



ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СУЛЬФАТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ МЕТОДОМ ПРИРАЩЕНИЯ ЭКСЕРГИЙ

П.В. Луканин

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий
и дизайна, г. Санкт-Петербург, Россия
lukanin@gturp.spb.ru

Резюме: В настоящей работе приводятся результаты эксергетического анализа технологической схемы производства сульфатной целлюлозы.

В работе подробно рассмотрены результаты эксергетических балансов основных процессов производства сульфатной целлюлозы – регенерация щелочей в СРК, процесса выпаривания черного щелока, варки технологической щепы, процесс декарбонизации известняка.

Выполненный анализ технологической схемы позволяет выявить наиболее «узкие» места в использовании тепловой энергии и обосновать основные направления повышения энергоэффективности рассмотренных процессов. Основная доля затраченной эксергии в существующем процессе производства целлюлозы связана с регенерацией щелочи в СРК и составляет 70 % от всей подведенной эксергии в схеме.

Рассмотрен способ гидротермального получения химикатов в процессе производства сульфатной целлюлозы.

В работе представлена принципиальная схема и анализ технологии теплоты производства сульфатной целлюлозы, суть которой заключается в выводе органической составляющей из черного щелока путем его автоклавной карбонизации дымовыми газами, отходящими из известнерегенерационной печи при температуре 80-90 °С. Вывод органики в этих условиях может достигать 70 %.

В рассмотренном варианте эксергетический КПД $\eta_e = 80$ % значительно выше, чем КПД существующей схемы регенерации химикатов $\eta_e = 48$ %. Это свидетельствует о высокой энергетической эффективности предлагаемого способа.

Ключевые слова: эксергетический анализ, технология теплоты, производство сульфатной целлюлозы, выпаривание, черный щелок, эксергетический КПД, энергосбережение.

Для цитирования: П.В. Луканин. Оценка энергетической эффективности производства сульфатной целлюлозы методом приращения эксергий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 2. С. 3-11. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-3-11.

ESTIMATION OF ENERGY EFFICIENCY OF KRAFT PULP PRODUCTION WITH THE EXERGY INCREMENT METHOD

PV. Lukanin

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Saint Petersburg, Russia
lukanin@gturp.spb.ru

Abstract: This article contains results of exergic analysis of kraft pulping flow chart.

The results of exergic balances of main kraft pulping processes such as alkali recovery at recovery boilers, black liquor evaporation, chips cooking, lime decarbonation are considered in details in the article.

The analysis of the process flow chart makes it possible to determine the bottlenecks in the use of heat energy and to substantiate principal lines for increasing energy efficiency of the processes under study. A main share of the exergy expended in the existing pulping process is due to alkali recovery in the recovery boiler and comprises 70% of the total exergy available in the system.

A procedure of hydrothermal production of chemicals in the process of kraft pulping is studied.

A schematic diagram and analysis of heat technique of the kraft pulping process which in fact consists of organic component removal from black liquor through its autoclave carbonation with flue gases releasing from lime kiln at the temperature 80-90 °C are given in the article. The removal of organic components under these conditions can reach 70 %.

In the studied version the exergic efficiency $\eta_e = 80 \%$ is considerably higher than that of the flow chart existing for chemicals recovery which is equal to $\eta_e = 48 \%$. This is the evidence of high energy efficiency of the method developed.

Key words: *exergic analysis, heat technique, kraft pulping process, evaporation, black liquor, energy efficiency, energy saving.*

For citation: Lukanin PV. Estimation of energy efficiency of kraft pulp production with the exergy increment method. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(2):3-11. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-3-11.

Введение

Главными целями основных положений «Энергетической стратегии России на период до 2030 г.», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации № 1715-Р, является определение путей и условий наиболее эффективного использования энергетических ресурсов, формирование роли энергии как основного фактора, определяющего повышение качества жизни населения.

Практическое достижение этой цели возможно при разработке научных основ энергосбережения, включая термодинамический анализ существующих или проектируемых систем, разработку тепловых схем на его основе, оптимизацию их параметров, интенсификацию процессов теплопередачи, разработку и освоение новых типов теплообменной аппаратуры. Для процессов химической технологии особенно важным является учет специфических особенностей технологического процесса.

Одним из основных направлений технического прогресса в целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) как отрасли химической технологии является инновационный путь развития на основе разработки новых ресурсосберегающих экологически чистых технологий и оборудования для повышения качества имеющихся и новых видов продукции, снижение энергетических затрат в технологических потоках целлюлозно-бумажного производства, что является актуальной задачей на современном этапе.

Эксергетический метод термодинамического анализа

Применяемый для определения термодинамической эффективности тепловых процессов метод тепловых балансов является отражением первого закона термодинамики и не учитывает качественную сторону теплоты.

Эксергетическим методом термодинамического анализа, учитывающим как первый, так и второй закон термодинамики удается устранить в значительной мере недостатки метода тепловых балансов. Несмотря на то, что эксергетический метод давно уже нашел признание для анализа термодинамических систем, он медленно внедряется в практику термодинамического анализа тепловых технологических схем. Это объясняется тем, что при применении классического метода эксергетического анализа не удается установить связь эксергетического КПД элемента с общим эксергетическим КПД сложной термодинамической системы (тепловой схемы технологического процесса).

Модификация метода эксергетического анализа – энтропийный метод (метод вычитания эксергетических потерь). Но замена понятного и обоснованного с термодинамических позиций эксергетического КПД предложенными относительными коэффициентами эксергетических потерь также не устраняет полностью недостатки классического эксергетического метода термодинамического анализа.

Развитие теории эксергетического метода термодинамического анализа проведено путем введения понятия приращения эксергий, что устраняет недостатки присущие изложенным выше методам. При составлении эксергетических балансов предлагается пользоваться не значениями эксергии относительно окружающей среды, а их приращениями в процессе взаимодействия тепловых потоков. Такой подход позволил установить математическую связь между эксергетическим КПД элемента с эксергетическим КПД сложной тепловой схемы, куда входит этот элемент.

Материалы и методы

В настоящей работе приводятся результаты эксергетического анализа технологии производства сульфатной целлюлозы. На основе этого анализа делается попытка обосновать основные пути энергосбережения в этом процессе.

При производстве целлюлозы (рис.1) по сульфатному способу древесная щепа обрабатывается белым щелоком (растворами натриевых щелочей). В процессе варки органические соединения, основная часть которых представлена лигнином, переходит в раствор. Конечный продукт глубокой химической переработки древесины – целлюлоза, остается в твердой фазе. После выпаривания черного щелока крепкий раствор подают в содорегенерационный котел (СРК) на сжигание. В результате сжигания органической части черного щелока образуется плав минеральных солей. Полученный раствор каустицируют путем его обработки оксидом кальция, после чего карбонат кальция направляют на декарбонизацию в обжиговые печи.

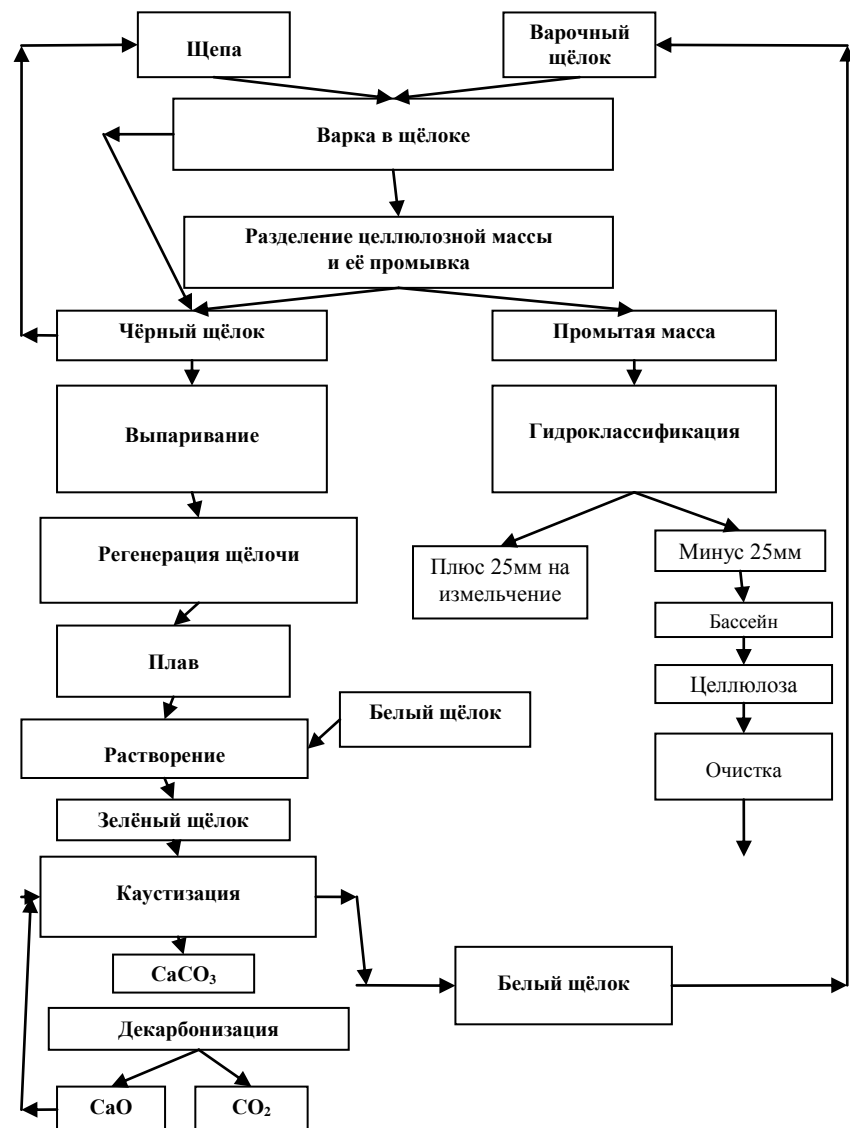


Рис.1. Принципиальная схема производства сульфатной целлюлозы

Практически вся подводимая энергия для непрерывного функционирования технологической схемы производства сульфатной целлюлозы обеспечивается лигнином

и другими углеводами, т.е. путем использования внутренних источников перерабатываемого сырья. Исключение составляет подвод высококачественного топлива на декарбонизацию известняка.

Обсуждение результатов

Результаты общего эксергетического баланса технологической схемы производства сульфатной целлюлозы приведены в табл.1.

Таблица 1

Эксергетические характеристики основных энергоиспользующих технологических процессов

Процесс	№	Δe_{qzi}	$\Delta e_{qвоспр.i}$	$\gamma_i, \%$	$\delta_i, \%$	$\eta_{ei}, \%$	$\gamma_i \eta_{ei}$
Выпарка	1	840963	789298	2,81	2,64	93,85	2,64
	2	654487	588377	2,19	1,97	89,95	1,97
	3	574514	459284	1,92	1,54	80,06	1,54
	4	491560	410745	1,64	1,37	83,82	1,37
	5	297779	228170	1,00	0,76	76,00	0,76
	6	238389	207384	0,80	0,69	86,76	0,69
	7	59773	0	0,20	0,00	0,00	0,00
	8	163019	0	0,54	0,00	0,00	0,00
Регенерация в СРК	9	3460000	883877	11,58	2,96	25,56	2,96
	10	12411246	5632976	41,54	18,85	45,38	18,85
	11	495000	303088	1,66	1,01	60,84	1,01
	12	452500	367626	1,51	1,23	81,48	1,23
	13	962364	729252	3,22	2,44	75,80	2,44
	14	1278750	800250	4,28	2,68	62,58	2,68
	15	580075	397204	1,94	1,33	68,52	1,33
	16	24276	0	0,08	0	0	0
	17	23363	0	0,08	0	0	0
	18	158600	0	0,53	0	0	0
	19	354000	0	1,18	0	0	0
	20	1064000	0	3,56	0	0	0
Обжиг в печи	21	736000	426725	2,46	1,43	58,05	1,43
	22	661900	421360	2,21	1,41	63,10	1,41
	23	1094680	421487	3,66	1,41	38,54	1,41
	24	1706	0	0,01	0	0	0
	25	578000	0	1,93	0	0	0
	26	300370	0	1,00	0	0	0
	27	55903	0	0,19	0	0	0
Варка	28	292935	261040	0,98	0,87	89,15	0,87
	29	259094	212305	0,87	0,71	81,67	0,71
	30	59963	28207	0,20	0,09	47,20	0,09
	31	830115	557984,15	2,78	1,87	67,17	1,87
	32	424247	239966	1,42	0,80	56,56	0,80
итого		29879571	14366606				0,48

В табл. 1 приняты следующие обозначения:

Δe_{qzi} , $\Delta e_{qвоспр.i}$ – приращение затраченной и воспринятой эксергии в процессе термического взаимодействия в i – ом элементе, кДж/т целлюлозы; γ_i , – доля затраченной эксергии в i – ом элементе к общей затраченной эксергии в системе, %; δ_i , – доля воспринятой эксергии в i – ом элементе к общей затраченной эксергии в системе, %; η_{ei} – эксергетический КПД i – ого элемента, %; η_{ei} – доля КПД i – ого элемента в КПД общей тепловой схемы.

Цифры и числа во втором столбце таблицы соответствуют отдельным энерготехнологическим процессам в различных элементах при их реализации: 1-6 – процессы выпаривания по корпусам выпарных аппаратов; 7 – процесс потери эксергии с паром 6 – го корпуса в окружающую среду; 8 – процесс потери эксергии от дросселирования греющего пара на первый корпус выпарной батареи; 9 – процесс испарения воды в СРК; 10 – процесс парообразования; 11 – процесс теплоотдачи теплоты от плава к промывной воде; 12 – процесс в защитном пучке; 13 – процесс в пароперегревателе; 14 – процесс в котельном пучке; 15 – процесс в водяном экономайзере; 16 – процесс потери эксергии теплоотдачей в окружающую среду через изоляцию и неизолированные участки; 17 – процесс потери эксергии с дымовыми газами; 18 – процесс потери эксергии на плавление солей; 19 – процесс потери эксергии теплоты от неполноты сгорания; 20 – процесс потери эксергии на восстановление сульфатов; 21 – процесс испарения и перегрев водяных паров; 22 – процесс обжига извести; 23 – процесс подогрева воздуха известью в рекуператорах; 24 – процесс потери эксергии, уносимой с пылью извести; 25 – процесс потери эксергии теплоты при разложения карбоната; 26 – процесс потери эксергии теплоотдачей в окружающую среду; 27 – процесс потери эксергии с дымовыми газами, включая выделяющуюся углекислоту; 28 – процесс в расширителе первой ступени; 29 – процесс в расширителе второй ступени; 30 – процесс пропарки щепы; 31 – процесс в парожидкостном теплообменнике; 32 – процесс теплообмена между сваренной технологической щепой и промывной водой в варочном котле.

Общая затраченная эксергия – $E_{з.общ}$ для всех технологических процессов в системе составляет 29879571 Дж.

Определение эксергетических характеристик производилось методом приращений эксергии [1–3].

Анализ приведенных результатов позволяет установить, что основная доля затраченной эксергии в процессе производства целлюлозы связана с процессом регенерации щелочи в СРК. В процессе регенерации щелочи затрачивается 70% эксергии, подведенной в схему. Из них 53 % затрачивается на процессы выпаривания воды из раствора и получения водяного пара в котле с соответствующими эксергетическими КПД – 25,56 % и 45,38 %, соответственно.

Влияние этих процессов на общий эксергетический КПД настолько велико, что они определяют величину эксергетического КПД схемы в целом, который составляет 48 %.

Вторым процессом по величине затраченной эксергии является процесс декарбонизации известняка. Здесь затрачивается 11,46 % от всей затраченной эксергии в схеме технологии производства. Этот процесс характеризуется низким (37 %) эксергетическим КПД.

Следующим процессом является выпарка черного щелока. Величина затраченной эксергии в процессе составляет 11,10 % при эксергетическом КПД этого процесса 81 %.

Последующим теплоиспользующим процессом по величине затраченной эксергии (6,25 %) является варка технологической щепы. Этот процесс характеризуется эксергетическим КПД 69,44 %, что не отвечает современным требованиям к эксергетическому КПД современных гидрохимических процессов.

Низкий эксергетический КПД процесса регенерации химикатов, который определяет и низкий эксергетический КПД производства сульфатной целлюлозы в целом, характерен для процесса в содорегенерационном котле (СРК). КПД этого процесса определяется величиной 43 % при подводе 70 % эксергии от всей подведенной эксергии в технологический процесс. Поэтому усилия зарубежных и российских специалистов направлены на совершенствование процесса в СРК. Кардинальным решением этой проблемы является исключение из технологической цепи этого энергозатратного и экологически опасного процесса.

Отмечаются [4–7] следующие преимущества технологического процесса без СРК по сравнению с традиционным методом:

- более высокий эксергетический КПД энергетического котла по сравнению с СРК;
- получение экологически безопасного высококалорийного топлива;
- дешевизна способа, так как энергетический котел в 4 раза дешевле, чем СРК;
- более безопасная эксплуатация оборудования – не образуется расплавленных солей, которые создают опасность взрыва при контакте с водой.

В работе предлагается способ гидротермального получения химикатов в процессе производства сульфатной целлюлозы. На рис.2 представлена предлагаемая принципиальная схема. Суть этой технологии заключается в выводе органической составляющей из черного щелока путем его автоклавной карбонизации дымовыми газами, отходящими из извести регенерационной печи (ИРП), в присутствии антрохинона при температуре 80-90 °С. По литературным данным выход органики в этих условиях может достигать 70 % [8,9].

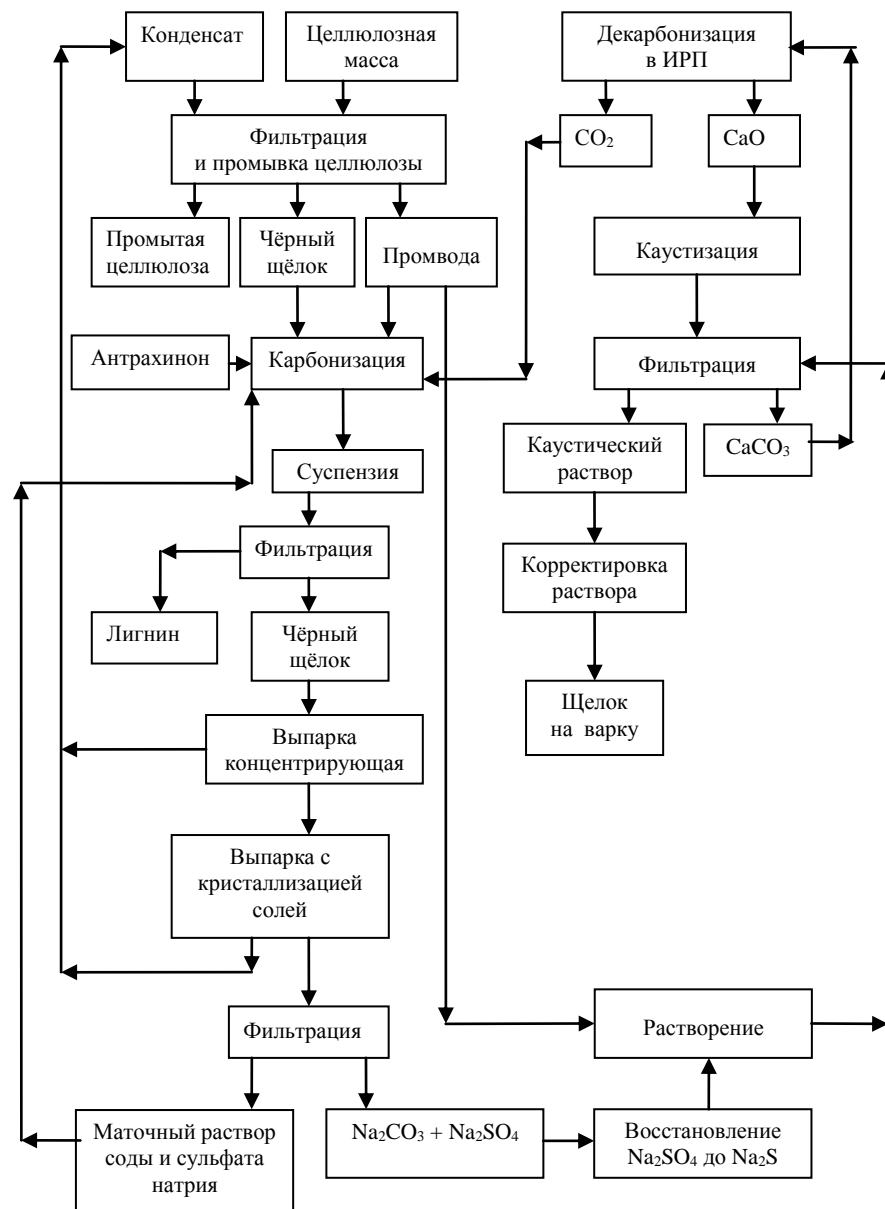


Рис.2. Принципиальная схема технологии теплоты в процессе регенерации химикатов

После фильтрации суспензии получают два продукта: органику, в основном в виде лигнина и лигнин содержащих соединений и карбонатный щелок. Лигнин после гранулирования используют как экологически чистое энергетическое топливо. Раствор органических соединений черного щелока выпаривают в выпарной установке до состояния близкого к насыщенному по содосульфатным солям. Далее черный щелок подвергают концентрированию с выделением содосульфатной смеси в небольшой ветви содовой выпарки. Есть все основания полагать, что вместе с содосульфатной смесью выделится до 60 % оставшейся в растворе органики, которая может быть использована в качестве топлива в восстановительной печи при восстановлении сульфата натрия в сульфид, а также в процессе регенерации извести. Раствор содосульфатной смеси направляют на карбонизацию.

Отличие предлагаемой схемы тепловой переработки черного щелока от существующей состоит в следующем:

- ввод новой технологической операции – автоклавная карбонизация черного щелока с целью вывода из процесса лигнина и других органических соединений и их гранулирования;
- увеличение числа ступеней выпаривания концентрирующей выпарки;
- восстановление сульфата натрия в сульфид натрия в восстановительной печи, где в качестве топлива может быть использован выделенный из раствора лигнин;
- замена суперконцентраторов перед СРК второй стадией выпаривания с выделением содосульфатной смеси в трех – четырех ступенчатых выпарных установках;
- вывод из технологического процесса СРК.

Из перечисленных технологических операций не трудно заключить, что новая технология теплоты производства сульфатной целлюлозы может быть освоена путем несложной реконструкции действующей технологической схемы.

Действительно, к принципиально новым технологическим операциям следует отнести автоклавный процесс с получением гранулированного продукта из органических соединений и восстановление сульфата натрия до сульфида натрия. Из общего баланса эксергий взаимодействующих потоков в технологии сульфатного производства установлено, что затраты эксергии в процессе восстановления сульфатов натрия до сульфидов составляет менее 4,0 %. Такой процесс может быть организован в небольшой восстановительной печи.

Остальные технологические операции, связанные с выпариванием раствора, могут быть реализованы на основе реконструкции действующих выпарных установок. Полученный гранулированный продукт из органических соединений может быть использован не только как высококалорийное экологически чистое топливо, но и как химическое сырье или в их комбинации. Окончательное решение может быть принято на основе изучения потребительской цены и спроса на этот продукт.

Так как в новом процессе регенерации химикатов процесс регенерации химикатов в СРК заменяется процессом выпаривания, рассмотрим эту технологическую систему как термодинамическую. Сопутствующие процессы восстановления сульфата натрия в сульфид натрия и регенерация извести являются вспомогательными операциями. Эти операции по затратам эксергии не определяют степень термодинамического совершенства системы регенерации химикатов в целом в виду их малости и поэтому в настоящей статье не рассматриваются.

Рассмотрим две стадии выпаривания черного щелока.

На первой стадии выпаривания производится концентрирование черного щелока до насыщения солей. Все процессы первой стадии выпаривания характеризуются очень высоким $\eta_e = 90 - 97 \%$. Эксергетический КПД процесса выпаривания первой стадии определяется величиной 80 %, что существенно ниже составляющих ее элементов. Это связано с отводом 7 % эксергии теплового потока пара десятого корпуса в окружающую среду. Использование теплоты пара 10 корпуса для нагрева технологических растворов позволит существенно повысить эксергетический КПД процесса выпаривания первой стадии.

Из материального баланса следует, что на второй стадии выпаривания выделяется 15 % от общей выпаренной воды.

Заключение

Представлена принципиальная схема и анализ технологии теплоты производства сульфатной целлюлозы, заключающаяся в выводе органической составляющей из черного щелока путем его автоклавной карбонизации дымовыми газами, отходящими из известерегенерационной печи при температуре 80-90 °С. Вывод органики в этих условиях может достигать 70 %.

В рассмотренном варианте эксергетический КПД $\eta_e = 80 \%$ значительно выше, чем КПД существующей схемы регенерации химикатов $\eta_e = 48 \%$. Из этого следует, что часть получаемого топлива на основе лигнина может быть использована на собственные нужды, а другая половина реализована в качестве экологически безопасного высококалорийного возобновляемого топлива.

Дальнейшее совершенствование технологии теплоты в процессе регенерации химикатов может идти в следующих направлениях:

- использование теплоты паросодержащих дымовых газов корьевых котлов для выпаривания слабого черного щелока. Расчеты показали, что расход греющего пара на выпаривание, а следовательно, и расход органического топлива на собственные нужды может быть сокращен дополнительно на 30 – 50 %;

– повышение эксергетического КПД первой и второй стадии выпаривания путем оптимизации их параметров: числа ступеней выпаривания, концентрации а.с.в. на первой и второй стадии выпаривания, использования теплоты пара вакуумных корпусов и др [10–12].

Можно прогнозировать, что путем рационального потребления лигнинсодержащего топлива по гидротермальному способу регенерации химикатов затраты на собственные технологические нужды производства сульфатной целлюлозы могут быть сокращены до 20-30 % [13–16].

Литература

1. Казаков В.Г., Луканин П.В., Смирнова О.С. Упрощенный метод определения эксергетического КПД сложной тепловой схемы технологического процесса // Промышленная энергетика. 2010. №1. С. 38-41.
2. Калинин Н.В., Мартынов А.В., Калинина Е.И. Об эксергии и КПД (К юбилею учителя) // Холодильная техника. 2019. №10. С. 42-45.
3. Юшкова Е.А., Лебедев В.А. Определение эксергии в теплотехнических системах // Материалы Международной научной конференции «Наука. Исследования. Практика»; 24 февраля 2020 г., Санкт-Петербург: ГНИИ «Нацразвитие», 2020. С 184-186.
4. Луканин П.В., Казаков В.Г., Федорова О.В. Энергоэкологические аспекты в процессе переработки черного щелока сульфатной целлюлозы // Труды 20 Менделеевского съезда по общей и прикладной химии; 26-30 сентября 2016 г., Екатеринбург: Уральское отделение Российской Академии Наук, 2016. С. 512.
5. Timpe W., Evers W. A new process for the recovery of heat and chemicals from black liquor from cellulose sulfate production using hydropyrolysis // Pulp and Paper. 1972. N11. pp. 56-57.
6. Ma Keo P. Rapid pyrolysis of black sulfate liquor // Paper I Puu. 1995. N1-2. pp. 39-44.
7. Вагин Г.Я. К вопросу о повышении энергетической эффективности промышленных предприятий // Промышленная энергетика. 2013. № 5. С. 2-6.
8. Казаков В.Г., Луканин П.В., Смирнова О.С. Гидрохимический способ регенерации натриевых щелочей. Патент РФ на изобретение № 2415984. 10.04.2011. Бюл. №10.
9. Alén R., Sjöström E., Vaskirari P. Carbon dioxide precipitation of lignin from alkaline pulping liquors // Cellulose Chemistry and Technology. 1985. Vol. 19, N5. pp. 537-541.
10. Луканин П.В., Казаков В.Г., Федорова О.В., и др. Модернизация технологического процесса переработки черных щелоков сульфатной целлюлозы // Прикладная химия. 2016. №5(89). С. 654-659.
11. Луканин П.В., Казаков В.Г., Смирнова О.С. Технология теплоты в гидрохимическом способе регенерации химикатов производства сульфатной целлюлозы // Промышленная энергетика. 2012. №11. С.44-48.
12. Nimish Dubey, Morrish Kumar. CFD Analysis of Fluid Flowing Through a Heat Exchanger Tube Having a Twisted Tape with a Centrally Placed Semi-Circular Groove // International Journal of Science and Research. 2017. Vol.6, N6. pp. 2200-2207.
13. Hansen E, Panwar R, Vlosky R. The Global Forest Sector: Changes. Practices and Prospects // Taylor & Francis Group (NY); 2017.
14. Sivashanmugam P., Suresh S. Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of turbulent flow through a circular tube fitted with helical screw-tape inserts // Chemical Engineering and Processing. 2007. N46. pp.1292-1298.
15. Shyy Woei Chang, Wei Ling Cai, Ruo Sin Syu. Heat transfer and pressure drop measurements for tubes fitted with twin and four twisted fins on rod // Experimental Thermal and Fluid Science. 2016. N74. pp. 220-234.
16. Zhang Z., Way J.D., Wolden C.A., et al. Barium-promoted ruthenium catalysts on yttria-stabilized zirconia supports for ammonia synthesis // ACS Sustainable Chemistry and Engineering. 2019. Vol. 7. N21. pp.18038-18047.

Автор публикации

Луканин Павел Владимирович – канд. техн. наук, профессор, первый проректор Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна.

References

1. Kazakov VG, Lukanin PV, Smirnova OS. Uproshchennyi metod opredeleniya eksergeticheskogo KPD slozhnoi teplovoi skhemy tekhnologicheskogo protsessa. *Promyshlennaya energetika*. 2010;1:38-41.

2. Kalinin N.V., Martynov A.V., Kalinina E.I. Ob eksergii i KPD (K Jubeleju uchitelja) *Holodil'naja tekhnika*. 2019;10:42-45.
3. Yushkova EA, Lebedev VA. Opreделение eksergii v teplotekhnicheskikh sistemakh. Nauchnaya konferentsiya «Nauka. Issledovaniya.Praktika», 24 Feb 2020; Saint-Peterburg, Russia. Saint-Peterburg: GNI «Natsrazvitie», 2020. pp. 184-186.
4. Lukanin PV, Kazakov VG, Fyedorova OV. Energoekologicheskie aspekty v protsesse pererabotki chyernogo shcheloka sul'fatnoi tsellyulozy. *XX Mendeleevskiy s'ezd po obshchei i prikladnoi khimii; 26-30 Sen 2016; Ekaterinburg, Russia*. Ekaterinburg: Uralskoye otdelenie Rossiiskoi Akademii Nauk, 2016. P. 512.
5. Timpe W., Evers W. A new process for the recovery of heat and chemicals from black liquor from cellulose sulfate production using hydropyrolysis. *Pulp and Paper*. 1972;11: 56-7.
6. Ma Keo P. Rapid pyrolysis of black sulfate liquor. *Papery I Puu*. 1995;1-2: 39-44.
7. Vagin GYa. K voprosu o povyshenii energeticheskoi effektivnosti promyshlennykh predpriyatii // *Promyshlennaya energetika*. 2013;5: 2-6.
8. Kazakov VG, Lukanin PV, Smirnova OS. *Gidrokhimicheskii sposob regeneratsii natrievykh shchelochey*. Patent RUS № 2415984. 10.04.2011. Byul. №10.
9. Alén R, Sjöström E, Vaskirari P. Carbon dioxide precipitation of lignin from alkaline pulping liquors. *Cellulose Chemistry and Technology*. 1985;19 (5): 537-541.
10. Lukanin PV, Kazakov VG, Fyedorova OV, et al. Modernizatsiya tekhnologicheskogo processa pererabotki chyernykh shchelokov sul'fatnoi tsellyulozy. *Prikladnaya khimiya*. 2016; 89(5):654-659.
11. Lukanin PV, Kazakov VG, Smirnova OS. Tekhnologiya teploty v gidrokhimicheskom sposobe regeneratsii khimikatov proizvodstva sul'fatnoi tsellyulozy. *Promyshlennaya energetika*. 2012; 11: 44-8.
12. Nimish Dubey, Morrish Kumar. CFD Analysis of Fluid Flowing Through a Heat Exchanger Tube Having a Twisted Tape with a Centrally Placed Semi-Circular Groove. *International Journal of Science and Research*. 2017;6 (6):2200-7.
13. Hansen E, Panwar R, Vlosky R. *The Global Forest Sector: Changes. Practices and Prospects*. Taylor & Francis Group (NY);2017.
14. Sivashanmugam P, Suresh S. Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of turbulent flow through a circular tube fitted with helical screw-tape inserts. *Chemical Engineering and Processing*. 2007;46:1292-8.
15. Shyy Woei Chang, Wei Ling Cai, Ruo Sin Syu. Heat transfer and pressure drop measurements for tubes fitted with twin and four twisted fins on rod. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016; 74: 220-234.
16. Zhang Z, Way JD, Wolden CA, et al. Barium-promoted ruthenium catalysts on yttria-stabilized zirconia supports for ammonia synthesis. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2019; 7(21):18038-18047.

Author of the publication

Pavel V. Lukanin – Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia. Email: lukanin@gturp.spb.ru.

Поступила в редакцию

23.03.2020 г.