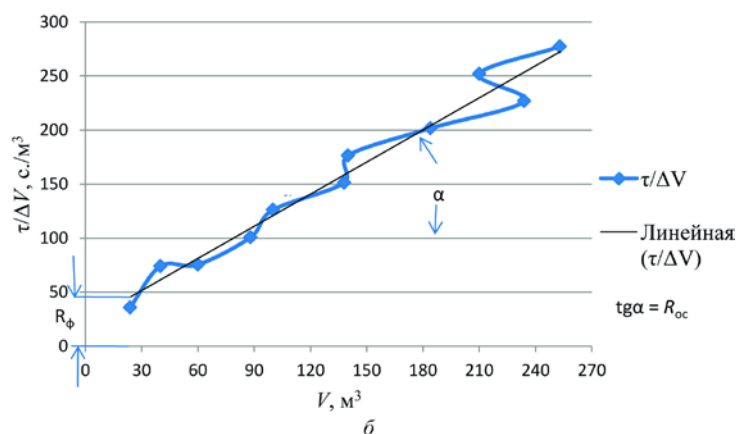
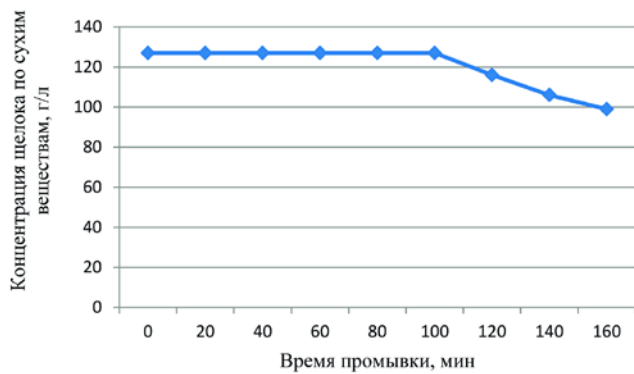
**Результаты, полученные при отборе щелока после сульфитной варки целлюлозы средней жесткости (Ж = 63)**

Время отбора щелока, мин	Средняя скорость вытеснения, м <sup>3</sup> /мин	Давление в котле $P \cdot 10^{-5}$ , Па	Температура отбираемого щелока, °С	Содержание мелкого волокна, мг/л	Объем отбираемого щелока, м <sup>3</sup>
14	1,7	1,9	109	27,6	23,8
20	2,0	2,0	109	27,2	40,0
30	2,0	2,2	109	14,5	60,0
40	2,2	2,2	109	19,0	88,0
50	2,0	2,0	109	16,0	100,0
60	2,3	2,3	109	18,6	138,0
70	2,0	2,2	109	8,6	140,0
80	2,3	2,2	110	24,6	184,0
90	2,6	2,2	110	19,2	234,0
100	2,1	2,2	108	14,5	210,0
110	2,3	2,3	108	18,2	253,0
120	3,0	2,2	108	–	360,0
130	2,4	2,2	107	–	312,0
140	2,8	2,2	106	–	392,0
150	1,2	2,2	90	–	180,0

Примечание. Отбор щелока через верхнюю сетку шел стабильно. После выгрузки котла сетка забита осадком концентрацией 35 %.

Это согласуется с теорией фильтрации [1], однако по истечении некоторого времени скорость фильтрации начинает резко уменьшаться, что и демонстрируют данные, приведенные в таблице. После 120 мин отбора фильтрата скорость фильтрации резко снижается из-за сжатия осадка, образовавшегося на фильтрующей сетке в верхней части варочного котла. Из данных таблицы видно, что до 120 мин процесс фильтрации происходит при постоянных скорости фильтрации и давлении, поэтому графическая зависимость  $\frac{\tau}{\Delta V} = f(V)$  позволяет определить сопротивление осадка и сопротивление фильтрующей перегородки в этом процессе. Подобная зависимость представлена на рисунке, где  $\tau$  – время промывки, мин;  $V$  – объем отобранного за это время фильтрата, м<sup>3</sup>.

Прямая линия на этом графике отсекает на линии  $\frac{\tau}{\Delta V}$  отрезок, который характеризует сопротивление фильтрующей перегородки  $R_\phi$ , установленной в верхней части варочного котла, тангенс угла наклона прямой – сопротивление осадка, образующегося на фильтровальной перегородке. Из рисунка *a* видно, что процесс промывки методом вытеснения в варочном котле имеет два периода.



Промывка методом вытеснения при варке сульфитной целлюлозы:  
*a* – концентрация отбираемого щелока; *б* – соотношение  $\frac{\tau}{\Delta V}$

В первом периоде промывки процесс протекает при постоянных температуре и концентрации вытесняемого щелока, во втором периоде наблюдается резкое снижение температуры промывки и концентрации отбираемого щелока по сухим веществам. Средняя скорость фильтрации при выбранных условиях – 2,25 м<sup>3</sup>/мин. При повышении гидравлического давления в котле в процессе промывки целлюлозы методом вытеснения скорость фильтрования увеличивается, при повышении температуры промывной жидкости возрастает концентрация отбираемого щелока. В результате первый период при определенных условиях может обеспечить высокую эффективность промывки по заданному технологическому регламенту. Из теории фильтрования [1] известно, что при постоянном давлении фильтрования объем фильтрата, прошедшего через 1 м<sup>2</sup> фильтрующей поверхности, связан со временем следующим уравнением:

$$V^2 + 2VC = K\tau, \quad (1)$$

где  $V$  – объем фильтрата, м<sup>3</sup>;

$C$  и  $K$  – константы фильтрования, учитывающие сопротивление фильтрующей перегородки и физико-химические свойства осадка и жидкости, а также режим фильтрования, м<sup>2</sup>/с;

$\tau$  – время фильтрования, с.

Из рисунка б можно определить константы фильтрования:

$$K = \frac{2}{\operatorname{tg}\alpha}; \quad C = \frac{R_{\phi}K}{2},$$

где  $\operatorname{tg}\alpha = R_{\text{ос}}$ ;

$R_{\text{ос}}$  – сопротивление осадка.

Если известна  $K$ , то можно вычислить концентрацию фильтрата во втором периоде промывки:

$$C = C_1 e^{-\frac{KW\tau}{\delta}}, \quad (2)$$

где  $C$  – концентрация фильтрата в конце первого периода промывки, кг/м<sup>3</sup> сухих веществ;

$C_1$  – концентрация фильтрата во втором периоде промывки, кг/м<sup>3</sup> сухих веществ;

$e$  – основание натурального логарифма,  $e = -2,718$ ;

$K$  – коэффициент находится экспериментально из рисунка б, в нашем случае  $K = 2,2$  м<sup>2</sup>/с;

$W$  – удельная интенсивность промывки, или скорость прохождения промывной воды, в нашем случае с учетом поверхности сита  $W = 0,012$  м/с;

$\tau$  – продолжительность промывки, с;

$\delta$  – толщина слоя осадка, м.

Уравнение (2) после логарифмирования примет следующий вид:

$$\frac{\tau_2 - \tau_1}{\lg C_1 - \lg C_2} = \frac{2,3 \delta}{K W}, \quad (3)$$

где  $\tau_2$  и  $\tau_1$  – время начала и конца наблюдений в любой период времени второго периода промывки, в нашем случае  $\tau_1 = 8280$  с;  $\tau_2 = 8310$  с;

$C_1$  и  $C_2$  – соответствующие концентрации отбираемого фильтрата во втором периоде промывки, в нашем случае  $C_1 = 127$  кг/м<sup>3</sup>;  $C_2 = 110$  кг/м<sup>3</sup>.

Расчет по уравнению (3) показывает, что толщина слоя из целлюлозных волокон в варочном котле должна быть 5,4 м.

Промывка слоя такой высоты представляет определенные технологические трудности, из-за особых свойств структурированного осадка, который имеет разную концентрацию по высоте слоя и который под действием компрессионных сил давления способен сжиматься, уменьшая скорость фильтрации.

Как видно из рисунка, сопротивление фильтрующей перегородки не слишком велико, поэтому для снижения уноса мелкого волокна можно верхнюю фильтрационную зону обрамлять фильтрующей сеткой более мелкого сечения.

Разработка оптимального режима высокотемпературной промывки в варочных котлах позволит предприятиям решить многие технико-экономические и экологические проблемы, связанные с процессами варки, промывки и отбелики целлюлозы. После высокотемпературной промывки целлюлоза белится легко и с меньшим расходом отбельных химикатов на 1 т в.с.ц.

#### Выводы

1. Изучен процесс промывки сульфитной целлюлозы методом вытеснения в варочных котлах вместимостью 320 м<sup>3</sup>.
2. Предложен метод расчета констант фильтрования.
3. Показано, что процесс промывки целлюлозы в варочных котлах проходит в два периода. В первом периоде процесс промывки методом вытеснения протекает при постоянных концентрации щелока и температуре, во втором – при падении концентрации щелока и температуры.
4. Расчетами показано, что высота слоя к концу промывки методом вытеснения в этих котлах может достигать до 5,4 м при схеме вытеснения снизу вверх.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жужиков В.А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий. М.: Химия, 1980. с. 398.
2. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Луговой Ю.Е. // ТОХТ. 1972. Т. 6, № 2. с. 297.
3. Кравченко М.И., Ефремов Т.В., Киприанов А.И., Уткин С.П. О методе определения коэффициента стесненной диффузии в целлюлозосодержащем материале // Лесн. журн. 1981. № 1. С. 77–79. (Изв. высш. учеб. заведений).

4. *Кравченко М.И., Киприанов А.И.* Механизм процесса промывки сульфатной целлюлозы в слое // *Целлюлоза бумага картон*. 2000. № 9-10. С. 36–37.

5. *Kribins S.W/Me.* Применение теории диффузии к промывке сульфатной целлюлозы // *TAPPI*. 1960. Т. 43, № 10. Р. 801–805.

Поступила 26.12.2014

UDC 661.728.2

### Experimental Study of Pulp Washing Process

*M.I. Kravchenko, Candidate of Engineering, Associate Professor*

Saint Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, St. Petersburg, 194021, Russia; e-mail: ola.ola07@mail.ru

The process of pulp washing by sulfite liquor displacement in batch cooking digester was studied. Filtrating constants and filtration rate depending on filtering layer depth and excess pressure for large-scale batch digesters were computed. It was shown that dry solids extraction (soluble matter) from pulp fibers flow in two stages. The first stage – in out-diffusive area, while the second went on in internal diffusive area. It was showed that a depth of pulp layer at the end of displacement washing in cooking digesters of 320 m<sup>3</sup> capacity could reach up to 5,4 m in case of upward flow. The filtrating constants were calculated. It was found a relationship between filtration rate and hydraulic pressure at pulp washing in the cooking digesters equipped with hydraulic distributor for washing liquor. It was shown that at a certain hydraulic pressure in cooking digester a filtration rate of liquor might be constant till 120-th minute. High temperature pulp washing in batch cooking digesters enables producing easy-bleachable pulp.

*Keywords:* mathematical model, pulping, washing, pulp bleaching, filtration, washing constants, cooking digester, pulp hardness, filtrating constants, filtration rate, engineering regulations, efficiency, hydraulic distributors of washing liquor.

### REFERENCES

1. Zhuzhikov V.A. *Fil'trovanie. Teoriya i praktika razdeleniya suspenziy* [Filtration. Theory and Practice of Separating Suspensions]. Moscow, 1980. 398 p.

2. Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Lugovoy Yu.E. *TOKhT*, 1972. Vol. 6, no. 2, 297 p.

3. Kravchenko M.I., Efremov T.V., Kiprianov A.I., Utkin S.P. О методе определения коэффициента стесненной диффузии в тsellyulozosoderzhashchem materiale [About the Method of Determining the Coefficient of Diffusion in a Constrained Cellulose-Containing Material]. *Lesnoy zhurnal*, 1981, no. 1, pp. 77–79.

4. Kravchenko M.I., Kiprianov A.I. Mekhanizm protsessy promyvki sul'fatnoy tsellyulozy v sloe [The mechanism of the Cleaning Process in the Sulfate Pulp Layer]. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2000, no. 9-10, pp. 36–37.

5. S.W/Me. Kribins. *Primenenie teorii diffuzii k promyvke sul'fatnoy tsellyulozy* [Application of the Theory of Diffusion to the Sulfate Pulp Washing]. 1960, no. 10, pp. 801–805.

Received on December 26, 2014

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.5.183