

УДК 676.022.623

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-192-200

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПЛОТНОСТИ ЧЕРНОГО ЩЕЛОКА ОТ СОДЕРЖАНИЯ СУХИХ ВЕЩЕСТВ (ХВОЙНАЯ ЦВВ)

**Ю.В. Севастьянова<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [ABE-4746-2020](https://orcid.org/0000-0002-1806-9052),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1806-9052>

**Е.А. Топтунов<sup>1</sup>**, инж. ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера»; ResearcherID: [ABE-4069-2020](https://orcid.org/0000-0001-8441-788X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8441-788X>

**Н.В. Щербак<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [ABE-4156-2020](https://orcid.org/0000-0002-7383-3826),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7383-3826>

**П.В. Солнцев<sup>2</sup>**, начальник ТЭЦ-2 производства картона;

ResearcherID: [ABE-4402-2020](https://orcid.org/0000-0001-5992-6981), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5992-6981>

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: y-sevastyanova@yandex.ru, zhenya.topunow2011@yandex.ru, n.sisoeva@narfu.ru

<sup>2</sup>АО «Архангельский целлюлозно-бумажный комбинат», ул. Мельникова, д. 1, г. Новодвинск, Архангельская область, Россия, 164900

**Аннотация.** Современная выпарная станция – это энергосберегающее производство упаренного щелока с высоким содержанием сухих веществ для обеспечения минимальных выбросов SO<sub>2</sub> из содорегенерационного котла. Такие станции оснащены аппаратами типа падающей пленки (Falling Film) и состоят из 5–7 ступеней. Необходимость совершенствования и создания новых концентраторов черного щелока обусловлена повышенным вниманием к вопросам охраны окружающей среды и желанием получать щелок с более высокой теплотворной способностью. Физические свойства черного щелока зависят от его состава и оказывают существенное влияние на подбор выпарных аппаратов и проектирование выпарных вакуумных установок. К основным свойствам, учитываемым в процессах выпарки и сжигания, относятся: плотность, вязкость, поверхностное натяжение, теплота сгорания и температура кипения. Важнейшими для процесса выпаривания щелока являются такие его характеристики, как вязкость, влияющая на способность к перекачиванию и конструктивные особенности, и плотность, с помощью которой контролируют содержание сухих веществ и процесс выпарки на основных стадиях регенерации щелока. Исследование выполнено в целях определения математической зависимости плотности черного щелока от содержания сухих веществ для хвойной целлюлозы высокого выхода. В задачи исследования входило: проанализировать влияние температуры и концентрации сухих веществ на плотность черного щелока от варки хвойной целлюлозы высокого выхода по технологическому потоку производства; разработать математическую модель зависимости плотности черного щелока сульфатной хвойной целлюлозы высокого выхода от концентрации и температуры; провести сравнительную апробацию результатов математической и корреляционной зависимости ТАРР. Получены математическая зависимость плотности черного щелока от температуры и содержания сухих веществ, необходимая для оперативных технологических расчетов отделов регенерации химикатов в сульфатном производстве волокнистых полуфабрикатов для картона, а также на основании проведенных исследований, регрессионного анализа и математической обработки результатов – уравнение математической зависимости, позволяющее с наибольшей точностью вычислить плотность черного щелока от сульфатной варки хвойной целлюлозы высокого выхо-

да:  $\rho = 0,974 + 0,0071x - 0,0002t - 0,000007xt - 0,00000045t^2 - 0,0000045x^2$ . Проведена сравнительная апробация результатов разработанной математической зависимости и корреляционной зависимости (опубликованной в ТАРПИ) плотности черного щелока от содержания сухих веществ, обнаружен высокий уровень сопоставимости предложенных математических уравнений.

**Для цитирования:** Севастьянова Ю.В., Топтунов Е.А., Щербак Н.В., Солнцев П.В. Определение математической зависимости плотности черного щелока от содержания сухих веществ (хвойная ЦБВ) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 192–200. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-192-200

**Ключевые слова:** сульфатная целлюлоза высокого выхода, регенерация химикатов, физические свойства черного щелока, содержание сухих веществ, плотность черного щелока, выпарка, математическая модель.

### Введение

Одним из основополагающих аспектов экономической целесообразности сульфатной варки является возможность регенерации химикатов [1], что снижает потери щелочи и серы и, следовательно, уменьшает расход свежих химикатов. Цикл регенерации современного сульфатного завода позволяет восстанавливать и повторно использовать примерно 95...97 % химикатов. Несмотря на то, что необходимость соблюдения строгих нормативов допустимых выбросов и сокращения потерь химикатов в настоящее время требуют совершенствования процесса регенерации, принципиальная схема практически не изменилась. Одним из ключевых процессов регенерации химикатов является выпарка черного щелока, способствующая увеличению содержания сухих веществ, перед сжиганием [2, 3, 5].

Сухой остаток черного щелока состоит на 30...40 % из минеральных и на 60...70 % из органических веществ. Его элементный состав определяется видом древесины и условиями ее делигнификации [7, 8, 13].

Современная выпарная станция – это экологически безопасное энергосберегающее производство упаренного щелока с высоким содержанием сухих веществ. Станции оснащены аппаратами типа падающей пленки (Falling Film) и состоят из 5–7 ступеней. Два основных фактора – охрана окружающей среды и повышение теплотворной способности щелока – стимулировали создание и совершенствование концентраторов черного щелока.

Преимущества высокого содержания сухих веществ черного щелока общеизвестны: высокая тепловая и электрическая производительность; практическое отсутствие выбросов  $SO_2$  при содержании сухих веществ в черном щелоке более 75 %; повышение степени восстановления сульфата до 96...99 %; более простая эксплуатация содорегенерационного котла (СРК) [17, 18]. Высокое содержание сухих веществ в щелоке уменьшает количество образующихся дымовых газов в топке СРК по отношению к высвобождающемуся количеству тепла, что приводит к повышению температуры в нижней части топки и снижению количества дымовых газов [9].

Основные трудности выпаривания черного щелока в области высокого содержания сухих веществ – его аномально большая вязкость и вероятность быстрого образования отложений [12, 14]. Вязкость черного щелока значительно возрастает при повышении содержания сухих веществ до 80...85 %.

Физические свойства сульфатного черного щелока влияют на выбор типа выпарного аппарата, условия его эксплуатации [11, 14, 15, 19]. Известно, что вязкость черных сульфатных щелоков при содержании сухих веществ до 30 % практически не зависит от вида сырья, породы древесины, режима варки и жесткости получаемой целлюлозы, поскольку увеличение степени провара целлюлозы, обусловленное более жесткими условиями варки, приводит к деструкции макромолекул лигнина на сравнительно низкомолекулярные фрагменты [1].

Физические свойства черного щелока напрямую зависят от плотности, вязкости, температуры кипения, поверхностного натяжения и теплоты сгорания [2]. Например, щелок температуры 90 °С с концентрацией сухих веществ 16 % имеет плотность 1050 кг/м<sup>3</sup>, а с концентрацией сухих веществ 70 % – 1430 кг/м<sup>3</sup>.

На основных стадиях регенерации щелоков в процессе выпарки контроль свойств черного щелока ведут по содержанию сухого вещества, изменяющему в зависимости от вида сырья, выхода полуфабриката, условий варки и других факторов, поэтому в каждом конкретном случае необходимо экспериментально определять индивидуальную зависимость между плотностью и содержанием сухого вещества в щелоке. Международной организацией TAPPI предложена корреляционная зависимость для определения плотности щелока ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>) как функции от содержания сухих веществ и температуры [16, 18]:

$$\rho = 1,007 + 0,006x - 0,000495t, \quad (1)$$

где  $x$  – содержание сухих веществ, %;  $t$  – температура, °С.

Цель исследования – определение математической зависимости плотности черного щелока от содержания сухих веществ при производстве сульфатной хвойной целлюлозы высокого выхода (ЦВВ).

Задачи исследования:

изучить влияние температуры и концентрации сухих веществ на плотность черного щелока, отбираемого в разных точках технологического процесса;

разработать математическую модель зависимости плотности черного щелока от концентрации и температуры;

сравнить результаты расчета плотности черного щелока по полученной математической зависимости и предложенной TAPPI [18].

#### *Объекты и методы исследования*

Работы по исследованию черного щелока от производства сульфатной хвойной ЦВВ выполнены в Инновационно-технологическом центре «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова (г. Архангельск).

Отбор проб проводился в течение года на одном из ведущих целлюлозно-бумажных предприятий России. Точки отбора и содержание сухих веществ в пробах щелока представлены в таблице.

## Содержание сухих веществ в пробах отработанных щелоков

Точка отбора	Проба	Концентрация сухих веществ, %
1	Щелок из испарительных циклонов	18...22
2	Смесь фильтратов с промывки ЦВВ и щелока с котла	10...16
3	Щелок из питательных баков (1)	15...20
4	Щелок из питательных баков (2)	18...22
5	Полуупаренный щелок	25...28
6	Полуупаренный щелок	28...32
7	Крепкий щелок	38...42
8	Крепкий щелок	48...52
9	Крепкий щелок после баков	52...54
10	Концентрированный щелок после концентраторов (1)	63...65
11	Концентрированный щелок после концентраторов (2)	65...68

Массовую долю сухих веществ определяли по методу ВНИИБ [9]. Калибровку лабораторной посуды перед проведением исследований осуществляли по ГОСТ 8.234–2013 [4].

Содержание сухих веществ ( $B$ , %) рассчитывали по формулам:

в плотном черном щелоке

$$B = ((q_2 - q_1)V100)/G; \quad (2)$$

в слабом черном щелоке

$$B = ((q_2 - q_1)100)/(\gamma_{15}V_1), \quad (3)$$

где  $q_1$  – масса стаканчика с фильтром, г;  $q_2$  – масса стаканчика с фильтром и сухим остатком, г;  $V$  – вместимость мерной колбы, см<sup>3</sup>;  $G$  – масса плотного щелока, г;  $\gamma_{15}$  – плотность щелока при 15 °С, г/см<sup>3</sup>;  $V_1$  – объем щелока, взятый на анализ, см<sup>3</sup>.

Предельные границы относительной погрешности результатов измерений не превышают  $\pm 0,5$  % при доверительной вероятности  $p = 0,95$ .

Плотность слабого, укрепленного и полуупаренного щелоков определяли поверенными ареометрами. Одновременно замеряли температуру щелока и найденные значения плотности щелока приводили к плотности при 15 °С:

$$\rho = \rho_t - 0,052(15 - t_{щ}), \quad (4)$$

где  $\rho_t$  – измеренная плотность щелока, г/см<sup>3</sup>; 0,052 – эмпирический коэффициент;  $t_{щ}$  – фактическая температура щелока, °С.

Определив плотность черного щелока при 15 °С, можно по таблице [10] установить в нем массовую долю сухих веществ (%) и содержание общей щелочи в пересчете на Na<sub>2</sub>O (г/л).

Статистическую обработку результатов измерений плотности проводили традиционно, при этом рассчитывали следующие параметры: среднее арифметическое результатов наблюдений; среднее квадратическое отклонение; коэффициент вариации; наличие грубых погрешностей; оценку среднего квадратического отклонения результата измерений; доверительные границы среднего квадратического отклонения результата измерения.

Для определения степени (уровня) зависимости результатов измерений друг от друга использовали коэффициент парной корреляции, для оценки значимости коэффициента корреляции – критерий Стьюдента. Если расчетное значение критерия Стьюдента больше табличного  $t > t_{1-\alpha k}$ , то коэффициент корреляции следует признать значимым [6].

Плотность слабого, укрепленного и полуупаренного щелоков при комнатной температуре измеряли ареометром. Упаренный (или плотный) щелок имеет высокую вязкость, для снижения которой он должен быть предварительно нагрет до температуры 70...90 °С [9].

#### Результаты исследования и их обсуждение

Опытным путем получены данные о влиянии содержания сухих веществ и температуры черного щелока на его плотность. Исследования проводили в диапазоне содержания сухих веществ от 10,00 до 64,20 % и при температурах от 15 до 90 °С.

Математическая обработка массива данных (состоящего из 2912 точек) методами регрессионного анализа позволила построить поверхность отклика плотности черного щелока от концентрации сухих веществ и температуры (рис. 1).

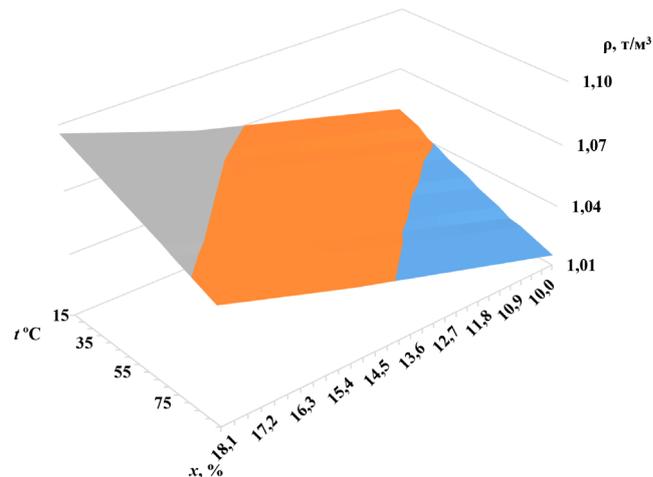


Рис. 1. Зависимость плотности черного щелока ( $\rho$ ) от концентрации сухих веществ ( $x$ ) и температуры ( $t$ ) (варка хвойной ЦВВ)

Fig.1. Dependence of black liquor density ( $\rho$ ) on dry matter content ( $x$ ) and temperature ( $t$ ) (high yield cooking of softwood pulp)

Регрессионный анализ (уровень доверительной вероятности – 0,95) показал, что наиболее адекватно влияние этих факторов описывается следующими уравнениями:

полином 1-й степени:

$$\rho = 0,994 + 0,006x - 0,0005t;$$

полином 2-й степени:

$$\rho = 0,974 + 0,0071x - 0,0002t - 0,000007xt - 0,00000045t^2 - 0,0000045x^2,$$

где  $\rho$  – плотность черного щелока, г/см<sup>3</sup>;  $x$  – содержание сухих веществ, %;  $t$  – температура, °С.

Коэффициент корреляции для полинома 1-й степени составляет 0,999, относительная погрешность определения – 0,21 %, для полинома 2-й степени – 1, относительная погрешность определения – 0,00001 %.

Таким образом, более точно зависимость можно описать полиномом 2-й степени, но даже при использовании полинома 1-й степени среднее отклонение между экспериментальными и расчетными значениями составляет 0,3 %. Однако в единичных случаях будет наблюдаться увеличение отклонения при высоких значениях температуры и содержания сухих веществ. Например, при температуре 15 °С и содержании сухих веществ 10,00 % плотность, рассчитанная по уравнению, составит 1,051 г/см<sup>3</sup>, в то время как значение, полученное практическим путем, – 1,049 г/см<sup>3</sup>; при температуре 90 °С и содержании сухих веществ 64,20 % имеем соответственно 1,360 и 1,344 г/см<sup>3</sup>. При использовании зависимости TAPPI, несмотря на то что среднее отклонение между практическими и расчетными значениями составляет 0,53 %, можно наблюдать значительные отклонения при невысоких температуре и концентрации сухих веществ. Например, при температуре 15 °С и содержании сухих веществ 10,00 % плотность, рассчитанная по уравнению, составит 1,060 г/см<sup>3</sup>, а экспериментальное значение – 1,049 г/см<sup>3</sup>. Подобные отклонения сохраняются при невысоких температурах (весь их диапазон) и при любых температурах, если концентрация сухого вещества в этом случае приблизительно до 21,00 %. Необходимо отметить, что, хотя полином 2-й степени обладает большей точностью, значение плотности, рассчитанное с помощью полинома 1-й степени, точнее согласуется с опытными данными в областях невысоких концентраций и температур.

#### Выводы

1. Плотность черного щелока от варки сульфатной хвойной ЦВВ незначительно уменьшается при повышении температуры от 15 до 90 °С и значительно увеличивается с ростом содержания сухих веществ.

2. Разработана математическая зависимость плотности сульфатного черного щелока от концентрации сухих веществ и температуры. Установлено, что математическая зависимость с достаточной точностью может быть описана полиномами 1-й и 2-й степени; для каждого вида уравнения рассчитаны коэффициенты корреляции и определены относительные погрешности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Богомолов Б.Д., Сапотницкий С.А., Соколов О.М. и др. Переработка сульфатного и сульфитного щелоков. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 360 с. [Bogomolov B.D., Sapotnitskiy S.A., Sokolov O.M. et al. *Processing of Sulphate and Sulphite Liquors*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 360 p.]

2. Волков А.Д., Григорьев Г.П. Физические свойства щелоков целлюлозного производства. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Лесн. пром-сть, 1970. 120 с. [Volkov A.D., Grigor'yev G.P. *Physical Properties of Pulp Production Liquors*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1970. 120 p.]

3. Горбовский Б.Г. Устройство и обслуживание выпарных станций сульфат-целлюлозного производства: пособие для мастеров и выпарщиков. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1953. 189 с. [Gorbovskiy B.G. *Design and Maintenance of Evaporation Stations of Sulphate Pulp Production*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1953. 189 p.]

4. ГОСТ 8.234–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Меры вместимости стеклянные. Методика поверки. Дата введ. 2015–07–01. М.: Стандартинформ, 2014. 11 с. [*State Standard. GOST 8.234–2013. State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Volumetric Glass Ware. Verification Procedure*. Moscow, Standardinform Publ., 2014. 11 p.].
5. Григорай О.Б., Иванов Ю.С., Комиссаренков А.А., Смолин А.С. Переработка черных щелоков сульфатного производства. СПб.: СПбГТУРП, 2012. 106 с. [Grigoray O.B., Ivanov Yu.S., Komissarenkov A.A., Smolin A.S. *Processing of Black Liquors of Sulphate Production*. Saint Petersburg, SPb STUPP Publ., 2012. 106 p.].
6. Гурьев А.В., Казаков Я.В., Комаров В.И., Хованский В.В. Практикум по технологии бумаги / под ред. проф. В.И. Комарова. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2001. 112 с. [Gur'yev A.V., Kazakov Ya.V., Komarov V.I., Khovanskiy V.V. *Laboratory Course on Paper Technology*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2001. 112 p.].
7. Миловидова Л.А., Комарова Г.В. Производство сульфатной целлюлозы. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2001. 31 с. [Milovidova L.A., Komarova G.V. *Production of Sulphate Pulp*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2001. 31 p.].
8. Миловидова Л.А., Севастьянова Ю.В., Комарова Г.В., Дубовый В.К. Регенерация химикатов в производстве сульфатной целлюлозы (каустизация и регенерация извести). Архангельск: САФУ, 2010. 157 с. [Milovidova L.A., Sevastyanova Yu.V., Komarova G.V., Dubovyy V.K. *Recovery of Chemicals in the Production of Sulphate Pulp (Lime Caustization and Regeneration)*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2010. 157 p.].
9. Свидетельство № 411 о метрологической аттестации МВИ. Метод определения массовой доли сухих веществ в черном щелоке. ВНИИБ. Л., 1991. 4 с. [*Certificate No. 411 on Metrological Certification of Measurement Procedures. Method for Determining the Mass Fraction of Solids in Black Liquor*. All-Russian Scientific Research Institute of Pulp and Paper Industry, 1991. 4 p.].
10. Селянина Л.И., Селянина С.Б., Кутакова Н.А. Технология сульфатных щелоков. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. 37 с. [Selyanina L.I., Selyanina S.B., Kutakova N.A. *Sulphate Liquor Technology*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2002. 37 p.].
11. Справочник бумажника: в 3 Т. 2-е. изд. перераб. и доп. Т. 1. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 841 с. [*Handbook for Paper Industry Workers*. In 3 vol. Vol. 1. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1964. 841 p.].
12. Элконин Н.В. Изучение свойств отработанных растворов производства целлюлозы сульфатным методом. М.: Бум. пром-сть, 1941. № 2. 21 с. [Elkonin N.V. *Study of Properties of Spent Solutions of Pulp Production by Kraft Method*. Moscow, Bumazhnaya promyshlennost' Publ., 1941, no. 2. 21 p.].
13. Adams T. Sodium Salt Scaling in Black Liquor Evaporators and Concentrators. *Tappi Journal*, 2001, vol. 84(6), pp. 1–18.
14. Andreuccetti M.T., Leite B.S., Hallak d'Angelo J.V. Eucalyptus Black Liquor – Density, Viscosity, Solids and Sodium Sulfate Contents Revisited. *O Papel*, 2011, vol. 72, no. 12, pp. 52–57.
15. Bayuadri C., Verril C.L., Rousseau R.W. Stability of Sodium Sulfate Dicarboxylate in Black Liquor Concentrators. *TAPPI Engineering, Pulping and Environmental Conference Proceedings*. TAPPI Press, 2006.
16. Bialik M.A., Theliander H., Sedin P., Verril C.L., DeMartini N. Solubility and Solid Phase Composition in Boiling-Temperature  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ – $\text{Na}_2\text{SO}_4$  Solutions: A Modeling Approach. *TAPPI Engineering, Pulping and Environmental Conference Proceedings*. TAPPI Press, 2007, pp. 1471–1498.
17. Cardoso M., Oliveira E.D., Passos M.L.A. Kraft Black Liquor of Eucalyptus from Brazilian Mills. *O Papel*, 2006, vol. 67, no. 2, pp. 57–83.

18. Clay D.T. Evaporation Principles and Black Liquor Properties. *TAPPI Kraft Recovery Short Course*. TAPPI, 2011, pp. 3.1-1–3.1-6. Available at: <https://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/3-1.pdf> (accessed 18.03.20).

19. Holmlund K., Parviainen K. Evaporation of Black Liquor. Ch. 12. *Chemical Pulping*. Ed. by J. Gullichsen, C.-J. Fogelholm. Helsinki, Fapet Oy, 1999, pp. B37–B93.

#### DETERMINATION OF THE MATHEMATICAL DEPENDENCE OF THE BLACK LIQUOR DENSITY ON THE DRY MATTER CONTENT (HIGH YIELD SOFTWOOD PULP)

*Yuliya V. Sevastyanova*<sup>1</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [ABE-4746-2020](https://orcid.org/0000-0002-1806-9052), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1806-9052>

*Evgeniy A. Toptunov*<sup>1</sup>, Engineer of the Innovative Facilities Engineering and Innovation Center «Advanced Northern Bioresources Processing Technologies»;

ResearcherID: [ABE-4069-2020](https://orcid.org/0000-0001-8441-788X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8441-788X>

*Natalia V. Shcherbak*<sup>1</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [ABE-4156-2020](https://orcid.org/0000-0002-7383-3826), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7383-3826>

*Pavel V. Solntsev*<sup>2</sup>, Head of the CHPP-2 of Cardboard Production;

ResearcherID: [ABE-4402-2020](https://orcid.org/0000-0001-5992-6981), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5992-6981>

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: [y-sevastyanova@yandex.ru](mailto:y-sevastyanova@yandex.ru), [zhenya.toptunow2011@yandex.ru](mailto:zhenya.toptunow2011@yandex.ru), [n.sisoeva@narfu.ru](mailto:n.sisoeva@narfu.ru)

<sup>2</sup>Arkhaneglsk Pulp and Paper Mill, ul. Mel'nikova, 1, Novodvinsk, Arkhangelsk region, 164900, Russian Federation

**Abstract.** A modern evaporator station is an energy-saving production of evaporated liquor with high dry matter content for ensuring the minimum SO<sub>2</sub> emissions from the soda recovery boiler. Such stations are equipped with Falling Film devices and consist of 5–7 stages. The necessity to improve and create new black liquor concentrators is driven by the increased attention to environmental issues and the wish to produce liquor with a higher calorific value. The physical properties of black liquor depend on its composition and have a significant impact on the selection and design of evaporators. The main properties considered in the evaporation and combustion processes are density, viscosity, surface tension, heating value and boiling temperature. One of the most important characteristics of the liquor evaporation is its viscosity, since it determines the ability of the liquor to pump and affects the design features. Another equally important characteristic is density. With its help, the dry matter content and evaporation process in the main stages of the liquor regeneration are regulated. The study was carried out to determine the mathematical dependence of the black liquor density on the dry matter content for high yield softwood pulp. The study objectives were the following: analyze the effect of the dry matter temperature and concentration on the density of black liquor obtained from cooking high yield softwood pulp according to the technological flow of production; develop a mathematical model of dependence of the black liquor density of high yield sulphate softwood pulp on the concentration and temperature; conduct the TAPPI comparative testing of the results of mathematical and correlation dependences. A mathematical dependence of the black liquor density on the temperature and dry matter content required for immediate technological calculations of chemical regeneration departments in sulphate production of semi-finished products for cardboard was obtained. The following equation of mathematical dependence based on the conducted research, regression analysis, and mathematical processing of the results was obtained:  $\rho = 0.974 + 0.0071x - 0.0002t - 0.000007xt - 0.00000045t^2 - 0.0000045x^2$  (where

$\rho$  – density, g/cm<sup>3</sup>;  $x$  – dry matter content, %;  $t$  – temperature, °C). It allows calculating with the highest accuracy the density of black liquor obtained from cooking high yield softwood sulphate pulp. Comparative testing of the results of the developed mathematical dependence and correlation dependence (published by TAPPI) of black liquor density on the dry matter content was carried out. A high level of comparability of the proposed mathematical equations was found.

**For citation:** Sevastyanova Yu.V., Toptunov E.A., Shcherbak N.V., Solntsev P.V. Determination of the Mathematical Dependence of the Black Liquor Density on the Dry Matter Content (High Yield Softwood Pulp). *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 192–200. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-192-200

*Keywords:* high yield sulphate pulp, chemical recovery, black liquor physical properties, dry matter content, black liquor density, evaporation, mathematical model.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
The authors declare that there is no conflict of interest*

Поступила 18.03.20 / Received on March 18, 2020

---